

ISSN 2658-6649 (Print)
ISSN 2658-6657 (Online)

Siberian journal **of Life Sciences and Agriculture**

SjLSA

www.discover-journal.ru



Volume 18, Number 3
2026

ISSN 2658-6649 (print)
ISSN 2658-6657 (online)

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

**Volume 18, Number 3
2026**

Главный редактор:

Солдатов Сергей Константинович, доктор медицинских наук, профессор
(Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил
Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия)

Заместители главного редактора:

Медведев Леонид Нестерович, доктор биологических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (Красноярск, Россия)

Оказова Зарина Петровна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Чеченский государственный педагогический университет»
(Грозный, Россия)

Москаленко Ольга Леонидовна, кандидат биологических наук, НИИ МПС,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук» (Красноярск, Россия)

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

Научно-практический рецензируемый журнал
Peer-reviewed scientific-practical journal

Периодичность. 6 номеров в год / Periodicity. 6 issues per year

Том 18, № 3, 2026 / Vol. 18, No 3, 2026

Учредитель и издатель:

ООО Научно-инновационный центр

Журнал основан в 2008 году

Зарегистрирован в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций

Регистрационный номер:
серия ЭЛ № ФС 77-89425 от 20.05.2025 г.

Журнал входит в Перечень
ведущих рецензируемых научных
журналов и изданий, выпускаемых в РФ,
в которых должны быть опубликованы
основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени
доктора и кандидата наук.

Индексирование и реферирование:

Scopus

РИНЦ

Ulrich's Periodicals Directory

Cyberleninka

Google Scholar

ВИНИТИ РАН

DOAJ

BASE

EBSCO

WorldCat

OpenAIRE

ЭБС IPRbooks

ЭБС Znanium

ЭБС Лань

Адрес редакции, издателя и для корреспонденции:

Россия, 660127, Красноярский край,
г. Красноярск, ул. 9 Мая, 5 к. 192
E-mail: editor@discover-journal.ru
<http://discover-journal.ru/>

+7 (995) 080-90-42

Founder and publisher:

Science and Innovation Center
Publishing House

Founded 2008

Mass media registration certificate

EL № FS 77 - 89425,

issued May 20, 2025.

Journal is included in the List
of leading peer-reviewed
scientific journals and publications
issued in the Russian Federation,
which should publish main scientific
results of doctor's
and candidate's theses.

Indexing and Abstracting:

Scopus

RSCI

Ulrich's Periodicals Directory

Cyberleninka

Google Scholar

VINITI Database RAS

DOAJ

BASE

EBSCO

WorldCat

OpenAIRE

IPRbooks

Znanium

Lan'

Editorial Board Office:

9 Maya St., 5/192, Krasnoyarsk,
660127, Russian Federation
E-mail: editor@discover-journal.ru
<http://discover-journal.ru/>

+7 (995) 080-90-42

Свободная цена

© Научно-инновационный центр, 2026

Члены редакционной коллегии

Александрова Оксана Юрьевна, доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья имени Н.А. Семашко» (Москва, Россия)

Ананьев Владимир Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, Государственный научный центр РФ - Институт медико-биологических проблем РАН (Москва, Россия)

Анисимов Андрей Павлович, доктор медицинских наук, профессор, Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии Роспотребнадзора (Оболensk, Россия)

Ариничева Ирина Владимировна, доктор биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)

Арутюнян Александр Вартанович, доктор биологических наук, профессор, Научно-исследовательский институт акушерства, гинекологии и репродуктологии им. Д.О. Отта (Санкт-Петербург, Россия)

Астарханова Тамара Саржановна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Российский университет дружбы народов (Москва, Россия)

Ашмарина Людмила Филипповна, доктор сельскохозяйственных наук, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Балабко Петр Николаевич, доктор биологических наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Балакирев Николай Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина (Москва, Россия)

Барabanов Анатолий Тимофеевич, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (Волгоград, Россия)

Батырбекова Светлана Есимбековна, доктор химических наук, профессор, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Республика Казахстан)

Беленков Алексей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

Беляев Анатолий Аркадьевич, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Новосибирский го-

сударственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Берсенева Евгения Александровна, доктор медицинских наук, профессор, ФГБУ «ВНИИИМТ» Росздравнадзора (Москва, Россия)

Буко Вячеслав Ульянович, доктор биологических наук, профессор, Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (Гродно, Республика Беларусь)

Бяловский Юрий Юльевич, доктор медицинских наук, профессор, Рязанский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова (Рязань, Россия)

Виноградов Дмитрий Валериевич, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО РГАТУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева (Рязань, Россия)

Виткина Татьяна Исааковна, доктор биологических наук, профессор РАН, Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания (Благовещенск, Россия)

Волкова Галина Владимировна, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, Федеральный научный центр биологической защиты растений (Краснодар, Россия)

Волынкин Владимир Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)

Воронина Валентина Павловна, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Волгоградский государственный аграрный университет (Волгоград, Россия)

Гармаев Эндон Жамьянович, доктор географических наук, доцент, профессор РАН, член-корреспондент РАН, Байкальский институт природопользования СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Гинс Мурат Сабирович, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» (п. ВНИССОК, Россия)

Глотов Александр Гаврилович, доктор ветеринарных наук, профессор, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Головин Сергей Евгеньевич, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства (Москва, Россия)

Голохваст Кирилл Сергеевич, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Гомбоев Баир Октябрьевич, доктор географических наук, профессор, Байкальский институт природопользования СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Гончаров Сергей Владимирович, доктор биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)

Грязькин Анатолий Васильевич, доктор биологических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия)

Денисов Сергей Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Поволжский государственный технологический университет (Йошкар-Ола, Россия)

Дерягина Лариса Евгеньевна, доктор медицинских наук, профессор, Московский университет МВД РФ им. В.Я. Кикотя (Москва, Россия)

Дьякович Марина Пинхасовна, доктор биологических наук, профессор, Ангарский государственный технический университет (Ангарск, Россия)

Жмылев Павел Юрьевич, доктор биологических наук, доцент, Государственный университет «Дубна» (Москва, Россия)

Зайцев Владимир Владимирович, доктор биологических наук, профессор, Самарский государственный аграрный университет (Самара, Россия)

Залесов Сергей Вениаминович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Уральский государственный лесотехнический университет (Екатеринбург, Россия)

Зудилин Сергей Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Самарский государственный аграрный университет (Самара, Россия)

Иванова Майса Афанасьевна, доктор медицинских наук, профессор, ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Москва, Россия)

Иванченко Вячеслав Иосифович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Симферополь, Россия)

Иванцова Елена Анатольевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Волгоградский государственный университет (Волгоград, Россия)

Казакова Алия Сабировна, доктор биологических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ (Зерноград, Россия)

Казыдуб Нина Григорьевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина (Омск, Россия)

Калягин Алексей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, МВА, Иркутский государственный медицинский университет (Иркутск, Россия)

Карганов Михаил Юрьевич, доктор биологических наук, профессор, Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии (Москва, Россия)

Кашеваров Николай Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)

Клименко Виктор Павлович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)

Ковалев Николай Николаевич, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Владивосток, Россия)

Козлов Василий Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент, Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Москва, Россия)

Колесников Сергей Ильич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)

Коробова Лариса Николаевна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» (Новосибирск, Россия)

Кузин Андрей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)

Кузьмин Сергей Владимирович, доктор медицинских наук, профессор, Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора (Мытищи, Россия)

Лесовская Марина Игоревна, доктор биологических наук, профессор, Красноярский государственный аграрный университет (Красноярск, Россия)

Лисняк Анатолий Анатольевич, кандидат сельскохозяйственных наук, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (Харьков, Украина)

Лиховской Владимир Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)

Мазиров Михаил Арнольдович, доктор биологических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

Манаенков Александр Сергеевич, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН (Волгоград, Россия)

Манчук Валерий Тимофеевич, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Марзанов Нурбий Сафарбиевич, доктор биологических наук, профессор, Федеральный исследовательский центр животноводства - ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста (Подольск, Россия)

Мельченко Александр Иванович, доктор биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)

Меньшикова Лариса Ивановна, доктор медицинских наук, профессор, Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования (Москва, Россия)

Минигалиева Ильзира Амировна, доктор биологических наук, Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промышленных предприятий (Екатеринбург, Россия)

Мойсенок Андрей Георгиевич, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (Гродно, Республика Беларусь)

Монахос Сократ Григорьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор РАН, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

Музурова Людмила Владимировна, доктор медицинских наук, профессор, Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского (Саратов, Россия)

Мухортов Дмитрий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Поволжский государственный технологический университет (Иошкар-Ола, Россия)

Насыбуллина Галия Максutowна, доктор медицинских наук, профессор, Уральский государственный медицинский университет (Екатеринбург, Россия)

Науанова Айнаш Пахуашовна, доктор биологических наук, профессор, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина (Астана, Республика Казахстан)

Никитюк Дмитрий Борисович, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи (Москва, Россия)

Остренко Константин Сергеевич, доктор биологических наук, Федеральный исследовательский центр животноводства - ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста (Подольск, Россия)

Панкрушина Алла Николаевна, доктор биологических наук, профессор, Тверской государственный университет (Тверь, Россия)

Паштецкий Владимир Степанович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, член-корреспондент РАН, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма (Симферополь, Россия)

Полунин Валерий Сократович, доктор медицинских наук, профессор, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова (Москва, Россия)

Полунина Наталья Валентиновна, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова (Москва, Россия)

Поползухин Нина Алексеевна, доктор сельскохозяйственных наук, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина (Омск, Россия)

Пронина Галина Иосеповна, доктор биологических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

Пуликов Анатолий Степанович, доктор медицинских наук, профессор, отличник здравоохранения РФ, Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Рапопорт Жан Жозефович, доктор медицинских наук, профессор, отличник здравоохранения СССР, заслуженный изобретатель СССР, НИИ МПС (Россия/Израиль)

Рахимов Александр Иманулович, доктор химических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Россия)

Рахимова Надежда Александровна, доктор химических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Россия)

Саввина Надежда Валерьевна, доктор медицинских наук, профессор, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (Якутск, Россия)

Савельева Наталья Николаевна, доктор биологических наук, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)

Сетков Николай Александрович, доктор биологических наук, профессор, Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

Смелик Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (Санкт-Петербург, Россия)

Стецов Григорий Яковлевич, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий (Барнаул)

Суханова Светлана Филевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева (Лесниково, Россия)

Сычев Виктор Гаврилович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова (Москва, Россия)

Тармаева Инна Юрьевна, доктор медицинских наук, профессор, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи (Москва, Россия)

Терещенко Сергей Юрьевич, доктор медицинских наук, профессор, Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Торопова Елена Юрьевна, доктор биологических наук, профессор, Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Трифопова Татьяна Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Трунов Юрий Викторович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Мичуринский государственный аграрный университет (Мичуринск, Россия)

Ткачёв Александр Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры ветеринарной медицины, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

Тыщенко Елизавета Алексеевна, доктор технических наук, доцент, Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (Кемерово, Россия)

Упадышев Михаил Тарьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, ФГБНУ Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства (Москва, Россия)

Черных Наталья Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, Московский государственный институт международных отношений (университет) (Москва, Россия)

Чернявских Владимир Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса (Лобня, Россия)

Шнайдер Наталья Алексеевна, доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева (Санкт-Петербург, Россия)

Юшков Андрей Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)

Editorial Board Members

Oksana Yu. Alexandrova, Doctor of Medical Sciences, Professor, National Research Institute of Public Health named after N.A. Semashko (Moscow, Russia)

Vladimir N. Ananiev, Doctor of Medical Sciences, Professor, State Scientific Center of the Russian Federation - Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Andrey P. Anisimov, Doctor of Medical Sciences, Professor, State Research Center for Applied Microbiology and Biotechnology of Rospotrebnadzor (Obolensk, Russia)

Irina V. Arinicheva, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)

Alexander V. Arutyunyan, Doctor of Biological Sciences, Professor, Research Institute of Obstetrics, Gynecology and Reproductology named after D. O. Ott (St. Petersburg, Russia)

Tamara S. Astarkhanova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia)

Lyudmila F. Ashmarina, Doctor of Agricultural Sciences, Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)

Petr N. Balabko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Nikolai A. Balakirev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K. I. Skryabin (Moscow, Russia)

Anatoly T. Barabanov, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Aforestation of the Russian Academy of Sciences (Volgograd, Russia)

Svetlana Ye. Batyrbekova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Republic of Kazakhstan)

Aleksey I. Belenkov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Anatoly A. Belyaev, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)

Evgenia A. Berseneva, Doctor of Medical Sciences, Professor, All-Russian Research and Testing Institute of Medical Equipment (Moscow, Russia)

Vyacheslav U. Buko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (Grodno, Republic of Belarus)

Yury Yu. Byalovsky, Doctor of Medical Sciences, Professor, Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlova (Ryazan, Russia)

Dmitry V. Vinogradov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (Ryazan, Russia)

Tatyana I. Vitkina, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Far Eastern Scientific Center for Physiology and Pathology of Respiration (Blagoveshchensk, Russia)

Galina V. Volkova, Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center for Biological Plant Protection (Krasnodar, Russia)

Vladimir A. Volynkin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" (Yalta, Russia)

Valentina P. Voronina, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Volgograd State Agrarian University (Volgograd, Russia)

Endon Zh. Garmaev, Doctor of Geography, Associate Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)

Murat S. Gins, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center for Vegetable Growing (VNIISOK, Russia)

Aleksandr G. Glotov, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)

Sergey E. Golovin, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Breeding and Technological Center for Horticulture and Nursery (Moscow, Russia)

Kirill S. Golokhvast, Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, Professor of the Russian Academy of Sciences, Siberian Federal Scientific Center for Agricultural Biotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)

Bair O. Gomboev, Doctor of Geography, Professor, Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)

Sergey V. Goncharov, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)

Anatoly V. Gryazkin, Doctor of Biological Sciences, Professor, Saint-Petersburg State Forest Technical

University named after S.M. Kirova (St. Petersburg, Russia)

Sergey A. Denisov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Volga State Technological University (Yoshkar-Ola, Russia)

Larisa E. Deryagina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after V.Y. Kikot (Moscow, Russia)

Marina P. Dyakovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Angarsk State Technical University (Angarsk, Russia)

Pavel Yu. Zhmylev, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, State University "Dubna" (Moscow, Russia)

Vladimir V. Zaitsev, Doctor of Biological Sciences, Professor, Samara State Agrarian University (Samara, Russia)

Sergey V. Zalesov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg, Russia)

Sergey N. Zudilin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Samara State Agrarian University (Samara, Russia)

Maisa A. Ivanova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute for the Organization and Informatization of Healthcare" of the Ministry of Health of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Vyacheslav I. Ivanchenko, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Simferopol, Russia)

Elena A. Ivantsova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Volgograd State University (Volgograd, Russia)

Aliya S. Kazakova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Azov-Chernomorsk Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University (Zernograd, Russia)

Nina G. Kazydub, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Omsk State Agrarian University named after P. Stolypin (Omsk, Russia)

Aleksey N. Kalyagin, Doctor of Medical Sciences, Professor, MBA, Irkutsk State Medical University (Irkutsk, Russia)

Mikhail Yu. Karganov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Research Institute of General Pathology and Pathophysiology (Moscow, Russia)

Nikolay I. Kashevarov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Sciences, Siberian Federal Scientific Center for Agricultural Biotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)

Viktor P. Klimenko, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" (Yalta, Russia)

Nikolai N. Kovalev, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Far Eastern State Technical Fisheries University (Vladivostok, Russia)

Vasily V. Kozlov, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Moscow, Russia)

Sergey I. Kolesnikov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

Larisa N. Korobova, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)

Andrey I. Kuzin, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)

Sergey V. Kuzmin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman (Mytishchi, Russia)

Marina I. Lesovskaya, Doctor of Biological Sciences, Professor, Krasnoyarsk State Agrarian University (Krasnoyarsk, Russia)

Anatoly A. Lisnyak, Candidate of Agricultural Sciences, V. N. Karazin Kharkiv National University (Kharkiv, Ukraine)

Vladimir V. Likhovskoy, Doctor of Agricultural Sciences, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" (Yalta, Russia)

Mikhail A. Mazirov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Alexander S. Manaenkov, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Federal Research Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences (Volgograd, Russia)

Valery T. Manchuk, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)

Nurbiy S. Marzanov, Doctor of Biological Sciences, Professor, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry (Podolsk, Russia)

Alexander I. Melchenko, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)

Larisa I. Menshikova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (Moscow, Russia)

Ilzira A. Minigalieva, Doctor of Biological Sciences, Yekaterinburg Medical Research Center for Prevention and Health Protection of Industrial Workers (Yekaterinburg, Russia)

Andrei G. Moiseenok, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the National

Academy of Sciences of Belarus, Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (Grodno, Republic of Belarus)

Sokrat G. Monakhos, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Lyudmila V. Muzurova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky (Saratov, Russia)

Dmitry I. Mukhortov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Volga State Technological University (Yoshkar-Ola, Russia)

Galia M. Nasybullina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Ural State Medical University (Yekaterinburg, Russia)

Ainash P. Nauanova, Doctor of Biological Sciences, Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University (Astana, Republic of Kazakhstan)

Dmitry B. Nikityuk, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)

Konstantin S. Ostrenko, Doctor of Biological Sciences, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry (Podolsk, Russia)

Alla N. Pankrushina, Doctor of Biological Sciences, Professor, Tver State University (Tver, Russia)

Vladimir S. Pashtetsky, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture of the Crimea (Simferopol, Russia)

Valeriy S. Polunin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Pirogov Russian National Research Medical University (Moscow, Russia)

Natalya V. Polunina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Pirogov Russian National Research Medical University (Moscow, Russia)

Nina A. Popolzhkina, Doctor of Agricultural Sciences, Omsk State Agrarian University named after P. Stolypin (Omsk, Russia)

Galina I. Pronina, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Anatoly S. Pulikov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Excellence in Public Health of the Russian Federation, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)

Zhan Zh. Rapoport, Doctor of Medical Sciences, Professor, Excellence in Public Health of the USSR, Honored Inventor of the USSR, Research Institute of the Ministry of Railways (Russia/Israel)

Alexander I. Rakhimov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)

Nadezhda A. Rakhimova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)

Igor A. Rodin, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)

Alexander S. Rulev, Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture (Volgograd, Russia)

Nadezhda V. Savvina, Doctor of Medical Sciences, Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University in Yakutsk (Yakutsk, Russia)

Natalya N. Savel'yeva, Doctor of Biological Sciences, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)

Nikolai A. Setkov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Viktor A. Smelik, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State Agrarian University (St. Petersburg, Russia)

Grigory Ya. Stetsov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Leading Researcher Federal Altai Scientific Center for Agrobiotechnologies (Barnaul, Russia)

Svetlana F. Sukhanova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev (Lesnikovo, Russia)

Viktor G. Sychev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov (Moscow, Russia)

Inna Yu. Tarmaeva, Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)

Sergey Yu. Tereshchenko, Doctor of Medical Sciences, Professor, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)

Elena Yu. Toropova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)

Tatyana A. Trifonova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Yury V. Trunov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Michurin State Agrarian University (Michurinsk, Russia)

Alexander V. Tkachev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Veterinary Medicine, Senior Researcher Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Elizaveta A. Tyshchenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russia)

Mikhail T. Upadyshev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal State Budget Scientific Institution Federal Scientific Selection and Technological Center for Horticulture and Nursery (Moscow, Russia)

Natalya A. Chernykh, Doctor of Biological Sciences, Professor, Moscow State Institute of International Relations (University) (Moscow, Russia)

Vladimir I. Chernyavskikh, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (Lobnya, Russia)

Natalya A. Schneider, Doctor of Medical Sciences, Professor, Bekhterev National Medical Research Center for Psychiatry and Neurology (St. Petersburg, Russia)

Andrey N. Yushkov, Doctor of Agricultural Sciences, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1479](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1479)

EDN: AAJDOF

UDC 636.3.084



Effect of synbiotic supplementation on growth performance, nutrient digestibility, rumen fermentation, and blood metabolites in Arabi lambs

J.A.A. Bannai¹, A.N. Khalaf², H.A.J. Al-Galbi³, A.A. Almayyahi⁴¹*College of Veterinary Medicine, University of Basrah, Basrah, Iraq*²*Maysan Education Directorate, Ministry of Education, Amarah, Iraq*³*College of Agriculture, University of Basrah, Basrah, Iraq*⁴*Management Technical College, Southern Technical University, Basrah, Iraq*

Abstract

Background. A synbiotic is a product of living microorganisms and their metabolites, which when consumed can benefit the health of the host animal by affecting the microbial balance in the stomach or gut.

Purpose. To assess the growth performance and nutrient utilization of diet supplementation with synbiotic to Arabi lambs.

Methodology. Thirty male lambs, approximately four months old, were used in a 105-day feeding trial, which included a 15-day adaptation period. Animals were randomly and evenly allocated into three dietary groups. The control group received a basal diet composed of 40% concentrate and 60% alfalfa hay. The second and third groups were offered the same basal diet supplemented with 3 kg/ton and 5 kg/ton synbiotic, respectively. Parameters measured included body weight, total and daily weight gain, feed intake, feed conversion ratio, and apparent nutrient digestibility.

Results. Synbiotic supplementation at 3 kg/ton and 5 kg/ton increased final body weight by 15.50% and 14.28%, respectively, compared with the control group. Likewise, total and daily weight gains improved by 40.19% and 33.83%, respectively. Feed intake showed a slight increase (2.11%), whereas feed conversion ratio improved markedly, decreasing by 24.97% and 22.32% in the 3 kg and 5 kg synbiotic groups, respectively. Digestibility coefficients of dry matter, organic matter, crude protein, acid detergent fiber (ADF), and neutral detergent fiber (NDF) were significantly higher ($p < 0.05$) in both supplemented groups.

Conclusion. The moderate synbiotic supplementation (3 kg/ton) optimizes nutrient utilization, enhances growth performance, and improves feed efficiency in Arabi lambs under Basrah field.

Keywords: Arabi lambs; synbiotic; growth performance; rumen fermentation; nutrient digestibility; blood metabolites

For citation. Bannai, J. A. A., Khalaf, A. N., Al-Galbi, H. A. J., & Almayyahi, A. A. (2026). Effect of synbiotic supplementation on growth performance, nutrient digestibility, rumen fermentation, and blood metabolites in Arabi lambs. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 11–27. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1479>

Introduction

A synbiotic is a substance derived from living microorganisms and their byproducts that can enhance the host animal's health by improving the microbial balance in its gut or digestive tract [1]. It refers to pre-prepared or extracted microbial media, enzymatic preparations, or any combination of these terms [2; 3]. The U.S. Food and Drug Administration has dubbed synbiotic as direct-fed microbial, thereby limiting the definition to living microorganisms naturally present in the gastrointestinal tract of animals that are incorporated into the diets of small or large animals [4-6]. This accelerates the establishment of microbial equilibrium in the normal state, bolstering defense mechanisms, stimulating the immune system, improving health, and promoting productive performance instead of focusing on disease resistance [7-9]. The synbiotic is used in animal nutrition not only to achieve the microbial balance of the intestinal flora in the gut, which is inherently present, but also to rectify any imbalance, especially when animals encounter stressors, such as high temperatures, disease injury, dietary alterations, or weaning, all of which adversely affect productive performance [10]. The synbiotic has been shown to restore the microbial balance of the intestinal flora to its normal state through various mechanisms, such as improving the digestibility coefficient of nutrients [11], decreasing the viscosity of gut contents, and reducing the transit of substances in it [12]. Moreover, the synbiotic can enhance the activity of vital enzymes, vitamins, and amino acids during digestion, which improves the performance of the intestinal flora and the rumen [13].

The synbiotic enhances fermentation in the rumen and stabilizes its pH, positively influencing the growth of microorganisms and their performance, particularly cellulolytic bacteria, while serving as a vital source of energy and

protein for microbial growth [14]. Consequently, feed digestion improves, feed intake increases, and feed conversion efficiency is enhanced [15]. The supplementation with synbiotics boosts the fiber digestion in rumen and increases the digestion of total dry matter, acidic detergent fibre (ADF), and neutral detergent fibre (NDF) depending on the diet especially its fibre content [16].

It was found that the supplementation of probiotics or a synbiotic to Awassi and Barki lambs had a positive effect on feed conversion ratio, nutrient digestibility and rumen fermentation efficiency [17; 18]. But, few data are available on adaptable breed of lamb – Arabi which has moderate growth performance. The study was designed to determine the effect of different levels of inclusion of synbiotic on growth performance, digestibility, rumen fermentation and blood metabolites in southern Iraqi conditions. The objective of this study was to investigate the effects of the inclusion of different levels of synbiotic on growth performance, digestibility, rumen fermentation and blood metabolites in Arabi lambs when reared in the southern Iraqi condition.

Materials and methods

Experimental Design and Animals

The experiment was conducted at the Animal Field, College of Agriculture, University of Basrah. Thirty healthy Arabi male lambs aged (3–4) months with an average initial weight of 17.25 ± 1.14 kg were randomly assigned to three treatments ($n=10$ each). The trial lasted 105 days, including 15 days for adaptation.

Diet Composition and Treatments

All lambs received a basal diet composed of 60% alfalfa hay and 40% concentrate mix (barley 54%, bran 30%, corn 10%, soybean meal 5%, vitamins + minerals 1%). Treatment groups: Control (no additive), S3 (3 kg/ton synbiotic), and S5 (5 kg/ton synbiotic). The synbiotic contained viable *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, and *Enterococcus faecium* cultures, plus amino acids, peptides, and whey-based carriers. The chemical composition and proportions of the feed substances of the concentrated diet and alfalfa hay are shown in (Table 1). The concentrated diet consisted of 54% barley, 30% bran, 10% ground yellow corn, 5% soybeans, and 1% vitamins and mineral salts. The concentrated diet was administered as 40% and alfalfa hay at 60%. The control group received a diet with no synbiotic additive. However, the two other groups received the control diet supplemented with either 3 or 5 gm/ton synbiotic.

Table 1.

Chemical composition of feed materials used in the study (%)

Nutrient	Alfalfa hay	Concentrate
Dry matter	91.11	90.24
Crude protein	16.40	14.15
Ether extract	1.28	2.38
Crude fiber	32.28	17.47
Ash	6.75	4.77
NFE	34.40	56.80

Metabolizable energy was calculated according to MAFE (1975) = 11.26 MJ/ kg dry matter, NFE= Nitrogen free extract

Performance and Digestibility Measurements

Lambs were weighed weekly, feed intake was recorded daily, and feed conversion ratio (FCR) calculated. A 5-day digestibility trial was conducted using grab sampling. Feed and feces were analyzed for DM, OM, CP, NDF, and ADF following AOAC methods [19].

Rumen Fermentation and Blood Analysis

Rumen liquor samples were collected 3 h post-feeding. pH was measured immediately. Ammonia-N was analyzed using the phenol-hypochlorite method, and volatile fatty acids were determined by gas chromatography. Blood samples were collected before feeding, and serum analyzed for glucose, protein, urea, and cholesterol using commercial diagnostic kits (Biolabo, France).

Quantitative Real-Time PCR (qPCR) Enumeration of Rumen Bacteria

To quantify major ruminal bacterial groups, genomic DNA was extracted from rumen liquor samples using the Qiagen DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen, Germany) following the manufacturer's protocol. The concentrations and purity of DNA was assessed spectrophotometrically at 260/280 nm. An Applied Biosystems StepOnePlus PCR machine equipped with SYBR Green Master Mix (Thermo Fisher Scientific, USA) was used for quantitative real-time PCR (qPCR). Specific primers to 16S rRNA gene were used for total bacteria, *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens* and *Bacillus* spp. Thermal cycling conditions: 95°C for 3 min and 40 cycles of 95°C for 15 s and 60°C for 30 s. Specificity of amplicons was confirmed by melt curve analysis. The relative abundance of bacterial species was obtained by the Livak and Schmittgen method [20] using total 16S rRNA copies as reference. Data were reported as Log₁₀ (copies/mL of rumen fluid).

Economic Evaluation and Statistical Analysis

Feed cost/kg gain was determined using market prices. The net revenue and profitability index were obtained. The data obtained were subjected to one-way ANOVA (SPSS v.26) and the means were compared with Tukey's test ($p < 0.05$).

Results and discussion

Growth Performance

Growth parameters were significantly improved in lambs fed with the addition of synbiotic to their Arabi lamb feed (Table 2). The 3kg/t synbiotic group had the highest ($p < 0.05$) final body weight and average daily gain when compared to the control group. The feed conversion ratio (FCR) is improved by around 25%, which represents improved feed efficiency and utilization of nutrients. However, no significant difference in feed intake indicated that the increased growth was due to more efficient use of nutrients rather than to increased feed intake. The results are consistent with those of other studies demonstrating that use of the synbiotic enhanced the growth rate and FCR of small ruminants [17; 21]. Mechanisms include the colonization of beneficial bacteria like *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecium* that generate enzymes that enhance nutrient breakdown [11]. Furthermore, bacteria in the gut are balanced, meaning there are fewer bad bacteria; this helps maintain integrity of the gut and better absorption of nutrients [1].

Table 2.
Growth performance of Arabi lambs fed synbiotic-supplemented diets (Mean $\pm$ SE)

Parameter	Control	3 kg Synbiotic	5 kg Synbiotic
Initial body weight (kg)	17.25 $\pm$ 0.33 ^a	17.36 $\pm$ 0.41 ^a	17.27 $\pm$ 0.39 ^a
Final body weight (kg)	28.86 $\pm$ 1.55 ^b	33.33 $\pm$ 2.04 ^a	32.44 $\pm$ 1.72 ^{ab}
Total gain (kg)	11.61 $\pm$ 0.42 ^b	15.97 $\pm$ 0.53 ^a	15.17 $\pm$ 0.49 ^{ab}
Average daily gain (g/day)	110.6 $\pm$ 5.2 ^b	152.1 $\pm$ 6.7 ^a	144.5 $\pm$ 6.3 ^{ab}
Dry-matter intake (kg/day)	0.90 $\pm$ 0.04 ^a	0.91 $\pm$ 0.05 ^a	0.92 $\pm$ 0.04 ^a
Feed conversion ratio (kg feed/kg gain)	8.11 $\pm$ 0.38 ^a	5.91 $\pm$ 0.27 ^b	6.34 $\pm$ 0.31 ^b

^{ab}Means within the same row with different superscripts differ significantly ($p < 0.05$)

Nutrient Digestibility

Apparent digestibility of DM, OM, CP, NDF and ADF were significantly ($p < 0.05$) higher in the synbiotic than in the control group (Table 3). The digestibility coefficients were highest for the 3 kg/ton treatment which indicates great-

er microbial activity and rumen fiber degradation. The increase in digestibility of NDF and ADF indicated that synergistic action of the bacteria contributes in an increase in cellulolytic and fibrolytic enzyme activity which led to better use of fibrous part of the diet. A similar increase in digestibility was reported in Awassi lambs by Tabaghdeh et al. who found a (3–5) % increase following probiotic supplementation [21]. This is probably due to increased cellulolytic bacteria in the rumen and stabilization of the pH, improving the fermentation conditions [13]. In accordance, Direkvandi et al. concluded that microbial additives increased both the nitrogen retention and microbial protein synthesis [22], which was in line with the present study where a higher CP digestibility was found.

Table 3.

Apparent nutrient digestibility coefficients (%) (Mean $\pm$ SE)

Parameter	Control	3 kg Synbiotic	5 kg Synbiotic
Dry matter (DM)	71.12 $\pm$ 0.84 ^b	73.98 $\pm$ 0.67 ^a	72.84 $\pm$ 0.76 ^{ab}
Organic matter (OM)	73.04 $\pm$ 0.89 ^b	75.46 $\pm$ 0.72 ^a	74.81 $\pm$ 0.79 ^{ab}
Crude protein (CP)	68.92 $\pm$ 0.77 ^b	71.83 $\pm$ 0.65 ^a	70.66 $\pm$ 0.73 ^{ab}
Neutral detergent fiber (NDF)	58.64 $\pm$ 0.91 ^b	62.87 $\pm$ 0.82 ^a	61.43 $\pm$ 0.84 ^{ab}
Acid detergent fiber (ADF)	55.71 $\pm$ 0.86 ^b	59.66 $\pm$ 0.77 ^a	58.94 $\pm$ 0.81 ^{ab}

^{ab}Means within the same row with different superscripts differ significantly ($p < 0.05$).

Rumen Fermentation Characteristics

The supplementation of synbiotic has positive effects on the rumen fermentation parameters (Table 4). Both synbiotic levels reduced the concentration of ruminal ammonia-N and acetate: propionate ratio, and increased the proportion of propionate as well as total volatile fatty acids (VFA) ($p < 0.05$). The 3 kg/ton treatment resulted in the most even fermentation profile, suggesting optimal microbial efficiency and energy production.

The total VFA and propionate are increased, indicating increased carbohydrate fermentation and more energy available to the host. In ruminants, the primary gluconeogenic substrate is propionate, and an increase in this substrate directly contributes to growth and body weight gain [9; 15]. The lower ammonia-N values can be attributed to improved nitrogen utilization, which may be related to higher microbial protein production and lower deamination of amino acids [11]. The present results corroborate with those of Alagawany et al. who observed the improvement in rumen fermentation balance and the reduction in nitrogen losses in goats and sheep with the use of a synbiotic [1].

Table 4.

Rumen fermentation parameters (Mean $\pm$ SE)

Parameter	Control	3 kg Synbiotic	5 kg Synbiotic
pH	6.52 $\pm$ 0.04 ^a	6.48 $\pm$ 0.03 ^a	6.50 $\pm$ 0.03 ^a
Ammonia-N (mg/dL)	21.8 $\pm$ 0.55 ^a	19.9 $\pm$ 0.48 ^b	20.3 $\pm$ 0.51 ^b
Total VFA (mmol/L)	92.4 $\pm$ 2.6 ^b	105.8 $\pm$ 2.9 ^a	101.7 $\pm$ 2.8 ^{ab}
Acetate (%)	65.1 $\pm$ 1.1 ^a	61.3 $\pm$ 1.0 ^b	62.0 $\pm$ 1.0 ^b
Propionate (%)	21.4 $\pm$ 0.7 ^b	25.9 $\pm$ 0.8 ^a	24.8 $\pm$ 0.8 ^{ab}
Acetate: Propionate	3.04 $\pm$ 0.09 ^a	2.37 $\pm$ 0.08 ^b	2.50 $\pm$ 0.08 ^b

^{ab}Means within the same row with different superscripts differ significantly ($p < 0.05$).

Rumen Bacterial Enumeration

The numbers of the main groups of rumen bacteria differed significantly ($p < 0.05$) between treatments (Table 5 and Figure 1). The 3 kg/ton synbiotic group had the highest counts of total bacteria and significant higher counts of *Fibrobacter succinogenes* and *Ruminococcus flavefaciens* than those of the control group. The number of *Bacillus* spp. also increased significantly in both the supplemented groups, indicating good colonization of probiotics. The microbial density in the 5 kg/ton treatment was similar but reduced compared with that of the 3kg/ton treatment indicating that over supplementation can have no further beneficial effect on microbial density.

Table 5.

Rumen bacterial population ($\log_{10}$ copies/mL, Mean $\pm$ SE)

Bacterial group	Control	3 kg Synbiotic	5 kg Synbiotic
Total bacteria (16S rRNA)	8.52 $\pm$ 0.06 ^b	9.12 $\pm$ 0.05 ^a	8.97 $\pm$ 0.04 ^{ab}
<i>Fibrobacter succinogenes</i>	6.78 $\pm$ 0.07 ^b	7.26 $\pm$ 0.06 ^a	7.12 $\pm$ 0.05 ^{ab}
<i>Ruminococcus flavefaciens</i>	6.55 $\pm$ 0.08 ^b	7.10 $\pm$ 0.07 ^a	6.89 $\pm$ 0.06 ^{ab}
<i>Bacillus</i> spp.	5.84 $\pm$ 0.09 ^b	6.42 $\pm$ 0.07 ^a	6.35 $\pm$ 0.08 ^a

^{ab}Means within the same row with different superscripts differ significantly ($p < 0.05$).

The higher numbers of cellulolytic species (*Fibrobacter succinogenes* and *Ruminococcus flavefaciens*) in the lambs fed the synbiotics suggests improved cellulolytic potential of the rumen. This is consistent with the greater digestibility coefficients that were found in (Table 2). The increase in *Bacillus* spp. count shows the survival and colonization effectiveness of the *Bacillus* spp. probiotics in the rumen, helping to stabilize the rumen ecosystem. This finding was corroborated by Zhou et al., who saw increased fibrolytic bacteria and de-

creased ammonia levels in rumen when probiotic containing *Bacillus* species were fed to sheep [23] and by Nueraihemaiti et al., where feeding of probiotic *Bacillus* species to sheep diets resulted in higher levels of fibrolytic bacteria and lower levels of ruminal ammonia [24]. The present findings indicate that the synbiotic supplementation has the ability to create an optimal balance of microorganisms by promoting a shift towards the growth of beneficial fermentative species, which leads to better use of nutrients and animal performances.

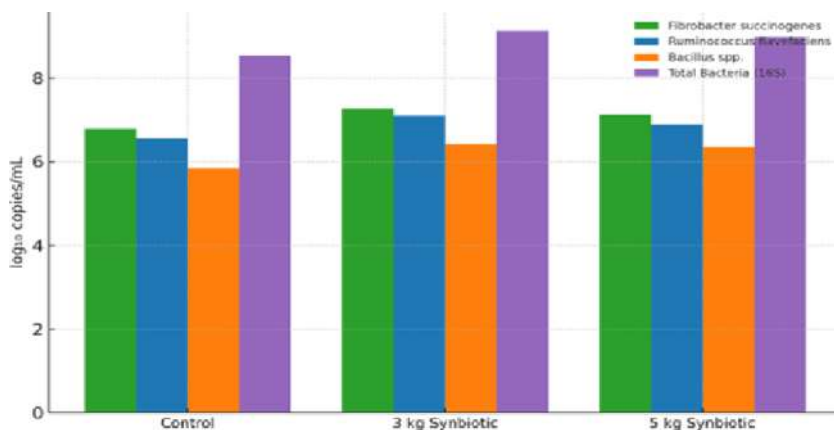


Fig. 1. Rumen bacterial abundance ($\log_{10}$ copies/mL) in Arabi lambs fed control and synbiotic-supplemented diets (3 kg/ton and 5 kg/ton). Bars represent means $\pm$ SE for total bacteria (16S rRNA), *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens*, and *Bacillus* spp

Correlation between production traits and rumen microbial populations

Population, increased total and cellulolytic bacterial counts were positively related to improved growth performance in Arabi lambs (Table, 6). Higher abundance of microorganisms was strongly related ($p < 0.05$) with final body weight ($r \approx 0.72$), total weight gain ($r \approx 0.78$), and average daily gain ($r \approx 0.81$), demonstrating that better microbial activity resulted in greater efficiency in nutrient utilization. In contrast, feed conversion ratio negatively correlated ($r \approx -0.69$) with total bacterial count and confirmed the improved microbial fermentation had decreased feed required per unit gain. Dry-matter intake showed a small non-significant correlation and demonstrated that supplementation of synbiotics mainly increased nutrient digestibility rather than intake volume. These results indicate a strong relationship between rumen microbiota and growth performance in lambs after receiving dietary synbiotics.

Production traits (growth and feed efficiencies) are physiologically associated to rumen micro-organisms as rumen microorganisms mediate fiber degradation, VFA production and nutrient availability. Synbiotic supplementation probably changes microbial composition increasing total and cellulolytic bacteria, which increased feed conversion and daily gain. Therefore, we anticipate positive relationships between microbial counts (e.g., total, cellulolytic bacteria) and traits (final weight, total gain, ADG, digestibility) and negative correlations with FCR.

The positive correlations of rumen microbial communities and growth performance characteristics observed in this study also validate the significant role of rumen microbiota in increasing nutrient utilization efficacy in synbiotic-supplemented lambs. The significant relation between total and cellulolytic bacterial counts and final body weight, total gain, and average daily gain ($r=0.72-0.81$; $p<0.05$) shows that synbiotic supplementation increased the rumen fermentation efficiency and fiber digestion. This is also in agreement with the information obtained from Bettini *et al.*, and Bhogaju *et al.*, which reported that probiotics added to a rumen improved the bacterial diversity and cellulolytic activity and digestibility and performance in sheep and goats [25; 26]. Accordingly, Ban & Guan, and Wang *et al.*, showed that *Ruminococcus albus* and *Fibrobacter succinogenes* population growth also contributed to better volatile fatty acid (VFA) formation and improved feed conversion efficiency among ruminants [27; 28]. A negative and strong relationship with total bacterial count and feed conversion ratio ($r = -0.69$; $p<0.05$) is also found, indicating that high microbial biomass is associated with better nutrient degradation, and energy capture and therefore feed for equivalent unit of gain lessens. Similar results by Chen *et al.*, Li *et al.*, and Saravani *et al.*, established that dietary supplementation with multi-strain probiotics or synbiotics improved microbial protein synthesis in fattening lambs and reduced feed-to-gain ratios [29-31]. Arsène *et al.*, pointed out, however, that the size of the response is limited according to how much of the supplement, and what kind of microorganisms are present, as excess probiotic may disrupt the environment as it can disrupt the balance of microbiologically competent microorganisms on the end-to-end process with poor performance [32]. Taken together, the current results indicate that moderate synbiotic supplementation increases the growth–microbiological interactions by buffering rumen fermentation and promoting cellulolytic bacterial species responsible for the degradation of fiber. These microorganisms also are linked to increased energy supply and better growth, consistent with the mechanistic observation of Morgavi *et al.*, and Liu *et al.*, on effect of beneficial rumen microbes on nutrient turnover and fermentation balance [33; 34].

Table 6.

Correlation coefficients (r) between production traits and rumen microbial populations in Arabi lambs

Parameter	Total Bacteria ($\times 10^9$ CFU/ml)	Cellulolytic Bacteria ($\times 10^7$ CFU/ml)
Final body weight (kg)	0.72*	0.68*
Total gain (kg)	0.78**	0.73**
Average daily gain (g/day)	0.81**	0.75**
Dry matter intake (kg/day)	0.32 (NS)	0.29 (NS)
Feed conversion ratio	-0.69*	-0.63*

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; NS = non-significant

Blood Metabolites

The synbiotic-supplemented groups exhibited significantly higher ($p < 0.05$) serum glucose and total protein, with lower urea and cholesterol levels compared to the control (Table 7). These results suggest improved energy metabolism, protein synthesis, and reduced nitrogen excretion. The higher glucose concentration is consistent with the elevated ruminal propionate levels, providing more precursors for gluconeogenesis. Similarly, the increase in serum protein reflects improved dietary protein utilization and hepatic synthesis. The decrease in serum urea supports efficient nitrogen retention, while the reduction in cholesterol indicates improved lipid metabolism and possibly lower oxidative stress. Similar patterns were reported by Elliethy *et al.*, and Saravani *et al.*, who observed enhanced metabolic health in lambs fed probiotics [17; 31]. Direkvandi *et al.*, also reported lower plasma urea nitrogen concentrations with microbial additives, suggesting better synchronization between energy and nitrogen availability for microbial protein synthesis [22]. The results further agree with Yue *et al.*, who concluded that synbiotics modulate ruminal microbiota, improving overall host metabolism and immunity [11].

Table 7.

Serum biochemical indices (Mean $\pm$ SE)

Parameter	Control	3 kg Synbiotic	5 kg Synbiotic
Glucose (mg/dL)	61.2 $\pm$ 1.5 ^b	70.4 $\pm$ 1.7 ^a	68.8 $\pm$ 1.6 ^{ab}
Total protein (g/dL)	6.23 $\pm$ 0.11 ^b	6.85 $\pm$ 0.13 ^a	6.74 $\pm$ 0.12 ^{ab}
Albumin (g/dL)	3.41 $\pm$ 0.09 ^a	3.52 $\pm$ 0.08 ^a	3.49 $\pm$ 0.09 ^a
Urea (mg/dL)	34.8 $\pm$ 1.2 ^a	30.2 $\pm$ 1.1 ^b	31.0 $\pm$ 1.1 ^b
Cholesterol (mg/dL)	87.4 $\pm$ 2.1 ^a	78.6 $\pm$ 1.8 ^b	80.1 $\pm$ 1.9 ^b

^{ab}Means within the same row with different superscripts differ significantly ($p < 0.05$).

Correlation of blood metabolite and rumen microbiota

The ruminant microbiota correlated with blood biochemical indices confirmed the metabolic association between the microbiota and the systemic nutrient metabolism of Arabi lambs (Table 8). Positive correlations of glucose and total protein with total and cellulolytic bacterial count indicate that increased microbial fermentation facilitated the generation of volatile fatty acid, especially propionate, the primary gluconeogenic precursor in ruminants [23].

Again, greater microbial protein synthesis most likely led to greater circulating protein content, in line with the study by Bettini *et al.*, and Mani *et al.*, who demonstrated better nitrogen retention and blood protein profiles in synbiotic-fed small ruminants [25; 35]. This inverse correlation of rumen microbial diversity with urea and cholesterol concentrations highlights that nutrients are more efficiently utilized as a substrate and lipid mobilization decreases, indicating a more advantageous energy balance and liver function in symbiotically enriched ruminants. Similar decreases in serum urea and cholesterol were also detected by Trukhachev *et al.*, and Firouzi & Haghghatdoost, after probiotic supplementation in sheep and goats [36; 37].

The weak but non-significant increase in albumin suggests stable hepatic protein turnover, implying that the improved metabolic status did not impose physiological stress on the animals. Collectively, the results show that synbiotic-induced modulation of rumen microbiota enables metabolic efficiency and thus general physiological stability in growing lambs.

Table 8.

Correlation coefficients (r) between rumen microbial populations and blood biochemical parameters in Arabi lambs

Blood Parameter	Total Bacteria ($\times 10^9$ CFU/ml)	Cellulolytic Bacteria ($\times 10^7$ CFU/ml)
Glucose (mg/dL)	0.72*	0.68*
Total Protein (g/dL)	0.66*	0.64*
Albumin (g/dL)	0.33 (NS)	0.29 (NS)
Urea (mg/dL)	-0.58*	-0.55*
Cholesterol (mg/dL)	-0.61*	-0.59*

* $p < 0.05$; NS = non-significant

Economic Efficiency

The economic evaluation showed that the synbiotic supplementation at 3 kg/ton feed resulted in 26% decrease in the feed cost/ kg gain which was higher than the control feed (Table 9). The total revenue and the net profit were

highest with the group of 3 kg/ton which had a higher profitability index of 12.8%. This improvement is due to better growth rate and feed efficiency that decreased feed cost per unit gain. Mao et al., and Saleem et al., also reported similar economic benefits with the use of probiotic and synbiotic inclusion in small ruminant production systems and emphasized the economic feasibility of microbial additives in small ruminant production systems [8; 14]. The benefit of biogenic efficiency and economic sustainability of livestock production through synbiotic supplementation is especially important for the livestock production system in the context of southern Iraq, which is a semi-arid area.

Table 9.

Economic efficiency of Arabi lambs fed synbiotic-supplemented diets

Parameter	Control	3 kg Synbiotic	5 kg Synbiotic
Feed cost (USD/kg feed)	0.35	0.36	0.36
Feed cost per kg gain (USD)	2.84	2.11	2.28
Total revenue per lamb (USD)	94.2	112.5	108.3
Net profit (USD)	23.1	38.4	33.7
Profit index (%)	100	112.8	110.4

Conclusion

The current study showed that dietary supplementation with synbiotics significantly increased growth performance and nutrient utilization of Arabi lambs raised in Basrah field conditions. Supplementation of the basal diet with 3 kg/ton and 5 kg/ton synbiotic significantly increased final body weight, average daily gain, and apparent nutrient digestibility in comparison with the untreated control group. The maximum efficiency is obtained with 3 kg/ton, which indicates a higher feed conversion efficiency and relatively more digestible dry matter, crude protein, and fiber fractions (ADF and NDF) as well as moderate feed intake levels. Such an improvement is probably linked to the synergistic effects of probiotic cultures (*Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, and *Enterococcus faecium*) and their metabolic products, which can improve rumen microorganisms balance, enzymatic activity, and nutrient availability. Overall, moderate synbiotic addition (3 kg/ton feed) should be suggested as a feasible and environmentally friendly feeding practice for improved feed utilization and productivity of Arabi lambs without compromising intake and health status in general. The long-term effects on rumen fermentation dynamics and carcass quality in different management conditions should also be tested in more cases.

Ethics committee conclusion. The study was performed at College of Veterinary Medicine, University of Basra, with the ethical approval number (EA/VM 35/04-25-2024).

Conflict of interest information. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. The authors thank the College of Agriculture, University of Basrah, for technical and logistical support.

References

1. Alagawany, M., Hegazy, M. I., Farag, M. R., El-Shall, N. A., Sallam, S. M., & Dharma, K. (2025). Probiotics, prebiotics, and synbiotics in animal and poultry nutrition. In M. Alagawany, S. M. Sallam, & M. E. Abd El-hack (Eds.), *Organic feed additives for livestock* (1st ed., pp. 17–41). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13510-1.00002-5>
2. González-Herrera, S. M., Bermúdez-Quñones, G., Ochoa-Martínez, L. A., Rutia-ga-Quñones, O. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021). Synbiotics: A technological approach in food applications. *Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 811–824. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04532-0>. EDN: <https://elibrary.ru/XWOTYG>
3. Kumar, A., Dhiman, S., Krishan, B., Samtiya, M., Kumari, A., Pathak, N., & Dhe-wa, T. (2024). Microbial enzymes and major applications in the food industry: A concise review. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1), 85. <https://doi.org/10.1186/s43014-024-00261-5>. EDN: <https://elibrary.ru/XUXQQR>
4. Reuter, G. (2001). The Lactobacillus and Bifidobacterium microflora of the human intestine: Composition and succession. *Current Issues in Intestinal Microbiology*, 2(2), 43–53.
5. Dahiya, D., & Nigam, P. S. (2022). Probiotics, prebiotics, synbiotics, and fermented foods as potential biotics in nutrition improving health via microbiome-gut-brain axis. *Fermentation*, 8(7), 303. <https://doi.org/10.3390/fermentation8070303>. EDN: <https://elibrary.ru/OSZJJR>
6. Habteweld, H. A., & Asfaw, T. (2023). Novel dietary approach with probiotics, prebiotics, and synbiotics to mitigate antimicrobial resistance and subsequent out market-place of antimicrobial agents: A review. *Infection and Drug Resistance*, 3191–3211. <https://doi.org/10.2147/IDR.S413416>. EDN: <https://elibrary.ru/YIHLEQ>
7. Bajagai, Y. S., Klieve, A. V., Dart, P. J., & Bryden, W. L. (2016). *Probiotics in animal nutrition*. FAO.
8. Mao, H., Ji, W., Yun, Y., Zhang, Y., Li, Z., & Wang, C. (2023). Influence of probiotic supplementation on the growth performance, plasma variables, and ruminal bacterial community of growth-retarded lamb. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1216534. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1216534>. EDN: <https://elibrary.ru/LGOCNZ>

9. Sharma, A. N., Chaudhary, P., Kumar, S., Grover, C. R., & Mondal, G. (2023). Effect of synbiotics on growth performance, gut health, and immunity status in pre-ruminant buffalo calves. *Scientific Reports*, 13(1), 10184. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37002-6>. EDN: <https://elibrary.ru/KJXKPG>
10. Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., & Sanders, M. E. (2014). Activity of cecropin P1 and FA-LL-37 against urogenital microflora. *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology*, 11(8), 506. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66>
11. Yue, T., Lu, Y., Ding, W., Xu, B., Zhang, C., Li, L., Jian, F., & Huang, S. (2025). The role of probiotics, prebiotics, synbiotics, and postbiotics in livestock and poultry gut health: A review. *Metabolites*, 15(7), 478. <https://doi.org/10.3390/metabo15070478>. EDN: <https://elibrary.ru/MHWPBO>
12. Zayed, M., Abd El-Fattah, D., Abbas, R., El-Bordeny, N., & Edris, S. (2023). The potential efficiency of *Lactobacillus farraginis* isolated from ruminants with a view to be used as animal probiotics. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 31(1), 29–40. <https://doi.org/10.21608/ajs.2022.155161.1489>
13. Saha, S., Fukuyama, K., Debnath, M., Namai, F., Nishiyama, K., & Kitazawa, H. (2023). Recent advances in the use of probiotics to improve meat quality of small ruminants: A review. *Microorganisms*, 11(7), 1652. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071652>. EDN: <https://elibrary.ru/RUCMLZ>
14. Saleem, A. S. A., Abdelnour, S., Bassiony, S. M., Abdel-Monem, U. M., Elaref, M. Y., & Al-Marakby, K. M. (2025). Probiotic supplementation in sustainable sheep production: Impacts on health, performance, and methane mitigation. *Tropical Animal Health and Production*, 57(4), 206. <https://doi.org/10.1007/s11250-025-04439-y>. EDN: <https://elibrary.ru/QWQQGL>
15. Wang, L., Li, M., Liu, C., Li, X., Wang, P., Chang, J., Jin, S., Yin, Q., Zhu, Q., Dang, X., & Lu, F. (2025). Effects of fungal probiotics on rumen fermentation and microbiota in Angus cattle. *Animals*, 15(18), 2746. <https://doi.org/10.3390/ani15182746>. EDN: <https://elibrary.ru/YHTMMU>
16. Tomazetto, G., Pimentel, A., Wibberg, D., Dixon, N., & Squina, F. M. (2020). Multi-omic directed discovery of cellulosomes, polysaccharide utilization loci, and lignocellulases from an enriched rumen anaerobic consortium. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(17), e00199-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.00199-20>. EDN: <https://elibrary.ru/PWHSEP>
17. Elliethy, M., Abdel Fattah, M., & Marwan, A. (2022). Influence of prebiotic, probiotic and synbiotic supplementation on digestibility, haemobiochemical profile and productive performance in Barki lambs. *Egyptian Journal of Nutrition and Feeds*, 25(2), 199–210. <https://doi.org/10.21608/ejnf.2022.256903>. EDN: <https://elibrary.ru/POJVMQ>

18. Shoukry, M. M., El-Nomeary, Y. A. A. E., Salman, F. M., & Shakweer, W. M. E. (2023). Improving the productive performance of growing lambs using prebiotic and probiotic as growth promoters. *Tropical Animal Health and Production*, 55(6), 375. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03752-8>. EDN: <https://elibrary.ru/YEFQLS>
19. AOAC. (2016). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (20th ed.). AOAC Inc.
20. Livak, K. J., & Schmittgen, T. D. (2001). Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. *Methods*, 25(4), 402–408. <https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262>
21. Tabaghdeh, R. A., Bahari, M., & Sadeghi, M. R. (2020). The effect of different levels of Biomin®IMBO synbiotic supplement in diet on growth performance, apparent digestibility nutrients and some blood parameters fattening Zell lambs. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 8(3), 13–28. <https://doi.org/10.22069/ejrr.2020.18009.1747>
22. Direkvandi, E., Mohammadabadi, T., & Salem, A. Z. M. (2020). Effect of microbial feed additives on growth performance, microbial protein synthesis, and rumen microbial population in growing lambs. *Translational Animal Science*, 4(4), txaa203. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa203>. EDN: <https://elibrary.ru/DSKELA>
23. Zhou, X., Xiang, W., & Shen, X. (2025). *Bacillus subtilis* LN077 as a probiotic feed additive improves goat growth, immunity, and rumen health. *Probiotics & Antimicro. Prot.* <https://doi.org/10.1007/s12602-025-10809-7>. EDN: <https://elibrary.ru/TEEXQX>
24. Nueraihemaiti, G., Huo, X., Zhang, H., Shi, H., Gao, Y., Zeng, J., Lin, Q., & Lou, K. (2025). Effect of diet supplementation with two yeast cultures on rumen fermentation parameters and microbiota of fattening sheep *in vitro*. *Microorganisms*, 13(3), 550. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13030550>. EDN: <https://elibrary.ru/OKB-WQD>
25. Bettini, S., Perini, F., Colombi, D., Ghilardi, M., Trabalza-Marinucci, M., & Lasagna, E. (2025). Assessing the impact of biotics on the ruminal microbiome to enhance sustainability, welfare, and performance in beef cattle: Highlighting the omics approach. *Italian Journal of Animal Science*, 24(1), 660–676. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2025.2465703>. EDN: <https://elibrary.ru/YHJJRW>
26. Bhogoju, S., & Nahashon, S. (2022). Recent advances in probiotic application in animal health and nutrition: A review. *Agriculture*, 12(2), 304. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020304>. EDN: <https://elibrary.ru/XLYEBA>
27. Ban, Y., & Guan, L. L. (2021). Implication and challenges of direct-fed microbial supplementation to improve ruminant production and health. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12, 109. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00630-x>. EDN: <https://elibrary.ru/MBOLPH>

28. Wang, L., Lv, Z., Ning, X., Yue, Z., Wang, P., Liu, C., & Chang, J. (2024). The effects of compound probiotics on production performance, rumen fermentation and microbiota of Hu sheep. *Frontiers in Veterinary Science*, *11*, 1440432. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1440432>. EDN: <https://elibrary.ru/JEGHAZ>
29. Chen, J., Wang, S., Yin, X., Duan, C., Li, J., Liu, Y., & Zhang, Y. (2024). Dynamic changes in the nutrient digestibility, rumen fermentation, serum parameters of perinatal ewes and their relationship with rumen microbiota. *Animals*, *14*(16), 2344. <https://doi.org/10.3390/ani14162344>. EDN: <https://elibrary.ru/LLBBSI>
30. Li, Z., Hu, Y., Li, H., Lin, Y., Cheng, M., Zhu, F., & Guo, Y. (2024). Effects of yeast culture supplementation on milk yield, rumen fermentation, metabolism, and bacterial composition in dairy goats. *Frontiers in Veterinary Science*, *11*, 1447238. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1447238>. EDN: <https://elibrary.ru/VFELJF>
31. Saravani, M., Hajipour, M., Khorshidi, K., Mousavi Kashani, S., & Shoorang, P. (2025). Effect of prebiotic, synbiotic and phytobiotic supplements on performance, digestibility and blood parameters of lambs. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, *76*(1), 8855–8864. <https://doi.org/10.12681/jhvms.38127>. EDN: <https://elibrary.ru/MMGNBW>
32. Arsène, M. M. J., Davares, A. K. L., Andreevna, S. L., Vladimirovich, E. A., Carime, B. Z., Marouf, R., & Khelifi, I. (2021). The use of probiotics in animal feeding for safe production and as potential alternatives to antibiotics. *Veterinary World*, *14*(2), 319–328. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.319-328>. EDN: <https://elibrary.ru/IOHIYX>
33. Morgavi, D. P., Rathahao-Paris, E., Popova, M., Boccard, J., Nielsen, K. F., & Boudra, H. (2015). Rumen microbial communities influence metabolic phenotypes in lambs. *Frontiers in Microbiology*, *6*, 1060. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01060>
34. Liu, K., Zhang, Y., Yu, Z., Xu, Q., Zheng, N., Zhao, S., & Wang, J. (2021). Ruminal microbiota-host interaction and its effect on nutrient metabolism. *Animal Nutrition*, *7*(1), 49–55. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18005>. EDN: <https://elibrary.ru/HERBYR>
35. Mani, S., Aiyegoro, O., & Adeleke, M. (2022). Effects of direct-fed lactic acid bacteria on weight gain and ruminal pH of two South African sheep breeds. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, *21*(9), 18676–18693.
36. Trukhachev, V. I., Buryakov, N. P., Shapovalov, S. O., Shvydkov, A. N., Buryakova, M. A., Khardik, I. V., & Aleshin, D. E. (2022). Impact of inclusion of multicomponent synbiotic in Russian Holstein dairy cow's rations on milk yield, rumen fermentation, and some blood biochemical parameters. *Frontiers in Veterinary Science*, *9*, 884177. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.884177>. EDN: <https://elibrary.ru/AEIPAZ>
37. Firouzi, S., & Haghighatdoost, F. (2018). The effects of prebiotic, probiotic, and synbiotic supplementation on blood parameters of renal function: A systematic review and meta-analysis of clinical trials. *Nutrition*, *51*, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2018.01.007>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Jinan Abdul Aziz Bannai, PhD, Prof.

*College of Veterinary Medicine, University of Basrah
Basrah, Iraq
jenan.banna@uobasrah.edu.iq
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8713-0921>*

Abass Nasser Khalaf, MSc., Assist. Prof.

*Maysan Education Directorate, Ministry of Education
Amarah, Iraq
husseinalihasan526@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9043-2937>*

Hanaa Ali Jabar Al-Galbi, PhD, Prof.

*College of Agriculture, University of Basrah
Basrah, Iraq
hanaa.jaba@uobasrah.edu.iq
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1568-4463>*

Aymen Abdulaali Almayyahi, PhD, Prof.

*Management Technical College, Southern Technical University
Basrah, Iraq
aymen.abdulali@stu.edu.iq
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7086-9711>*

Поступила 26.10.2025

После рецензирования 26.12.2025

Принята 26.02.2026

Received 26.10.2025

Revised 26.12.2025

Accepted 26.02.2026

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1593](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1593)

EDN: [ARRIXZ](https://edn.sci.org/ARRIXZ)

UDC 618.3-008.6+616-074



Level of CTLA-4 and some other future markers for predicting preeclampsia in pregnant women: a correlation study

R.A. Abdualhay, A.J.M. Al-Fartosy

College of Science, University of Basrah, Basrah, Iraq

Abstract

Background. Preeclampsia (PE) is a dangerous complication of pregnancy and still a major cause of maternal-fetal morbidity and mortality.

Purpose. Evaluate the correlation of CTLA-4 with serum biomarkers of angiogenic factors, oxidative stress, and endothelial dysfunction in preeclamptic pregnant women.

Methodology. The study included 120 pregnant women diagnosed with preeclampsia (PE), as well as 46 healthy pregnant women. We measured their serum levels of NO, eNOS, MDA, ADMA, sENG, sFlt-1, T-AOC, and CTLA-4.

Results. Our findings indicated significant ($p < 0.01$) positive correlations between CTLA-4 and NO, eNOS, and T-AOC ($r = 0.723$ vs. $r = 0.597$; $r = 0.557$ vs. $r = 0.580$; and $r = 0.577$ vs. $r = 0.791$, respectively). On the other hand, CTLA-4 exhibited a significant negative correlation ($r = 0.728$ vs. $r = 0.710$; $r = 0.722$ vs. $r = 0.632$; $r = 0.636$ vs. $r = 0.655$; and $r = 0.790$ vs. $r = 0.717$, respectively) in EOP and LOP patients. According to the area under the receiver operating characteristics (ROC) curve (AUC) findings, CTLA-4 and sFlt-1 may be more effective predictors in early- (AUC = -1.00 and 0.98, respectively) and late-onset preeclampsia (AUC = -1.00 and 1.00, respectively) than other biomarkers and antioxidants such as NO, sENG, eNOS, ADMA, MDA, and T-AOC.

Conclusion. CTLA-4 with biomarkers of angiogenic factors, oxidative stress, and endothelial dysfunction was not significantly different in EOP and LOP patients, which may cast new light on the possible role as an etiological cause of PE and might be a better monitoring index in women with PE.

Keywords: preeclampsia; CTLA-4; oxidative stress; angiogenic factors; endothelial dysfunction

For citation. Abdualhay R. A., & Al-Fartosy, A. J. M. (2026). Level of CTLA-4 and some other future markers for predicting preeclampsia in pregnant women: a correlation study. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 28–44. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1593>

Introduction

Preeclampsia (PE) affects 5–10% of pregnancies and is a major source of morbidity and mortality for both the mother and the fetus [1]. PE is defined by gestational hypertension in pregnancies with one or more of the following conditions identified after 20 or more weeks of gestation: proteinuria, acute renal injury, liver dysfunction, hematologic abnormalities, neurologic features, and placental dysfunction [2]. In approximately 15% pregnancies, PE results in iatrogenic preterm birth, and the only treatment available for PE is still delivery [3]. The underlying reason for PE remains unknown. The placenta's initial implantation is believed to mark the start of the issue. The placenta's oxidative damage leads to apoptosis, inflammation, and the release of cytokines and anti-angiogenic substances into the mother's bloodstream. The primary cause of PE pathophysiology is endothelial dysfunction, triggered by these chemicals from the placenta that enter the mother's circulation [4].

The physiological oxidative stress that occurs in the early stages of pregnancy, before the start of fetomaternal circulation, has also been shown to promote normal cell differentiation and cytotrophoblast proliferation [5]. Studies assessing the levels of several biomarkers in pregnancy problems, including PE, intrauterine growth retardation, hyperemesis gravidarum, and gestational diabetes, have been published in the literature. Studies on the biochemical markers for the early diagnosis of PE have been ongoing because it is still a significant obstetric problem [6]. In order to have a better knowledge of the pathophysiological mechanisms causing preeclampsia that contribute to the genesis of PE, it may be helpful to investigate serum indicators. This study aims to examine the relationship between CTLA-4 and a group of biochemical indicators, including NO, eNOS, MDA, ADMA, sENG, sFlt-1, and T-AOC, and to compare the levels of these indicators in patients with pregnancy-related complications to those in healthy pregnant women.

Materials and methods

Study Design and Subjects Recruitment

This study was a case-control clinical trial. Samples were collected from Basrah Hospital for Obstetrics and Children in Basra, Iraq, from October 2024 to April

2025. In addition, some samples were also obtained from a private clinic run by Dr. Fatima Hashem Makhour in Abu-Al-Khaseeb General Hospital. A total of 120 subjects aged between 20 and 40 years were included in the study. The participants were divided into two groups. Group I consisted of 74 patients, who had a blood pressure of 140 mmHg/90 mmHg or higher: 34 with early-onset preeclampsia, occurring between 28 and 32 weeks (EOP), and 40 with late-onset preeclampsia, occurring between 32 and 40 weeks (LOP), all of whom had been diagnosed with PE according to the International Society for the Study of Hypertension in Pregnancy guidelines [7]. Group II (46 normotensive pregnant women) of comparable age were recruited: 20 women at (28-32 weeks) and 26 women at (32.1-40 weeks) of gestation. We did not include pregnant women with a history of twin pregnancies. Additionally excluded were women who appeared to have a history of diabetes, ischemic heart disease, anemia, inflammatory bowel disease, chronic hypertension, smoking, renal disease, arthritis, or any other chronic inflammatory disease.

Samples Collection

A 5 mL fasting venous blood sample was drawn from the vein of the forearm of all the participants into a gel tube, then moved into a centrifuge at 402 x g for 20 minutes to obtain the serum. The collected serum was immediately utilized in the estimation of variables in this study, while the rest were stored in a plain tube deep freezing at -70 °C until used.

Biochemical Quantification

The following procedures were used to analyze blood samples for biochemical parameters: BMI was calculated as the following formula [$BMI (kg/m^2) = Wt \text{ in kg}/Ht \text{ in } m^2$] [7]. MDA level was determined using the (Cat No. E1371Hu, BT-Lab, Shanghai, China) kit, which was a solid-phase enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) based on the sandwich principle. Serum eNOS was quantified by kit (Cat No. E0908Hu, BT-Lab), NO was estimated by kit (Cat No. E1510Hu, BT-Lab), ADMA was estimated by kit (Cat No. E1887Hu, BT-Lab), and sENG was estimated by kit (Cat No. E0316Hu, BT-Lab). sFlt-1 was assessed by a kit (Cat No. E4049Hu, BT-Lab). CTLA-4 was measured using a kit (Cat No. E0277Hu, BT-Lab). T-AOC was evaluated using a colorimetric antioxidant capacity assay by kit (Cat No. SH0242, BT-Lab).

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using SPSS 26.0 (IBM Corporation, Armonk, NY, USA) and GraphPad Prism 10.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA). The data were normally distributed, and Dunnett's t-test was used to determine statistical significance after the analysis of variance was used to compare the groups. Sensitivities and specificities, together with the 95% con-

fidence interval, were computed using the receiver operating characteristics (ROC) curve, which is created by plotting sensitivity (y-axis) against 1-specificity (x-axis) and computing the area under the ROC curve (AUC). Pearson correlation was used to find correlations. An AUC value close to 0 (or 1) indicates a strong diagnostic value; in this case, the values of one group were primarily higher (or lower) than the values of the comparison group. A ($p<0.05$) was deemed statistically significant, a ($p<0.01$) extremely significant.

Results

In both early-onset and late-onset PE, there were no significant differences in age, gestational age, or BMI between PE patients and the healthy control group. In early-onset PE, the mean age of the PE individuals was 31.00 ± 7.14 vs. 29.09 ± 6.33 , and in late-onset PE, it was 27.45 ± 6.20 vs. 26.73 ± 5.5 . (Table 1) summarizes all the participants' and controls' baseline characteristics. (Table 2 & Figure 1) showed that whereas CTLA-4, NO, eNOS, and T-AOC were significantly lower than those of healthy controls, participants with PE had greater levels of SBP, DBP, MDA, ADMA, sENG, and sFlt-1 in early- and late-onset pregnancy ($p<0.01$).

Table 1.

The demographic characteristics of the subjects (n=120)

The characteristics		Preeclampsia Patients		Healthy Control	
		early-onset	late-onset	early-onset	late-onset
Total subject No.		34	40	20	26
Age (Years) (Mean $\pm$ SD)		31.00 ± 7.14	27.45 ± 6.20	29.09 ± 6.33	25.64 ± 5.50
Pregnant age weeks (Mean $\pm$ SD)		30.18 ± 1.50	36.73 ± 1.72	30.14 ± 1.58	36.73 ± 1.72
Duration (Years) (Mean $\pm$ SD)		0.39 ± 0.02	0.59 ± 0.03	-	-
Demographic Area	Urban	25	35	17	22
	Rural	9	5	3	4
Educational Background	Learned	30	37	18	25
	Illiterate	4	3	2	1
Smoking Habits	Positive	0	0	0	0
	Negative	34	40	20	26
Food Habits	Vegetarian	1	2	1	2
	Non -Vegetarian	33	38	19	24

Employment Status	Em- ployed	31	36	18	23
	Non-Em- ployed	3	4	2	3

early-onset: (28-32 weeks) of gestation; **late-onset** : (32-40 weeks) of gestation

Table 2.

The levels of all parameters measured in the serum of preeclampsia patients and healthy control

Variables	(Mean $\pm$ SD)			
	Preeclampsia Patients		Healthy Control	
	early-onset	late-onset	early-onset	late-onset
BMI (kg/m ²)	28.97 $\pm$ 3.48	29.30 $\pm$ 3.93	29.61 $\pm$ 4.08	29.78 $\pm$ 4.16
SBP (mmHg)	154.32 $\pm$ 18.1**	159.32 $\pm$ 18.3**	119.09 $\pm$ 6.5	120.00 $\pm$ 7.8
DBP (mmHg)	88.18 $\pm$ 5.9**	96.14 $\pm$ 8.6**	77.27 $\pm$ 4.8	77.73 $\pm$ 5.5
ADMA (ng/ l)	2630 $\pm$ 1087 **	2278 $\pm$ 943 **	1160 $\pm$ 313	1470 $\pm$ 398
NO (umol/ L)	107.67 $\pm$ 14.21 **	133.37 $\pm$ 10.75 **	163.38 $\pm$ 40.69	181.99 $\pm$ 52.54
eNOS (U/ mL)	25.31 $\pm$ 6.03 **	25.95 $\pm$ 6.77 **	43.54 $\pm$ 12.83	44.87 $\pm$ 16.77
MDA (nmol/mL)	22.14 $\pm$ 10.84 **	24.00 $\pm$ 10.07 **	13.70 $\pm$ 2.5	16.04 $\pm$ 2.90
sENG (ng/ mL)	82.25 $\pm$ 16.43**	81.28 $\pm$ 19.13 **	52.26 $\pm$ 11.12	55.44 $\pm$ 10.32
sftt-1 (mIU/ L)	11.60 $\pm$ 2.77 **	14.03 $\pm$ 5.22 **	3.25 $\pm$ 0.93	3.40 $\pm$ 0.57
T-AOC (mmol/ L)	0.95 $\pm$ 0.26 **	0.95 $\pm$ 0.22 **	1.71 $\pm$ 0.35	1.87 $\pm$ 0.34
CTLA-4 (ng/ mL)	12.62 $\pm$ 3.28 **	12.68 $\pm$ 3.01 **	36.67 $\pm$ 5.69	32.44 $\pm$ 7.33

Data are presented as mean $\pm$ SD, SD: Standard Deviation, p-value: NS: Non-Significant ($p > 0.05$), S: Significant ($*p < 0.05$), and HS: Highly Significant ($**p < 0.01$) indicate the level of significance in comparison with the corresponding control value.

The obtained AUC results indicated that CTLA-4 and sftt-1 could potentially be used as greater predictive biomarkers in early- (AUC = -1.00 and 0.98, respectively) and late-onset preeclampsia (AUC = -1.00 and 1.00, respectively). Also, other biomarkers and antioxidants such as NO, sENG, eNOS, ADMA, MDA, and T-AOC could not be used as predictive biomarkers in pregnant women in the early- (AUC = -0.97, 0.97, -0.92, 0.825, 1.00, and -0.95, respectively) as well as late-onset preeclampsia (AUC = -0.92, 0.91, -0.85, 0.96, 1.00, and -0.98, respectively), as illustrated in (Table 3 & Figure 2).

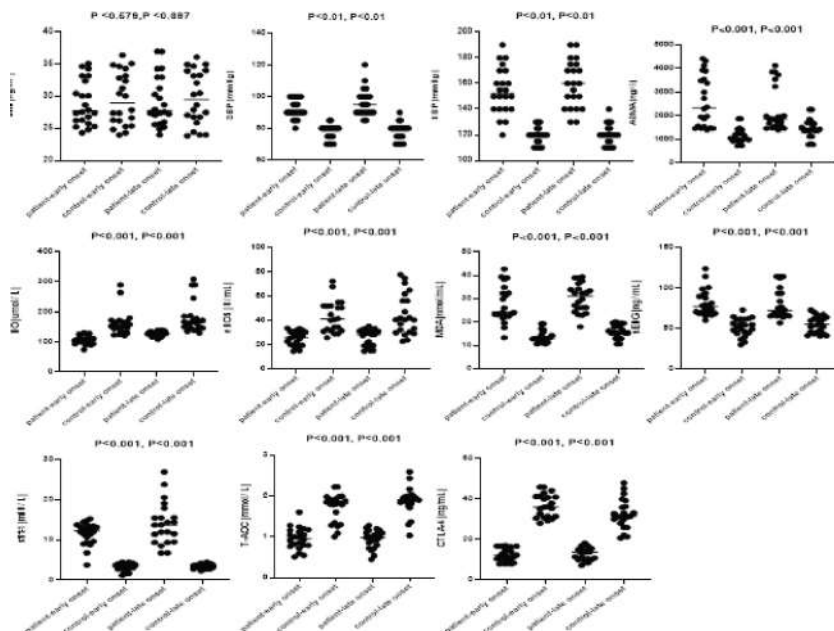
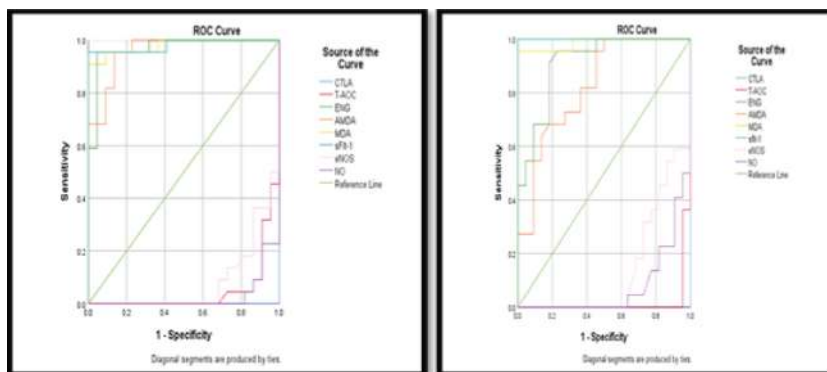


Fig. 1. Comparison of BMI, DBP, SBP, ADMA, NO, eNOS, MDA, sENG, sFlt-1, T-AOC, and CTLA-4 levels between early-onset (28-32 weeks) and late-onset (32-40 weeks) pre-eclampsia patients and healthy control



A: early-onset PE (28-32 weeks) **B:** late-onset PE (32-40 weeks)

Fig. 2. The ROC curve for serum CTLA-4, NO, eNOS, MDA, ADMA, sENG, sFlt-1, and T-AOC levels in early- and late-onset preeclampsia patients. A: early-onset PE (28-32 weeks); B: late-onset PE (32-40 weeks)

Table 3.

**ROC and AUC analysis of the measured biomarkers for the diagnosis
of preeclampsia patients in early- and late-onset PE**

Variables	PE	Cut-off concentration	Sensitivity %	Specificity %	AUC	95% CI of AUC	P-value
CTLA-4 (ng/mL)	early-onset PE	16.79	100	95.5	-1.00	1.00-1.00	<0.01
	late-onset PE	19.46	100	100	-1.00	1.00-1.00	<0.01
sflt-1 (mIU/l)	early-onset PE	6.67	95.5	100	0.98	0.95-1.00	<0.01
	late-onset PE	5.63	100	100	1.00	1.00-1.00	<0.01
MDA (nmol/mL)	early-onset PE	19.49	90.9	100	0.98	0.95-1.00	<0.01
	late-onset PE	21.64	95	100	0.99	0.95-1.00	<0.01
T-AOC (mmol/l)	early-onset PE	1.24	90.9	90.9	-0.95	0.90-1.00	<0.01
	late-onset PE	1.29	95.5	100	-0.98	0.95-1.00	<0.01
NO (umol/l)	early-onset PE	126.28	90.9	90.9	-0.97	0.94-1.00	<0.01
	late-onset PE	148.88	95.9	73.0	-0.92	0.85-1.00	<0.01
sENG (ng/mL)	early-onset PE	65.60	95.5	95.5	0.97	0.92-1.00	<0.01
	late-onset PE	63.51	95.5	77.3	0.91	0.82-0.99	<0.01
ADMA (ng/l)	early-onset PE	1726.87	68.2	81.8	0.825	0.70-0.94	<0.01
	late-onset PE	1448.75	95.5	86.4	0.96	0.91-1.00	<0.01
eNOS (U/mL)	early-onset PE	31.21	86.4	81.8	-0.92	0.84-0.99	<0.01
	late-onset PE	36.34	65	100	-0.85	0.75-0.97	<0.01

(Table 4) and (Figure 2) showed that the correlations between CTLA-4 and NO, eNOS, and T-AOC were positive ($p<0.01$) and highly significant ($r=0.723$ vs. $r=0.597$; $r=0.557$ vs. $r=0.580$; and $r=0.577$ vs. $r=0.791$, respectively). Additionally, CTLA-4 showed a highly significant negative ($p<0.01$) correlation with MDA, ADMA, sENG, sFlt-1 ($r=0.728$ vs. $r=0.710$; $r=0.722$ vs. $r=0.632$; $r=0.636$ vs. $r=0.655$; and $r=0.790$ vs. $r=0.717$, respectively), in early- and late-onset preeclampsia.

Table 4.

**Correlation coefficient of CTLA-4 vs. other clinical parameters
in early-onset and late-onset preeclampsia patients**

The correlation of CTLA-4 vs. other variables	Correlation coefficient (r)	
	early-onset PE (28-32 weeks)	late-onset PE (32-40 weeks)
BMI (kg/m²)	-0.066	-0.006
SBP (mmHg)	-0.744**	-0.700**
DBP (mmHg)	-0.766**	-0.743**
ADMA (ng/ L)	-0.722**	-0.632**
NO (umol/ L)	0.732**	0.597**
eNOS (U/ mL)	0.557**	0.580**

MDA (nmol/mL)	-0.728**	-0.710**
sENG (ng/ mL)	-0.636**	-0.655**
sflt-1 (mIU/ L)	-0.790**	-0.717**
T-AOC (mmol/ L)	0.577**	0.791**

Spearman's correlation test, r = strength of correlation or correlation coefficient, (-) inverse correlation, (+) proportional correlation, significant ($p < 0.05$), highly significant ($p^{**} \leq 0.01$)

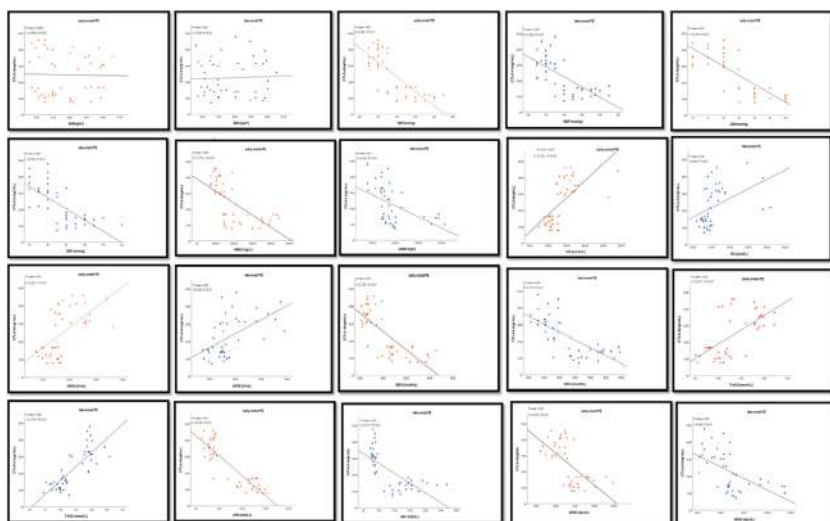


Fig. 3. Correlation coefficient of CTLA-4 vs. other clinical parameters (BMI, DBP, SBP, ADMA, NO, eNOS, MDA, T-AOC, sFlt-1, sENG) in early-onset and late-onset pre-eclampsia patients

Discussion

Preeclampsia is marked by systemic inflammation, endothelial dysfunction, and a disruption in the balance of immune regulation; research has shown a significant decline in CTLA-4 expression, primarily in its soluble and/or membrane-bound forms. Several immunopathological mechanisms can explain this reduction, primarily due to regulatory T cells expressing CTLA-4 [8]. In a normal pregnancy, Tregs have a vital function in ensuring the mother's immune system accepts the fetus. In preeclampsia, the number of Tregs and their suppressive function are significantly reduced, leading to decreased CTLA-4 expression. Approximately 30-45% of T-cells in human decidua are CD4⁺ T-cells, and 45-75% are CD8⁺ T-cells, which are cytotoxic T lymphocytes. CD8⁺ T-cells

are more common in human decidua in terms, but less common in peripheral blood. These cells can recognize allogeneic MHC molecules but do not attack fetal cells during pregnancy. It is thought that the condition arises from decreased MHC class I expression in fetal trophoblast cells [4; 9]. CTLA-4 is usually present at low levels on the surface of effector T cells and regulatory T cells, thereby affecting the strength of initial T-cell activation. When CTLA-4 is suppressed, cytotoxic T-cell activation increases, and Treg cells are prevented from suppressing the immune system. Establishing maternal-fetal tolerance and completing placentation effectively are crucial for a successful pregnancy. When the immune balance is disturbed, spontaneous abortions, preeclampsia, and intrauterine growth restriction of the fetus may occur due to inadequate placental perfusion. Extra villous trophoblasts instruct decidual immune cells to regulate fetal tolerance and promote placental development [10].

Preeclampsia is characterised by chronic placental hypoxia, which disrupts immune signalling and may reduce CTLA-4 expression through epigenetic mechanisms. Recent research indicates that DNA methylation and histone modifications of immune checkpoint genes - such as CTLA-4 - can dampen their expression in low-oxygen and inflammatory environments. Reduced CTLA-4 expression leads to an unchecked immune response, increased T-cell activation, and a pro-inflammatory state, which are all characteristic features of preeclampsia's underlying pathology. This implies that CTLA-4 could serve as both a marker of immune dysregulation and a potential therapeutic target [8].

The results showed that patients with pre-eclampsia had significantly higher levels of ADMA in their serum than healthy individuals. Some studies have identified ADMA as a natural inhibitor of the enzyme eNOS in the endothelium, thereby reducing NO production and contributing to endothelial dysfunction. Researchers Savvidou *et al.*, also reported high ADMA levels in early pregnancy as a potential predictor of the development of preeclampsia. High levels of ADMA may thus play a crucial role in vasoconstriction, hypertension, and decreased placental blood flow observed in patients with pre-eclampsia [11].

The lower levels of endothelial nitric oxide synthase (eNOS), nitric oxide (NO) in pregnant women with preeclampsia compared to healthy pregnant women may be attributed to Endothelial Dysfunction and Oxidative Stress. eNOS is crucial for producing NO in vascular endothelial cells, playing a key role in vasodilation and maintaining vascular balance. In preeclampsia, endothelial dysfunction leads to reduced eNOS expression or activity, subsequently lowering NO production. It was demonstrated that significantly decreased eNOS levels in women with preeclampsia, suggesting impaired endothelial

function as a primary contributor. Preeclampsia is characterized by elevated oxidative stress, which increases the production of reactive oxygen species (ROS), particularly superoxide anions [9; 12]. These anions react with nitric oxide to form peroxynitrite (ONOO^-), a cytotoxic compound that not only reduces nitric oxide bioavailability but also exacerbates endothelial damage. Some scientific reports indicated that oxidative stress in the placenta and vasculature plays a major role in reducing nitric oxide levels and contributing to vasoconstriction and hypertension. Asymmetric dimethylarginine (ADMA) is a well-known endogenous inhibitor of eNOS [13].

The study revealed a statistically significant decrease in T-AOC levels among PE patients, caused by heightened oxidative stress and an overproduction of ROS. Preeclampsia is associated with an excessive production of reactive oxygen species (ROS), typically resulting from placental hypoxia-reperfusion and mitochondrial dysfunction, which overpowers antioxidant defenses, thereby depleting T-AOC. Consumption of Antioxidants may be one reason for reduced T-AOC in preeclampsia. With high ROS levels, antioxidants (enzymatic and non-enzymatic) are consumed rapidly to neutralize free radicals. A significant drop in circulating T-AOC levels is made worse by lower levels of antioxidant enzymes like superoxide dismutase (SOD), glutathione peroxidase, and essential micronutrients (for instance, vitamins A, C, E, zinc, selenium) in women with preeclampsia. Inflammation Impairs Antioxidant Defense [14]. Preeclampsia is associated with systemic inflammation, which suppresses antioxidant enzyme expression and activity, compounding the deficiency in T-AOC despite the high oxidative burden. A recent Turkish clinical study confirmed significantly lower serum T-AOC in early-onset preeclampsia compared to controls, alongside elevated total oxidant capacity and malondialdehyde (MDA), a marker of lipid peroxidation.

Elevated malondialdehyde (MDA) levels in pregnant women with preeclampsia may be higher than in those who are healthy. Chronic placental hypoxia-reperfusion and ischemia in preeclampsia trigger the overproduction of reactive oxygen species, which then attack membrane polyunsaturated fatty acids. Lipid peroxidation results in the formation of high levels of lipid peroxides and increases MDA levels as a byproduct [15; 16]. A meta-analysis of oxidative stress biomarkers in preeclampsia showed that women with the condition have significantly elevated MDA, making MDA a reliable marker of lipid peroxidation in preeclampsia. A recent in vitro and clinical study reported that serum MDA levels significantly increased in women with preeclampsia versus healthy controls, preeclamptic patients, and correlated positively with blood pressure

severity [17]. Elevated MDA reflects uncontrolled lipid peroxidation, which damages endothelial cell membranes, promotes vasoconstriction, reduces prostacyclin synthesis, and impairs vascular permeability, key pathophysiological features of preeclampsia [18].

The elevated levels of soluble fms-like tyrosine kinase-1 (sFlt-1) in pregnant women with preeclampsia as opposed to those with a healthy pregnancy might be attributed to placental hypoxia and ischemia. A key factor driving the rise in sFlt-1 in preeclampsia is placental hypoxia resulting from shallow trophoblastic invasion and the inadequate remodelling of the spiral arteries. In response to hypoxic stress, the placenta releases high levels of sFlt-1, which is an anti-angiogenic factor that binds to vascular endothelial growth factor (VEGF) and placental growth factor (PlGF), and as a result, neutralizes their activity and prevents angiogenesis from occurring. Increased sFlt-1 serves as a decoy receptor by reducing the availability of VEGF and PlGF in the maternal bloodstream. This results in widespread maternal endothelial dysfunction, which contributes to hypertension, proteinuria, and other systemic features of preeclampsia. In a hypoxic placenta, oxidative stress and inflammatory signals cause an increase in the production of anti-angiogenic factors, such as sFlt-1 [19; 20].

The results of our research indicated a considerable rise in serum sEng concentrations among PE patients relative to healthy pregnant women. In preeclampsia, inadequate placental blood flow causes hypoxic stress within the trophoblast cells. The process stimulates the excessive production of soluble endoglin (sEng), a circulating anti-angiogenic protein that suppresses the signalling of transforming growth factor-beta (TGF- β), a factor which is vital for endothelial cell function and vascular stability. TGF- β 1 bound by sEng decoy receptor prevents its activation of the signaling pathway in endothelial cells [21]. This disrupts the production of NO, angiogenesis, and endothelial repair, which contributes to vascular damage and clinical manifestations of preeclampsia. In preeclampsia, the damaged syncytiotrophoblast layer in the placenta experiences heightened rates of apoptosis and necrosis, resulting in the release of microparticles and anti-angiogenic factors such as soluble endoglin into the maternal bloodstream [22].

The inverse relationship between CTLA-4 and ADMA levels in pre-eclamptic patients could be attributed to CTLA-4 acting as a key immune checkpoint, regulating T-cell activation and promoting maternal immune tolerance during pregnancy [23]. Studies have found that reduced CTLA-4 expression in women with preeclampsia contributes to immune system imbalance and increased systemic inflammation. The accumulation of ADMA, which inhibits endothelial

nitric oxide synthase (eNOS), leads to impaired nitric oxide (NO) production, causing endothelial dysfunction and increased vascular resistance, characteristics of preeclampsia [18; 24]. Elevated ADMA levels have been consistently reported in preeclamptic women. Reduced expression of CTLA-4 is linked to higher levels of pro-inflammatory cytokines and oxidative stress, which could in turn worsen endothelial damage and, as a result, contribute to higher ADMA levels. Consequently, the existing research supports a logical inverse connection between CTLA-4 and ADMA in preeclampsia. Lower CTLA-4 expressions may promote immune-mediated vascular damage and oxidative imbalance, facilitate ADMA elevation, and worsen endothelial dysfunction [25].

In the context of preeclampsia, both nitric oxide (NO) and endothelial nitric oxide synthase (eNOS) levels are significantly reduced, contributing to vascular endothelial dysfunction and increased blood pressure. Similarly, CTLA-4 expression is also found to be decreased in preeclamptic patients, suggesting a possible immunological disruption. A positive correlation appears to exist between CTLA-4 and both NO and eNOS levels. The concurrent decrease in these markers may indicate an integrated process in which immune dysregulation, characterised by reduced CTLA-4, may impair endothelial function through a decrease in nitric oxide availability [26]. The discovery implies that CTLA-4 could impact vascular homeostasis not only by promoting immune tolerance but also by affecting the NO signalling pathway. Lower levels of CTLA-4 in preeclamptic women have been linked with increased systemic inflammation and oxidative stress. MDA, a byproduct of lipid peroxidation, is a well-established marker of oxidative stress and is found to be significantly elevated in women with preeclampsia. Increased oxidative stress may be a consequence of an exaggerated immune response due to insufficient immune regulation [27].

Research indicates that there is a correlation between the expression of CTLA-4 and T-AOC levels in cases of preeclampsia in women, with both markers significantly lower than those in normal pregnancies; CTLA-4 operates as a vital checkpoint molecule that inhibits T-cell activity to facilitate immune tolerance. Reduced expression of CTLA-4 has been linked to stronger pro-inflammatory immune responses that often occur in preeclamptic situations. T-AOC, by contrast, offers a comprehensive indicator of the body's antioxidant defence systems. A decrease in T-AOC suggests a compromised ability to neutralize oxidative stress, which is a hallmark of the pathophysiology of preeclampsia [21; 28]. The parallel decline in CTLA-4 and T-AOC levels suggests a possible functional link between immune dysregulation and oxidative imbalance. Reduced immune regulation via CTLA-4 could potentially intensify oxidative stress or

vice versa, thereby creating a cycle that worsens the severity of the disease. Preeclampsia is characterized by significantly elevated expression levels of anti-angiogenic markers, namely soluble fms-like tyrosine kinase-1 (sFlt-1) and soluble endoglin (sENG). These factors contribute to endothelial dysfunction and impaired placental vascular development by antagonizing pro-angiogenic factors such as VEGF and PlGF [29]. Conversely, CTLA-4 levels are significantly decreased in pre-eclamptic patients. Emerging evidence suggests an inverse correlation between CTLA-4 and both sFlt-1 and sENG. The relationship between reduced immune regulation and endothelial dysfunction implies that low CTLA-4 expression may be connected to increased anti-angiogenic factors. The inverse correlation supports the hypothesis that disruptions to immune system controls, like less CTLA-4, could lead to the development of preeclampsia via the disordered regulation of blood vessel formation and immune system interactions with the lining of blood vessels [30].

Conclusion

Our results indicated that the correlation of CTLA-4 with biomarkers of angiogenic factors, oxidative stress, and endothelial dysfunction was not significantly different in EOP and LOP patients, which may cast new light on the possible role as an etiological cause of PE and might be a better monitoring index in women with PE. Our results support the use of CTLA-4 and studied biomarkers in early first- and third-trimester antenatal screening for pre-eclampsia.

Ethics committee conclusion. The study received ethical approval from Basrah University (11/45/3729), and informed consent was obtained from each participant after explanation of the procedures in full detail. The informed consent and ethical guidelines were followed, based on the Declaration of Helsinki for the year 2000.

Data availability. All the findings of this study are presented within the paper.

Conflict of interest information. The authors declare no conflict of interest.

Author contributions. R.A. Abdualhay contributed to the planning and performance of the research experiments, and A.J.M. Al-Fartosy contributed to the analysis of the results and the writing of the manuscript.

Acknowledgments. The author is highly thankful to the head of the Chemistry Department, College of Science, University of Basrah, for providing their kind support and facilities to accomplish the present research project within the time.

References

1. Erez, O., Romero, R., Jung, E., Chaemsaithong, P., Bosco, M., Suksai, M., Gallo, D. M., & Gotsch, F. (2022). Preeclampsia and eclampsia: The conceptual evolution of a syndrome. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 226(2), S786–S803. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2021.11.1340>. EDN: <https://elibrary.ru/IAXNYP>
2. Ssengonzi, R., Wang, Y., Maeda-Smithies, N., & Li, F. (2024). Endothelial nitric oxide synthase (eNOS) in preeclampsia: An update. *Journal of Pregnancy and Child Health*, 6, 121.
3. Negre-Salvayre, A., Swiader, A., Guerby, P., & Salvayre, R. (2022). Post-translational modifications of endothelial nitric oxide synthase induced by oxidative stress in vascular diseases. *Redox Experimental Medicine*, 2022(1), R139–R148. <https://doi.org/10.1093/rem/rhab039>. EDN: <https://elibrary.ru/KFCOZI>
4. Awad, N. A., Shanan, S. K., & Al-Fartosy, A. J. M. (2014). Effect of lead exposure on malondialdehyde (MDA) level and some biochemical parameters in workers of gasoline stations. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 5(6), 711–716.
5. Godhamgaonkar, A., Dangat, K., Randhir, K., Chhetri, S., Shelke, K., & Shukla, D. (2024). Longitudinal assessment of oxidative stress markers in women with preeclampsia. *Reproductive Sciences*, 31(9), 2731–2740. <https://doi.org/10.1007/s43032-024-01406-1>. EDN: <https://elibrary.ru/CQGMUS>
6. Alsalmi, S. A., Al-Mashkor, I. M. A., & Al-Fartosy, A. J. M. (2023). Osteoprotegerin and interleukin-37 are correlated with liver diseases in chronic hepatitis B virus-infected subjects. *Indonesian Biomedical Journal*, 15(3), 222–295. <https://doi.org/10.18585/inabj.v15i3.2145>. EDN: <https://elibrary.ru/SEGVIJQ>
7. American College of Obstetricians and Gynecologists' Committee on Practice Bulletins-Obstetrics. (2023). ACOG publications: July 2023. *Obstetrics & Gynecology*, 142(1), 227–228. <https://doi.org/10.1097/AOG.0000000000005219>. EDN: <https://elibrary.ru/AOTCTV>
8. Kobayashi, T., Ueda, S., Takagi, M., Kihara, M., & Suzuki, Y. (2020). Pathophysiological roles of ADMA-mediated endothelial injury in hypertensive disorders of pregnancy. *Hypertension Research in Pregnancy*, 8(2), 40–46. <https://doi.org/10.14390/jssh.p.hrp2019-013>. EDN: <https://elibrary.ru/QKXEOI>
9. Al-Kilan, S., & Hassan, E. A. (2024). Soluble endoglin as a diagnostic glycoprotein in preeclampsia. *Advancements in Life Sciences*, 11(3), 593–599. <https://doi.org/10.25081/jals.2024.v11i3.11328>. EDN: <https://elibrary.ru/YHDPSQ>
10. Al-Fartosy, A. J. M., Awad, N. A. N., & Mohammed, A. H. (2023). Evaluating the clinical significance of RBP4, PAI-1, and some trace elements in women with polycystic ovary syndrome. *Bionatura*, 8(1), A26. <https://doi.org/10.21931/RB/2023.08.01.26>

11. Sheikhi, M., Sharifi-Zahabi, E., & Paknahad, Z. (2017). Dietary antioxidant capacity and its association with preeclampsia. *Clinical Nutrition Research*, 6(1), 47–54. <https://doi.org/10.7762/cnr.2017.6.1.47>
12. Turpin, C. A., Sakyi, S. A., Owiredo, W. K., Ephraim, R. K., & Anto, E. O. (2015). Association between adverse pregnancy outcome and imbalance in angiogenic regulators and oxidative stress biomarkers in gestational hypertension and preeclampsia. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 15, 189. <https://doi.org/10.1186/s12884-015-0614-y>. EDN: <https://elibrary.ru/QFJWSI>
13. Alsalmi, A. S., & Al-Fartosy, A. J. M. (2024). Association of serum programmed cell death protein-1 (PD-1) and gene polymorphism with predictors of systemic lupus erythematosus patients in Basra Province, Iraq. *IIUM Medical Journal Malaysia*, 23(3), 46–54. <https://doi.org/10.31436/imjm.v23i3.2627>
14. Abdualhay, R. A., & Al-Fartosy, A. J. M. (2022). Insulin resistance and other adipokines as clinical predictors of gestational diabetes mellitus among pregnant women. *Indonesian Biomedical Journal*, 14(3), 243–251. <https://doi.org/10.18585/inabj.v14i3.1951>. EDN: <https://elibrary.ru/IUZPCB>
15. Mohammed, I. M., Alsalmi, S. A., & Al-Fartosy, A. J. M. (2023). Trace elements and oxidant/antioxidant status in beta-thalassemia patients. *Bahrain Medical Bulletin*, 45(4), 1772–1778.
16. Parhizkar, F., Shekari, N., HajiEsmailPoor, Z., Parsania, S., Soltani-Zangbar, M. S., Aghebati-Maleki, A., & Aghebati-Maleki, L. (2025). Investigation of immune checkpoint molecules (CTLA-4, PD-1, PD-L1, Tim-3) in preeclampsia. *Human Immunology*, 86(3), 111298. <https://doi.org/10.1016/j.humimm.2024.111298>. EDN: <https://elibrary.ru/QWHGCI>
17. Al-Fartosy, A. J. M., Awad, N. A., & Alsalmi, S. A. (2021). Clinical markers and trace elements in patients with type-2 diabetic nephropathy: Impact of insulin resistance. *Journal of Medical Investigation*, 68(1–2), 76–84. <https://doi.org/10.2152/jmi.68.76>
18. Faris, S. T., Al-Fartosy, A. J. M., & Al-Fregi, A. A. (2022). Genetic polymorphism of vascular endothelial growth factor associated with hypothyroid in hemodialysis patients. *European Chemical Bulletin*, 11(11), 1–9.
19. Aras, Ş. Y., Kadioğlu, B. G., Gezer, A., Yıldız, S. E., Arslan, G. F., & Sarı, E. K. (2025). Determination of CTLA-4 levels in placenta tissue of pregnant women with preeclampsia. *CYPRUS*, 169.
20. Wang, S., Chen, C., Li, M., Qian, J., Sun, F., & Li, Y. (2019). Blockade of CTLA-4 and Tim-3 pathways induces fetal loss with altered cytokine profiles. *Cell Death & Disease*, 10(1), 15. <https://doi.org/10.1038/s41419-018-1263-0>. EDN: <https://elibrary.ru/PXTYMQ>

21. Mohammed, I. M., Mashkor, I. M. A., Alsalimi, S. A., & Al-Fartosy, A. J. M. (2024). Circulating serum caveolin-1 and interleukin-37 as predictive biomarkers in rheumatoid arthritis patients. *Journal of Natural Science, Biology and Medicine*, 15(3), 446–453. https://doi.org/10.4103/jnsbm.jnsbm_246_23
22. Böger, R. H., Bode-Böger, S. M., Szuba, A., Tsao, P. S., Chan, J. R., & Tangphao, O. (1998). Asymmetric dimethylarginine (ADMA): A novel risk factor for endothelial dysfunction. *Circulation*, 98(18), 1842–1847. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.98.18.1842>
23. Ristovska, E. C., Genadieva-Dimitrova, M., Todorovska, B., Milivojevic, V., Rankovic, I., Samardziski, I., & Bojadzioska, M. (2023). The role of endothelial dysfunction in pregnancy-related pathological conditions. *Contributions*, 44(2), 5–22. <https://doi.org/10.2478/prilozi-2023-0008>
24. Bansal, A., Hadimani, C. P., Patil, S. B., & Nik Lah, N. A. Z. B. (2025). Evaluating asymmetric dimethylarginine as a biomarker for preeclampsia: A meta-analysis. *Journal of Neonatal Surgery*, 14(1 Suppl), 758–764. <https://doi.org/10.52783/jns.v14.1599>
25. Fondjo, L. A., Awuah, E. O., Sakyi, S. A., Senu, E., & Detoh, E. (2023). Association between endothelial nitric oxide synthase gene variants and nitric oxide production in preeclampsia. *Scientific Reports*, 13(1), 41920. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41920-w>. EDN: <https://elibrary.ru/WJZCNF>
26. Abogale Al-Khazali, I. H., Al-Fartosy, A. J. M., & Al-Sawaad, H. Z. (2020). Effect of seminal fructose and citric acid levels in men with infertility. *Annals of Tropical Medicine and Public Health*, 23(13), 231375. <https://doi.org/10.36295/ASRO.2020.231375>. EDN: <https://elibrary.ru/FEFUOM>
27. Freire, V. A. F., de Melo, A. D., de Lima Santos, H., & Barros-Pinheiro, M. (2023). Evaluation of oxidative stress markers in subtypes of preeclampsia. *Placenta*, 132, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.placenta.2022.12.009>. EDN: <https://elibrary.ru/OIXBFU>
28. Maynard, S. E., Min, J. Y., Merchan, J., Lim, K. H., Li, J., Mondal, S., Libermann, T. A., Morgan, J. P., Sellke, F. W., Stillman, I. E., Epstein, F. H., Sukhatme, V. P., & Karumanchi, S. A. (2003). Excess placental sFlt-1 may contribute to endothelial dysfunction. *Journal of Clinical Investigation*, 111(5), 649–658. <https://doi.org/10.1172/JCI200317189>
29. Venkatesha, S., Toporsian, M., Lam, C., Hanai, J., Mammoto, T., Kim, Y. M., Bdolah, Y., Lim, K. H., Yuan, H. T., Libermann, T. A., Stillman, I. E., Roberts, D., D'Amore, P. A., Epstein, F. H., Sellke, F. W., Romero, R., Sukhatme, V. P., Letarte, M., & Karumanchi, S. A. (2006). Soluble endoglin contributes to the pathogenesis of preeclampsia. *Nature Medicine*, 12(6), 642–649. <https://doi.org/10.1038/nm1429>

30. Staff, A. C., Benton, S. J., von Dadelszen, P., Roberts, J. M., Taylor, R. N., Powers, R. W., & Charnock-Jones, D. S. (2020). Redefining preeclampsia using placenta-derived biomarkers. *Hypertension*, 75(4), 918–926. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.119.14292>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Raghda Abdulsamad Abdualhay, PhD, Prof.

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

husseinalihasan526@gmail.com

Adnan Jassim Mohammed Al-Fartosy, PhD, Prof.

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

adnan.jassim@uobasrah.edu.iq

<https://orcid.org/0000-0002-0681-6452>ORCID:

Поступила 14.01.2026

После рецензирования 26.02.2026

Принята 16.03.2026

Received 14.01.2026

Revised 26.02.2026

Accepted 16.03.2026

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1813](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1813)EDN: [AWPVBI](https://www.edn.ru/AWPVBI)

UDC 616.36-008



Physiological and histopathological changes associated with aluminum induced toxicity on liver in experimental male rats

N.H. Abd Al-Aziz, I.A. Al-Rufaei, S.A. Abduljaleel

College of Science, University of Basrah, Basrah, Iraq

Abstract

Background. Access to various chemicals has caused many cases of poisoning in the last decades, people are deliberately, accidentally poisoned or overdose of drugs and chemicals.

Purpose. Designed to clarify the pathophysiological changes caused by using varying doses of Aluminum chloride on liver and the ameliorative effect of zinc on these changes.

Methodology. Fourteen adult male rats were allocated randomly and in equal number (n=6) into seven groups: the rats were euthanized through administration of lethal dose of chloroform, the blood were taken via cardiac puncture method, for biochemical analysis (ALT, AST, ALP, etc.). further aliquot of blood placed in anticoagulant tubes for measurement of hematological parameters (RBC, WBC, PLT, etc.). histological study done by taking liver, kidney, tissue from all experimental groups.

Results. Aluminum chloride exposure significantly increased liver enzymes and caused tissue damage in liver. Zinc chloride treatment effectively restored these parameters to near-normal levels and improved tissue histology, demonstrating its protective role against aluminum-induced toxicity. Microscopic observations of liver sections from control rats revealed that the liver parenchyma was composed of lobules and hepatocytes arranged around the central vein. After dosing, these cells showed liver toxicity, damage, and hemorrhage. However, the zinc chloride-treated groups had healthier liver tissue, with most cells arranged as hepatic plaques separated by vascular sinusoids.

Conclusion. The exposure to $AlCl_3$, the greater its effects on the rats' organ, liver, more harmful, a dose of 100 mg of $AlCl_3$ is than a dose of 20 or 40 mg.

Keywords: aluminum; biochemical analysis; liver enzyme; zinc

For citation. Abd Al-Aziz, N. H., Al-Rufaei, I. A., & Abduljaleel, S. A. (2026). Physiological and histopathological changes associated with aluminum induced toxicity on liver in experimental male rats. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 45–59. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1813>

Introduction

Access to various chemicals has caused many cases of poisoning in the last decades people are deliberately or accidentally poisoned by misuse or overdose of drugs and chemicals. Heavy metals are important examples among these agents. Materials are released from natural sources or industrial wastes and can threaten human health [1]. One of these agents is aluminum (Al), which is a silvery white, soft, malleable, nonmagnetic, and ductile metal, Aluminum forms about 8% of the Earth's crust and is the third most abundant element after oxygen and silicon [2].

Aluminum reaches human bodies through the skin, the gastrointestinal system, and lungs [3]. Its long record of use in medicine includes its use as an adjuvant in vaccines and an agent against pathological hyperhidrosis, both of which have been proven to have minimal adverse effects in investigations [4]. The World Health Organization (WHO) suggests that 1 mg of aluminum per kilogram of body weight is the maximum amount that can be consumed each day [5].

Bread, rice, soft drinks, milk powder, and table salts are a few products which have a lot of aluminum additions [6]. Not only provides food include metal, but cooking using aluminum cookware, covering food in aluminum foil, and storing food in aluminum cans can also cause humans to consume large amounts of aluminum [7]. When using aluminum kitchen equipment, the heat from the tools causes metal to pass into the meal [8]. Metals are considered as important components of a physiologically active cell, and imbalance in their levels can lead to various diseased conditions.

Aluminum (Al) is an environmental neurotoxic ant, which is etiologically related to several neurodegenerative disorders like Alzheimer's, whereas zinc (Zn) is an essential trace element that regulates a large number of metabolic processes in the brain [9]. Heavy metals like aluminum can interfere with the absorption or function of essential minerals such as zinc if present in high amounts, potentially disrupting zinc-dependent biological functions. This is a general inference based on known mineral interactions [10]. Because zinc and aluminum compete for binding sites on metallothioneins and transport proteins

(such as divalent metal transporter 1, DMT1), zinc decreases the absorption of aluminum in the intestines and its buildup in tissues [11].

Zinc acts as a neuroprotective and hepatoprotective agent against aluminum toxicity by reducing oxidative stress, restoring antioxidant defenses, preventing tissue damage, and modulating metal accumulation [12]. Additionally, by maintaining the integrity of the blood-brain barrier (BBB), it guards against Al-induced neuronal damage [3]. Zinc up regulates metallothioneins (MTs), which bind both Zn and toxic metals like Al, facilitating their detoxification [13]. Zn-induced MTs can sequester Al, reducing its free ionic form and subsequent toxicity [14]. Zinc is utilized as an enzyme in the rubber industry, a white pigment in paints, and in the manufacturing of plastics, cosmetics, wallpaper, and printing inks. It is utilized in pharmaceutical formulations for anti-aging skin care products, among other things, as an antioxidant.

Methodology

Materials

The materials used in this study are aluminum chloride (AlCl_3) and zinc chloride (ZnCl_2). Both chemicals were procured from Alpha Chemical India. Aluminum chloride (AlCl_3) and zinc chloride (ZnCl_2). Their main chemical and physical properties are summarized below. Aluminum Chloride (AlCl_3): A white to yellowish crystalline solid with a purity of 98%, chemical formula: AlCl_3 , molar mass: 133.34 g/mol, density: 2.44 g/cm³, sublimates at approximately 190 °C, soluble in water, ethanol, and chloroform. Zinc Chloride (ZnCl_2): A white crystalline solid with a purity of 98%, chemical formula: ZnCl_2 , molar mass: 136.28 g/mol, density: 2.91 g/cm³, melting point: 290 °C, boiling point: 732 °C.

Study design and sampling

Forty-two male rats (*Rattus norvegicus*) were used in these experiments, the animals were obtained from the College of Veterinary Medicine, University of Basrah. They were maintained and cared for under appropriate environmental conditions, including room temperature, proper nutrition, and controlled lighting, in accordance with ethical guidelines for laboratory animal care. Rats were separated and divided randomly into (7) equal groups, (6) rats in each group as the following: Group one (control group): In this group rats were drenched with normal saline (1ml) every day for the experiment periods. Group two: Within this group rats were drenched orally toxic dosage with (20 mg/kg single dosage/B.W) of AlCl_3 [15]. Group three: For this group

rats were drenched orally toxic dosage with (40 mg/kg single dosage/B.W) of AlCl_3 [16]. Group Four: Into this group rats were drenched orally toxic dosage with (100 mg/kg single dosage/B.W) of Aluminum chloride [17]. Group Five: Received both (50 mg/kg B.W) of ZnCl_2 and (20 mg/kg B.W) of AlCl_3 [18]. Group six: Co-administered with (50 mg/kg B.W) of ZnCl_2 and (40 mg/kg B.W) of AlCl_3 . Group seven: Cotreated with both (50 mg/kg B.W) of ZnCl_2 and (100 mg/kg B.W) of AlCl_3 .

Biochemical analysis study

Following each treatment, the rats were euthanized through administration of lethal dose of chloroform, the blood were taken via cardiac puncture method, serum was separated by centrifugation for 10min at 300 orpm and stored at -20°C and utilized for biochemical analysis (ALT, AST, ALP, BUN, CREA, Testosterone, FSH, LH, Parathyroid hormone, Erythropoietin, MDA, and Glutathione peroxidase). Some biochemical tests (RBC, WBC, PLT, LYM, MON, GRA) were done on rats serum to determine liver enzymes activity by using special kits.

Histopathological Study

histological study done by taking liver, kidney, tissue from all experimental groups, washed with normal saline to remove blood and tissue debris then, suitable size of specimens were cut and transferred to be fixed with (10%) formalin fixative process [19; 20].

Statistical Analysis

The data of this study were analyzed by using SPSS version 26, based in using one was ANOVA for mean variation, and independent sample t-test.

Results

The results in (Table 1) and (Fig. 1-3), showed significant increase ($p<0.05$) in AST level in rats treated with 100 mg/kg B.W/ AlCl_3 compared with control group and with 20mg AlCl_3 treated group. However, there was significant decrease ($p<0.05$) in AST level in group co-treated with both 20 mg AlCl_3 and ZnCl_2 compared with 40 mg and 100 mg chloride aluminum treated groups.

Rats co-administered with 40 mg AlCl_3 and ZnCl_2 showed significant decrease ($p<0.05$) in AST concentration, in comparison with 100 mg AlCl_3 , treated group, while there was significant increase ($p<0.05$) in AST level in 40 mg AlCl_3 , treated group compared with control group, in addition, ALP showed significant increase ($p<0.05$) in rats treated with 100mg AlCl_3 in comparison with control group and other groups expect group co-administered with both 100 mg AlCl_3 and ZnCl_2 , our present study revealed to significant increase ($p<0.05$) in

ALP concentration in 100 mg AlCl_3 + ZnCl_2 co-treated group compared with group co-treated with both 20 mg AlCl_3 combined with ZnCl_2 and with 40mg AlCl_3 combined with ZnCl_2 .

Table 1.
Effect different doses of AlCl_3 and combination with ZnCl_2 on liver enzymes mean $\pm$ SD in experiment al rats

Groups	Parameter		
	ALT	AST	ALP
Control (Normal saline 0.9%. NaCl)	55.66 $\pm$ 7.23 a	97.67 $\pm$ 7.63 C	152 $\pm$ 17.08 C
G2 AlCl_3 (20mg)	56.33 $\pm$ 5.50 a	111.67 $\pm$ 20.74 bc	240 $\pm$ 17.52 Bc
G3 AlCl_3 (40mg)	58.33 $\pm$ 6.11 a	134.67 $\pm$ 23.69 ab	271 $\pm$ 215.64 Bc
G4 AlCl_3 (100 mg)	59.66 $\pm$ 3.78 a	163 $\pm$ 31.57 a	472 $\pm$ 81.279 A
G5 AlCl_3 20mg + 50mg ZnCl_2	55 $\pm$ 0.00 a	105 $\pm$ 21.37 C	205 $\pm$ 62.37 Bc
G6 AlCl_3 40mg+ 50mg ZnCl_2	55.77 $\pm$ 2.54 a	116.67 $\pm$ 19.65 bc	213 I 112,263 Bc
G7 AlCl_3 100mg+50 mg ZnCl_2	61 $\pm$ 5.29 a	148.67 $\pm$ 18.58 ab	370.67 $\pm$ 14.048 Ab

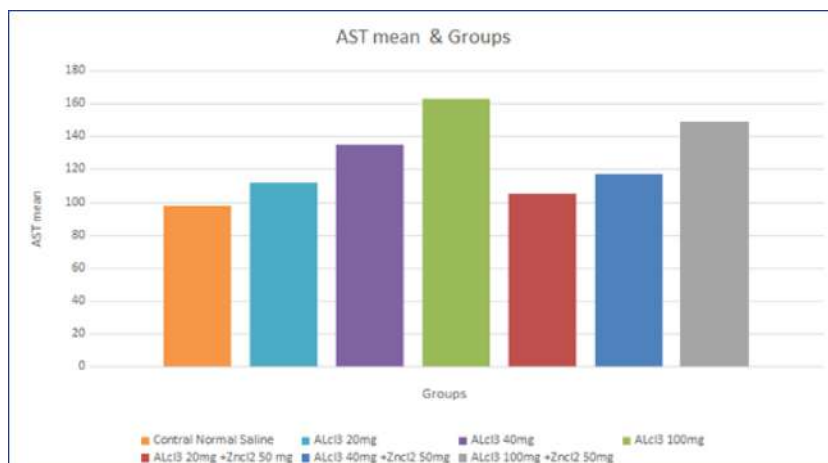


Fig. 1. Effect different doses of AlCl_3 and combination with ZnCl_2 on liver enzyme AST mean $\pm$ SD U/L in experiment al rats

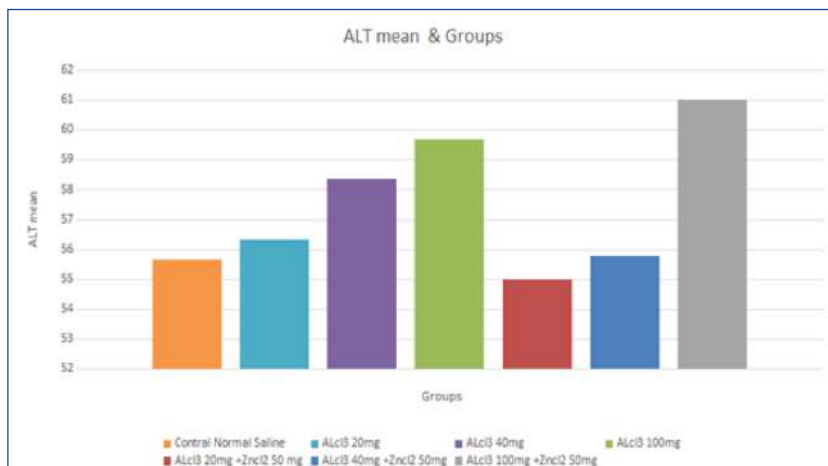


Fig. 2. Effect different doses of AlCl_3 and combination with ZnCl_2 on liver enzyme ALT mean $\pm$ SD U/L in experiment al rats

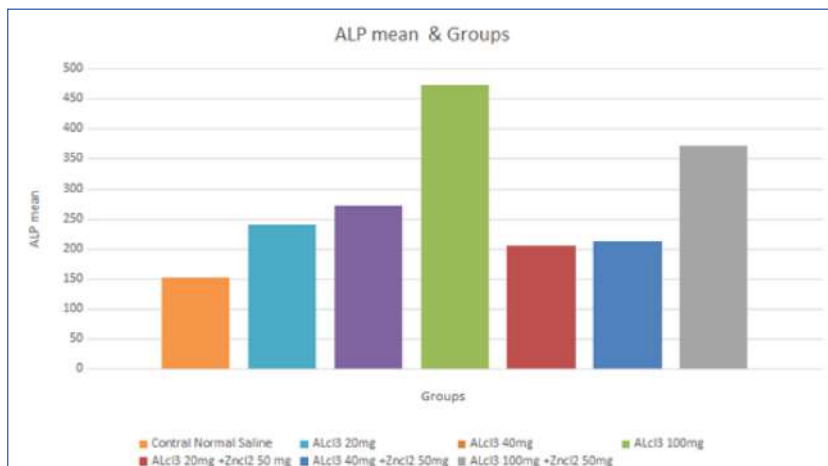


Fig. 3. Effect different doses of AlCl_3 and combination with ZnCl_2 on liver enzyme ALP mean $\pm$ SD U/L in experiment al rats

Recent study showed that liver sections related rats exposed to at 20,40 mg/ AlCl_3 /B.W dose and treated with 50 mg ZnCl_2 B.W dose have less and mild histological changes, liver tissue more healthy, most liver cells (hepatocytes) arranged as hepatic plates separated by vascular Sinusoids and the hepatocytes

with ovoid nucleus, still mild to moderate cytoplasmic vacillation and eosinophilia especially with liver sections of rats treated with AlCl_3 (40) mg then with ZnCl_2 , moreover normal Central vein lining with endothelial cells, mild focal degeneration and Karyopyknosis (Fig. 4-9).

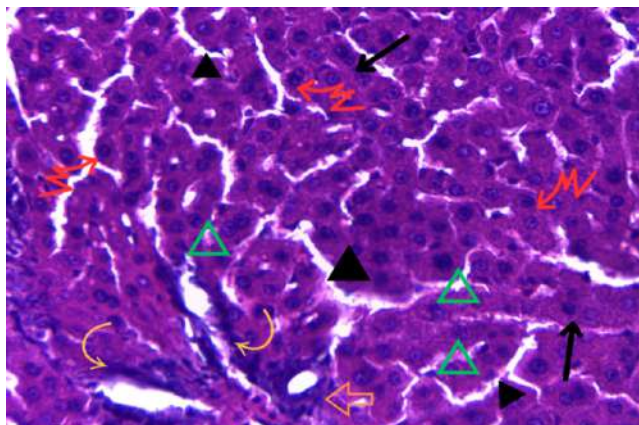


Fig. 4. Photomicrograph in liver section from control rat showing each liver lobule consist of hepatic cords (plate) (→) arranged hepatocytes (△) with dense, ovoid nuclei (↪), branch of bile duct (⇨) and dilated normal portal ducts (↘), the hepatic cords separated by normal sinusoids (▲). (H&E) stain (40x).

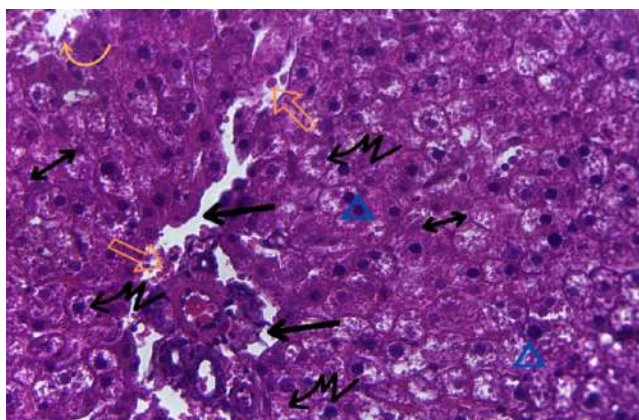


Fig. 5. Photomicrograph in liver section from rat group (2) treated with AlCl_3 (20 mg) showing dilated sinusoids (→) pyknotic nuclei (△), eosinophilia (↪) extravasation of RBCs (⇨), hemorrhage (↘) the hepatocytes lost their boundaries (↔) (H&E) stain (40x).

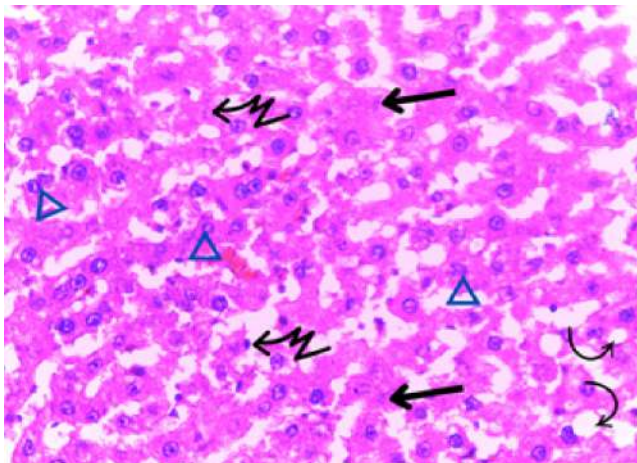


Fig. 6. Photomicrograph in liver section from rat group (3) dosage AlCl_3 (40mg) showing hepatocyte degeneration ($\rightarrow$), hepatocytes with karyorrhexis nucleus ($\triangle$), moderate vacuolation ($\Rightarrow$), and most cells lost their normal boundaries, ($\curvearrowright$). (H&E) stain (40x).

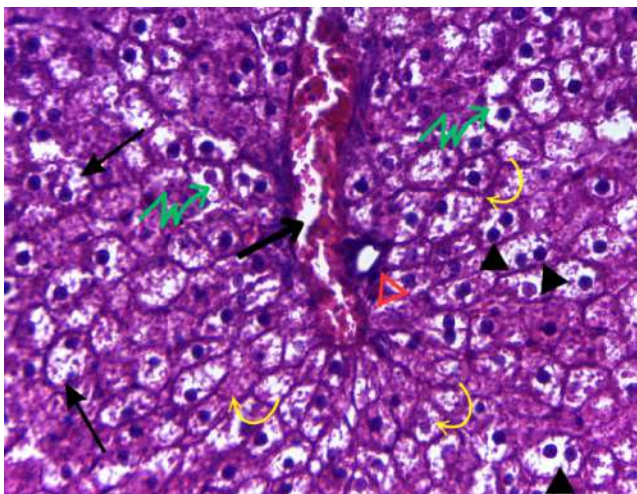


Fig. 7. Photomicrograph in liver section from rat group (4) dosage AlCl_3 (100 mg) showing Severe inflammation, severe congestion ($\rightarrow$), bile duct hyperplasia ($\triangle$), hepatocytes vacuolation ($\curvearrowright$), hepatocytes necrosis ($\rightarrow$), most hepatocytes with two nuclei ($\blacktriangle$) showed eosinophilia and increase thickness of liver cells cell membrane ($\Rightarrow$). (H&E) stain (40x)

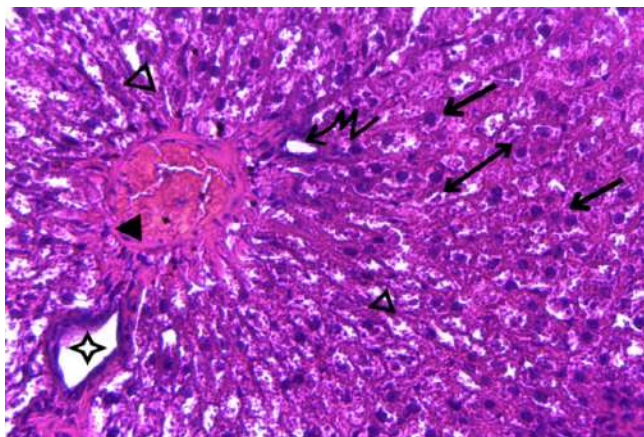


Fig. 8. photomicrograph in liver section from rat group (5) dosage AlCl_3 (20 mg) + ZnCl_2 (50 mg), showed normal liver tissue ($\leftrightarrow$), most hepatocytes ($\rightarrow$) with avoid nucleus, vascular sinusoids (Δ), normal central vein ($\star$), normal branch of bile duct ($\hookrightarrow$) and mild hemorrhage ($\blacktriangle$) (H&E) stain (40x)

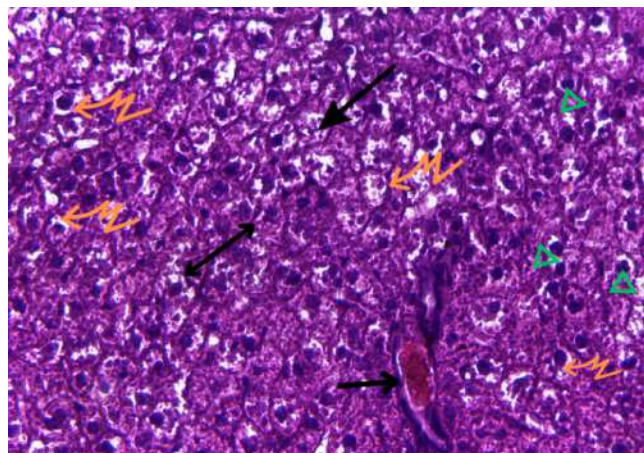


Fig. 9. Photomicrograph in liver section from rat group (6) dosage AlCl_3 (40 mg) + ZnCl_2 (50 mg) showed normal central vein ($\rightarrow$), mild cytoplasmic vacuolation ($\hookrightarrow$), karyopyknosis (Δ), still hepatocytes with granular cytoplasm ($\rightarrow$)the liver paranchyma more regular ($\leftrightarrow$). (H&E) stain (40x).

The present study revealed ameliorated histological changes when using ZnCl_2 compared to (AlCl_3) treatment alone, mild focal necrosis areas with sever infiltra-

tion of inflammatory cells within hepatic lobule and around the central vein, the cells also showed manifestation of fatty changes, however there was less protective effect of (ZnCl_2) in the group that was treated with high a dose of (AlCl_3), degenerative and necrotic changes in the hepatocytes at different stages within the same region and diffuse of Kupffer cells between degenerated hepatocytes (Fig. 10).

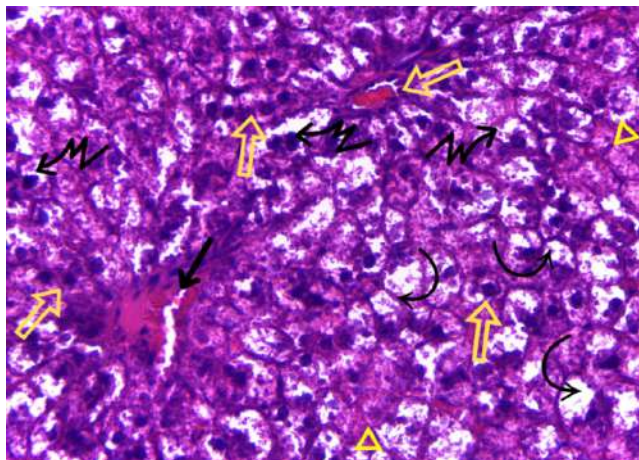


Fig. 10. Photomicrograph in liver section from rat group (7) dosage AlCl_3 (100 mg) + ZnCl_2 (50 mg) showing congestion of central vein ($\rightarrow$) cytoplasmic vacuolation ($\curvearrowright$) hepatocyte degeneration ($\triangle$), infiltration of Kupffer cells ($\Rightarrow$), between hepatocytes and fatty changes ($\curvearrowright$). (H&E) stain (40x).

Discussion

The results of the present study showed a significant increase in serum AST and ALT in rats treated with aluminum chloride compared with the healthy group, which is consistent with previous studies [21-23].

The reason for that rise of the AST enzyme is also attributed to damage to hepatic cells, and the increase in the level of this enzyme is a sign of liver damage and changes in its function [24]. The accumulation of aluminum (Al), a neurotoxic metal, in the kidneys, bones, and brain causes oxidative stress, inflammation, and cellular damage. Chronic exposure to aluminum in rats is linked to: neurotoxicity (deficits in memory, cognitive decline, and disease similar to Alzheimer's), and oxidative stress (decreased antioxidant enzymes such as SOD, CAT, and GSH, and increased lipid peroxidation).

A crucial topic of study in materials science and biomedical engineering is the toxicity of aluminum and the therapeutic potential of zinc as a miti-

gating agent. Although aluminum is utilized extensively in consumer and industrial settings, when it builds up in biological systems, it can have neurotoxic consequences associated with oxidative stress, cellular dysfunction, and neurodegenerative diseases [25]. The results of the present study showed a significant increase in serum AST and ALT in rats treated with aluminum chloride compared with the healthy group, which is consistent with previous studies [21-23]. Who explained that the exposure to aluminum chloride causes liver necrosis [26].

The reason for that rise of the AST enzyme is also attributed to damage to hepatic cells, and the increase in the level of this enzyme is a sign of liver damage and changes in its function [24]. There was significant decrease ($p < 0.05$) in AST level in group co-treated with both 20mg $AlCl_3$ and Zinc chloride compared with 40mg and 100mg chloride aluminum treated groups, which agree with Eze *et al.*, who stated that Zinc may play an important role in the prevention of hepatocellular damage [27]. Zinc is effective in attenuating the liver damage inflicted by Al toxicity [28].

An increase in serum AST and ALT in rats treated with $AlCl_3$ was in agreement with previous findings demonstrating that $AlCl_3$ exposure promoted liver necrosis [29]. ALP showed significant increase ($p < 0.05$) in rats treated with 100 mg $AlCl_3$ in comparison with control group and other groups which agree with Al-Hazmi *et al.*, who showed that increased Al concentration in the body is shown to induce detrimental biochemical and histological changes [23]. Zinc (Zn) is an essential trace element with antioxidant, anti-inflammatory, and neuroprotective properties. However, there was same result about histological changes in liver of rat when administered with another toxic material such as lead acetate which include fusion and clumping of hepatocyte, degeneration, pyknosis and formation of bubbles [30].

Mechanisms by which $ZnCl_2$ may counteract aluminum toxicity competitive interaction aluminum uptake may be decreased by zinc and aluminum competing for binding and absorption sites in the brain and gut. Antioxidant effects, zinc decreases aluminum-induced oxidative damage and increases the activity of antioxidant enzymes (SOD, CAT, and GSH) [31].

Zinc has an anti-inflammatory effect by inhibiting pro-inflammatory cytokines (TNF- α , IL-6) that are increased as a result of exposure to aluminum. Zinc inhibits aluminum-induced neurodegeneration, stabilizes neuronal membranes, and modifies synaptic function. Although zinc is not a chelator in and of itself, it may aid in reestablishing metal homeostasis, which would lessen the toxicity of aluminum in an indirect manner [32].

Conclusion

The present study concluded that the damage was more severe with an increase in the dose of AlCl_3 100 mg and less severe with lower doses of 20, 40 mg. Clear improvements in all of the above were observed when ZnCl_2 was dosed at a dose of 50 mg, which had a clear role in returning things to almost normal, which proved the therapeutic and preventive role of zinc.

Ethics committee conclusion. This study follows the ethics guidelines of the Faculty of Biology Department, College of Science, University of Basrah, Iraq.

Conflict of interest information. The authors declare that there is no conflict of interest.

Sponsorship information. This study didn't receive any funding support.

References

1. Rahimzadeh, M. R., & Moghadamnia, A. A. (2013). Arsenic compounds toxicity. *Journal of Babol University of Medical Sciences*, 15(2), 51–68. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jbums.15.2.51>
2. Rahimzadeh, M. R., Rahimzadeh, M. R., Kazemi, S., & Moghadamnia, A. A. (2020). Zinc poisoning – symptoms, causes, treatments. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 20(15), 1489–1498. <https://doi.org/10.2174/1389557520666200414161944> EDN: <https://elibrary.ru/MJHYRG>
3. Niu, Q. (2023). *Neurotoxicity of aluminum* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/981-99-1592-7>
4. Willhite, C. C., Karyakina, N. A., Yokel, R. A., Yenugadhati, N., Wisniewski, T. M., Arnold, I. M. F., Momoli, F., & Krewski, D. (2014). Systematic review of potential health risks posed by pharmaceutical, occupational and consumer exposures to metallic and nanoscale aluminum, aluminum oxides, aluminum hydroxide and its soluble salts. *Critical Reviews in Toxicology*, 44(sup4), 1–80. <https://doi.org/10.3109/10408444.2014.934439> EDN: <https://elibrary.ru/USNDQJ>
5. Mohammad, F. S., Al Zubaidy, I. A. H., & Bassioni, G. (2014). A comparison of aluminum leaching processes in tap and drinking water. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(6), 3118–3129. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)07996-8](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)07996-8)
6. Mold, M., Cottle, J., King, A., & Exley, C. (2019). Intracellular aluminium in inflammatory and glial cells in cerebral amyloid angiopathy: A case report. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(8), 1459. <https://doi.org/10.3390/ijerph16081459>

7. Crisponi, G., Fanni, D., Gerosa, C., Nemolato, S., Nurchi, V. M., Crespo-Alonso, M., Lachowicz, J. I., & Faa, G. (2013). The meaning of aluminium exposure on human health and aluminium-related diseases. *Biomolecular Concepts*, 4(1), 77–87. <https://doi.org/10.1515/bmc-2012-0045>
8. Mohammad, F. S., Al Zubaidy, E. A. H., & Bassioni, G. (2023). Effect of aluminum leaching process of cooking wares on food. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(1), 222–230. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)14988-1](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14988-1)
9. Singla, N., & Dhawan, D. K. (2016). Zinc improves cognitive and neuronal dysfunction during aluminium-induced neurodegeneration. *Molecular Neurobiology*, 54(1), 406–422. <https://doi.org/10.1007/s12035-015-9653-9> EDN: <https://elibrary.ru/YVVZJJ>
10. Rahimzadeh, M. R., Rahimzadeh, M. R., Kazemi, S., Amiri, R. J., Pirzadeh, M., & Moghadamnia, A. A. (2022). Aluminum poisoning with emphasis on its mechanism and treatment of intoxication. *Emergency Medicine International*, 2022(1), 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/1480553> EDN: <https://elibrary.ru/AQWYJE>
11. Roohani, N., Hurrell, R., Kelishadi, R., & Schulin, R. (2013). Zinc and its importance for human health: An integrative review. *Journal of Research in Medical Sciences*, 18(2), 144.
12. Hudson, L. G., Dashner-Titus, E. J., & MacKenzie, D. (2025). Zinc as a mechanism-based strategy for mitigation of metals toxicity. *Current Environmental Health Reports*, 12(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s40572-025-00474-x> EDN: <https://elibrary.ru/EAZNVC>
13. Coyle-Shapiro, J. A-M. (2002). A psychological contract perspective on organizational citizenship behavior. *Journal of Organizational Behavior*, 23(8), 927–946. <https://doi.org/10.1002/job.173> EDN: <https://elibrary.ru/DVTVXZ>
14. Rahman, M. S., Azad, Md. A. K., Hasanuzzaman, M., Salam, R., Islam, A. R. M. T., Rahman, M. M., & Hoque, M. M. M. (2020). How air quality and COVID-19 transmission change under different lockdown scenarios? A case from Dhaka city, Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 762, 143161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143161> EDN: <https://elibrary.ru/VMTWQL>
15. Al Dera, H. (2016). Protective effect of resveratrol against aluminum chloride induced nephrotoxicity in rats. *Saudi Medical Journal*, 37(4), 369–378. <https://doi.org/10.15537/smj.2016.4.13611> EDN: <https://elibrary.ru/YDMPNV>
16. Okail, H. A., Ibrahim, A. S., & Badr, A. H. (2020). The protective effect of propolis against aluminum chloride-induced hepatorenal toxicity in albino rats. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 81(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s41936-020-00169-9> EDN: <https://elibrary.ru/WZGFXL>
17. Massoud, A., SaadAllah, M., Dahrhan, N. A., Nasr, N. E., El-Fkharany, I., Ahmed, M. S., Alsharif, K. F., Elmahallawy, E. K., & Derbalah, A. (2022). Toxicological ef-

- fects of malathion at low dose on Wister male rats with respect to biochemical and histopathological alterations. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.860359> EDN: <https://elibrary.ru/LUFSFC>
18. Tizhe, E. V., Ibrahim, N. D.-G., Fatihu, M. Y., Ambali, S. F., Igbokwe, I. O., & Tizhe, U. D. (2020). Effect of zinc supplementation on chronic hepatorenal toxicity following oral exposure to glyphosate-based herbicide (Bushfire®) in rats. *Journal of International Medical Research*, 48(8). <https://doi.org/10.1177/0300060520925343> EDN: <https://elibrary.ru/GGMZFFV>
19. Luna, L. G. (1968). *Manual of histologic staining methods of the Armed Forces Institute of Pathology* (3rd ed.). McGraw-Hill.
20. Drury, R. A. B., Wallington, E. A., & Cameron, S. R. (1976). *Carleton's histological technique* (4th ed.). Oxford University Press.
21. Xu, F., Liu, Y., Zhao, H., Yu, K., Song, M., Zhu, Y., & Li, Y. (2017). Aluminum chloride caused liver dysfunction and mitochondrial energy metabolism disorder in rat. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 174, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2017.04.016>
22. Ameh, S. S., & Alafi, O. F. (2018). Effect of ethanol extract of *Moringa oleifera* leaves in protecting anaemia induced in rats by aluminium chloride. *IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry*, 4(6), 34–52.
23. Al-Hazmi, M. A., Rawi, S. M., & Hamza, R. Z. (2021). Biochemical, histological, and neuro-physiological effects of long-term aluminum chloride exposure in rats. *Metabolic Brain Disease*, 36(3), 429–436. <https://doi.org/10.1007/s11011-020-00664-6> EDN: <https://elibrary.ru/QZRYEC>
24. Al-Qhtani, S. A., & Farran, S. K. (2017). The protective and therapeutic effect of resveratrol in improving renal and hepatic failure induced by aluminum chloride in experimental animals. *Journal of American Science*, 13(10), 26. <https://doi.org/10.7537/marsjas131017.03>
25. Manjunath, G. K., Udaya Bhat, K., & Preetham Kumar, G. V. (2022). Effect of zinc content on the microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg alloy. *Materials Today: Proceedings*, 54, 240–244. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.301> EDN: <https://elibrary.ru/PYSIGS>
26. El-Demerdash, F. M., Yousef, M. I., Kedwany, F. S., & Baghdadi, H. H. (2004). Role of α -tocopherol and β -carotene in ameliorating the fenvalerate-induced changes in oxidative stress, hemato-biochemical parameters, and semen quality of male rats. *Journal of Environmental Science and Health Part B: Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Wastes*, 39(3), 443–459. <https://doi.org/10.1081/pfc-120035929>
27. Eze, E. D., Dawud, F. A., Zainab, A. A., Jimoh, A., Malgwi, I. S., & Isa, A. S. (2012). Preliminary studies of effects of vitamin C and zinc on some liver enzymes in alloxan-induced diabetic Wistar rats. *Asian Journal of Medical Sciences*, 4(1), 17–22.

28. Brown, A. S. (2012). Epidemiologic studies of exposure to prenatal infection and risk of schizophrenia and autism. *Developmental Neurobiology*, 72(10), 1272–1276. <https://doi.org/10.1002/dneu.22024> EDN: <https://elibrary.ru/RKGWEF>
29. Al-Hashem, F. (2009). Camel's milk protects against aluminum chloride-induced toxicity in the liver and kidney of white albino rats. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 5(3), 98–109. <https://doi.org/10.3844/ajbb-sp.2009.98.108>
30. Al-Rufaei, I. A., Ali, S. A., Kareem, D. A., & Majeed, M. F. (2025). Single and combined effects of lead and piroxicam on the structural and functional profiles of the liver and kidney. *Polski Merkuriusz Lekarski*, 53(3), 328–335. <https://doi.org/10.36740/merkur202503105> EDN: <https://elibrary.ru/HMRASE>
31. Guarner, F., & Malagelada, J.-R. (2003). Gut flora in health and disease. *The Lancet*, 361(9356), 512–519. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(03\)12489-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(03)12489-0) EDN: <https://elibrary.ru/LREGDD>
32. Prakash, O., Kumar, R., Mishra, A., & Gupta, R. (2009). *Artocarpus heterophyllus* (Jackfruit): An overview. *Pharmacognosy Reviews*, 3(6), 353.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Najwa H. Abd Al-Aziz, MSc., Assist. Prof.

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

najwaabdaziz1@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7702-2304>

Iqbal A. Al-Rufaei, PhD, Prof.

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

eqbal.hazam@uobasrah.edu.iq

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3345-6859>

Salwa A. Abduljaleel, PhD, Prof.

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

salwa.abduljaleel@uobasrah.edu.iq

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4524-4861>

Поступила 14.01.2026

После рецензирования 26.02.2026

Принята 28.02.2026

Received 14.01.2026

Revised 26.02.2026

Accepted 28.02.2026

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1569](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1569)

EDN: [ERIMWO](#)

UDC 616.5-002.77:575.174



The role of -318C/T and +49A/G polymorphisms in the CTLA-4 gene in systemic lupus erythematosus Iraqi patients

T.M. Jasiem

*College of Science, AL-Karkh University of Science,
Baghdad, Iraq*

Abstract

Background. In recent years, Systemic lupus Erythematosus (SLE) has become one of the common autoimmune diseases, where the body's immune system unintentionally targets and damages its own tissues, there are many factors that responsible for pathogenicity one of the most importance is genetic factor, the essential protein which encoded from cytotoxic T lymphocyte associated protein 4 gene is the important protein for the negatively regulation of immune responses

Purpose. To determine the impact of variants -318C/T and +49A/G in the *CTLA-4* gene in Systemic lupus Erythematosus Iraqi patients.

Materials and methods. 68 SLE Iraqi patients participated in the research study, 32 people in good healthy without any symptoms considers as a control group. The extract DNA was by used specific DNA Extraction Kit (gSYNCTM) made from Geneaid/Taiwan with technique "Polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism" used for analysing the *CTLA-4* genes -318C/T and the +49A/G polymorphisms.

Results. The - 318T and +49 G alleles frequency in the *CTLA-4* gene carriers was significantly higher in patients compare with the control group ($P = 0.008$, OR 3.63, 95% CI 1.34 – 9.82; $P = 0.007$, OR 3.16, 95% CI 1.32 – 7.53, respectively), while the -318C and +49 A alleles frequency in the *CTLA-4* gene carriers was low significantly when compare with the control group. Our results presented a significant relationship between CT heterozygous genotypes and T allele in the variant -318C/T in the *CTLA-4* gene and AG heterozygous genotypes and G allele genotype in the +49G/A variant and SLE, addition that are more common in the SLE patients.

Keywords: systemic lupus erythematosus; CTLA-4 gene; -318C/T polymorphism; +49A/G polymorphism; genetic polymorphisms; autoimmune disease; allele frequency; Iraqi population; PCR-RFLP; susceptibility

For citation. Jasiem, T. M. (2026). The role of -318C/T and +49A/G polymorphisms in the CTLA-4 gene in systemic lupus erythematosus Iraqi patients. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 60–72. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1569>

Introduction

In recent years, Systemic lupus Erythematosus (SLE) has become one of the common autoimmune diseases, where the body's immune system unintentionally targets and damages its own tissues [1]. It causes chronic inflammation and damage to several organs in the body, such as the CNS, skin, joints and kidneys [2; 3]. There are many factors responsible for the SLE pathology involves a wide range of genetic, environmental and hormonal factors [4; 5]. Between these factors, genetic inclination is an important determinant, and polymorphisms of significant immunoregulatory genes play a precarious role [6; 7]. One of the importance genes is the cytotoxic T lymphocyte associated protein 4 (*CTLA-4*) genes, which encodes a protein essential for the negative regulation of immune responses [8; 9]. The *CTLA-4* gene acts as an inhibitory checkpoint for T cell activation make certain that immune responses do not become too aggressive and inhibiting autoimmunity [10]. Changes in the *CTLA-4* gene can distressed this delicate balance, which can lead to the progress of autoimmune diseases such as SLE [11].

There are two identified and recognized variants -318C/T (rs5742909) and +49A/G (rs231775) in the *CTLA-4* gene has been many researched in connection with autoimmune diseases [12; 13]. The 318C/T region, positioned in the promoter region of the gene, can affect the level of gene expression, while the +49A/G polymorphism, positioned in the first exon, can affect the structure and function of the *CTLA-4* protein [14]. These genetic distinctions may vary the immunosuppressive functions of *CTLA-4*, contributing to the exposure and progression of autoimmune diseases, including SLE [15; 16]. Genetic background and environmental exposures vary among populations, which may affect the incidence and influence of specific genetic polymorphisms [17; 18]. Studying the association between the variants of the *CTLA-4* gene and SLE in Iraqi patients may make available valuable information about the genetic basis of the disease in this population, which may lead to the development of more effective diagnostic and therapeutic strategies. The current study aim is to investigated the

incidence and role of the variants -318C/T (rs5742909) and +49A/G (rs231775) in the *CTLA-4* gene in Iraqi patients with SLE. By associating the presence of these variants in SLE patients and healthy controls, designed to illuminate their contribution to disease susceptibility and clinical manifestations. Understanding the genetic factors associated with SLE among Iraqi patients may improve our knowledge of the disease and help develop more effective and personalized treatment approaches.

Materials and methods

68 SLE Iraqi patients participated in the research study, which occurred from March to July 2024 from many of hospitals and private clinic, of whom 37 were female and 31 were male. As a control group, 32 people in good health without any symptoms of SLE, consisting of 19 male and 13 female, were also included. The range of the ages of the two studies group (patients and the control) was from 25 to 73 years.

DNA extraction and PCR protocol

Under aseptic genomic DNA extraction was achieved from peripheral mononuclear cells nucleated cells. The extract DNA was by used specific “DNA Extraction Kit gSYNCTM made from Geneaid/Taiwan” was used to course whole blood samples from the study groups in order to extract DNA [19; 20]. The technique “Polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism” was used for analyzing the *CTLA-4* gene -318C/T (rs5742909) polymorphism in the promoter region. PCR was using the exact primers sense (F: 5'-AA ATGAATTGGACTGGATG GT-3') and antisense (R: 5'-TTACGAGAAAGGAA GCCG TG-3'), Following initial denaturation at 94°C (2 min), amplification was performed subsequently 30 cycles at 94°C (30 s), 55 °C (30 s), 72°C (30 s) and a finally at 72°C (5 min). The amplified DNA was 247 bp. ethidium bromide staining was used to examine the PCR products on a 3% agarose gel after they had been digested with the restriction enzyme 5 µl MseI for three hours at 37°C. The amplified DNA consisted of TT genotype measuring three fragments (21, 96, 130 bp), CT genotype measuring four fragments (21, 96, 130, 226 bp), while CC genotype measuring two fragments (226, 21 bp). Also analyze the +49A/G (rs231775) polymorphism was detected by PCR-RFLP. PCR was using the exact primers forward 5'-GCTCTACTTCCTGAAGAC CT-3' and reverse 5'-AGTCTCACTCAC CTTTGC AG-3'. Following initial denaturation at 95°C (4 min), amplification was performed subsequently : denaturation for 60 s 95 °C, annealing for 60 s at 55 °C, extension for 60 s at 72 °C (30 cycles), and a final extension for 4 min at 72 °C. The product length was 162bp. Also by ethidium

bromide staining was used to examine the PCR products on a 3% agarose gel after they had been digested with the restriction enzyme 5 µl BbvI for three hours at 37°C, which cleaved the sequence if a AA genotype not digested and resulted in a 162 bp, GG genotype measuring two fragments (88, 74-bp), and AG genotype measuring three fragments (88, 74, 162 bp).

Analysis of Interactions between -318C/T and +49A/G polymorphisms in SLE

The study's -318C/T and +49A/G polymorphisms interaction was also examined using the MDR program (version 2.0 beta). Multi-locus genotypes are divided into high-risk and low-risk categories by MDR. Cross-validation and permutation testing, which reduce false positive results by repeatedly examining the data, can be used to assess this new multi-dimensional variable's capacity to categorize and predict disease state [21]. This MDR analysis employed 1,000 variations and ten-fold cross-validation as shown in Figure 4, and table 5.

Results and discussion

The *CTLA-4* gene variation with decreased encodes a protein which essential for the negatively regulation of immune responses. *CTLA-4* -318C/T (rs5742909). where a mutation from C to T occurs at positioned in the upstream region of the gene, can affect the level of gene expression, the PCR product of the *CTLA-4* – 318 gene on the gel electrophoresis was 247 bp as shown in fig. 1.

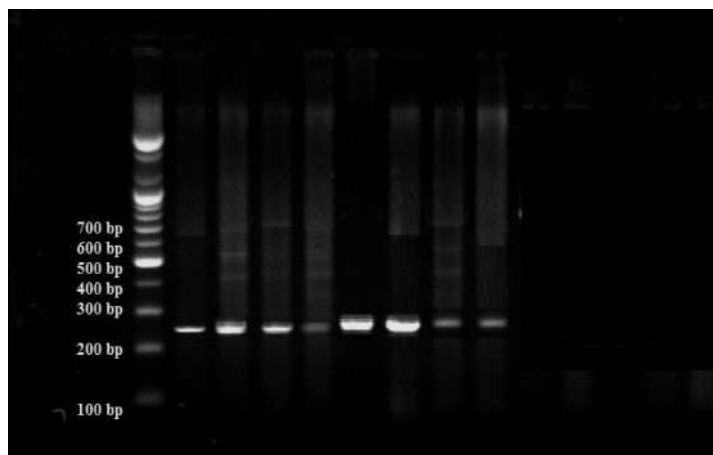


Fig. 1. *CTLA-4* gene -318C/T (rs5742909) PCR product (247 bp) compared to DNA molecular size marker (100bp Ladder) on agarose gel electrophoresis (3%) (100 volts for one hour).

Table 2.

Comparative investigation of the *CTLA-4* gene - 318C/T genotype frequency distribution between SLE patients and the control group

Genotypes	Patients n = 68	Controls n = 32	χ^2	P-value	OR	
					Value	95% CI
Genotype C/C	38(55.9%)	27(84.4%)	7.87	0.005	0.23	0.08 – 0.68
Genotype C/T	28(41.2%)	5(15.6%)			3.78	1.30 – 11.01
Genotype T/T	2(2.9%)	0(0)			2.44	0.11 – 52.39

* (P<0.05), ** (P<0.01), NS: Non-significant.

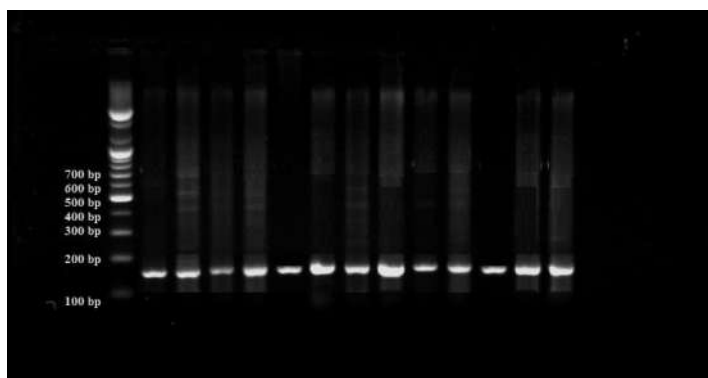


Fig. 3. *CTLA-4* gene +49A/G PCR product (162 bp) compared to DNA molecular size marker (100bp Ladder) on agarose gel electrophoresis (3%) (100 volts for one hour).

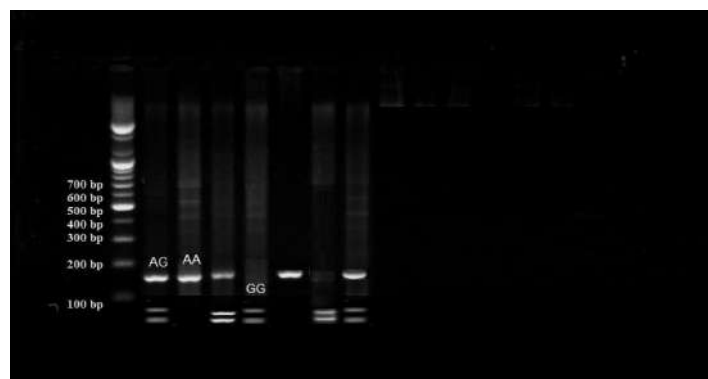


Fig. 4. The PCR-RFLP product of *CTLA-4* gene +49A/G, stained agarose gel by ethidium bromide. DNA molecular size marker (100bp Ladder), three genotypes showed: AA genotype (162 bp), GG genotype (88, 74-bp), and AG genotype (88, 74, 162 bp).

Table 3.
Comparative investigation of the allele frequencies of the polymorphic marker *CTLA-4* gene +49A/G, in the control group and patients with SLE

Alleles	Patients	Controls	χ^2	P-value	OR	
	n = 68	n = 32			value	95% CI
Allele A	98 (72%)	57 (89%)	7.22	0.007	0.32	0.13 – 0.76
Allele G	38 (28%)	7 (11%)			3.16	1.32 – 7.53

* (P<0.05), ** (P<0.01), NS: Non-significant.

Table 4.
Comparative investigation of the *CTLA-4* gene +49A/G genotype frequency distribution between SLE patients and the control group.

Genotypes	Patients	Controls	χ^2	P-value	OR	
	n = 68	n = 32			Value	95% CI
Genotype A/A	34 (50%)	25 (78.1%)	7.68	0.006	0.28	0.11 – 0.73
Genotype A/G	30 (44.1%)	7 (21.9%)			2.82	1.07 – 7.40
Genotype G/G	4 (5.9%)	0 (0)			4.53	0.24 – 86.82

* (P<0.05), ** (P<0.01), NS: Non-significant.

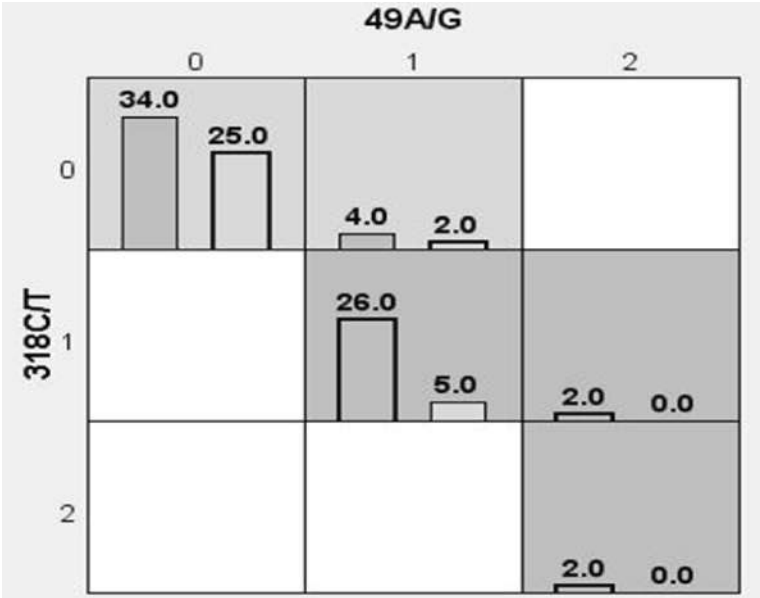


Fig. 5. The frequency distribution of the two locus combination of genotypes of *CTLA-4* gene polymorphism - 318C/T and +49A/G in patients with SLE.

Table 5.

MDR Model for -318C/T and +49A/G polymorphisms Interaction in SLE.

locus	Model	CVC	TBA	P-value	OR	95% C.I.	X ²
Two locus	- 318C/T and +49A/G	10 of 10	0.6705	0.002**	5.625	1.7461- 18.1212	9.5427

Data were expressed as CVC= Cross validation consistency, TBA= Testing accuracy. ** $p < 0.01$ significant.

The - 318T and +49 G alleles frequency in the *CTLA-4* gene carriers was significantly higher in patients compare with the control group ($P = 0.008$, OR 3.63, 95% CI 1.34 – 9.82; $P = 0.007$, OR 3.16, 95% CI 1.32 – 7.53, respectively). The -318C and +49 A alleles frequency in the *CTLA-4* gene carriers was low significantly when compare with the control group as shown in and Tables 1 and 3.

The present results show that in the *CTLA-4* – 318 gene CT heterozygous genotype relative frequency was found to be 15.6% and 41.2% that was statistically significant in the control group and the SLE patients, respectively. The TT homozygous genes revealed significant differences in the SLE patients' 2.9 %, while in the healthy subjects this genotype was present in 0. In 84.4 % of the controls, the CC homozygous genotype was present, whereas it was 55.9% in the SLE patients as shown in table 2. In contrast to the control group, SLE patients had significantly higher levels of the *CTLA-4* – 318 gene CT heterozygous genotypes and T allele ($P < 0.05$), as shown in table 1. While the results show that in the *CTLA-4* +49 gene AG heterozygous genotype relative frequencies was found to be 21.9% and 44.1% that was statistically significant in the control group and the SLE patients, respectively. The GG homozygous genes revealed significant differences in the SLE patients' 5.9 %, while in the healthy subjects this genotype was present in 0. In 78.1% of the controls, the AA homozygous genotype was present, whereas it was 50% in the SLE patients as shown in table 4. In contrast to the control group, SLE patients had significantly higher levels of the *CTLA-4* +49 gene AG heterozygous genotypes and G allele ($P < 0.05$), as shown in table 3.

There was a strong correlation found between *CTLA-4* gene and SLE. For patients with SLE showed an increased risk of SLE for genotypes- 318C/T and +49A/G ($\chi^2 = 9.5427$, $p\text{-value} = 0.002$) as shown in table 5. Thus, it was found that the combination of one genotype allelic variants of two polymorphisms of *CTLA-4* gene which increases the risk of SLE. Even greater differences in intergenic associations between the control group and patients with SLE for persons identified in a genotype which has allelic variants of the *CTLA-4* gene genotypes -318C/T and +49A/G.

In current study we experimental a significant difference in the dispersal of *CTLA4* +49G/A and *CTLA4*-318C/T mutant alleles frequency between two groups controls and SLE in Iraqi patients. Our results presented a significant relationship between CT heterozygous genotypes and T allele in the *CTLA*-4 gene polymorphism -318C/T and AG heterozygous genotypes and G allele genotype in the *CTLA*-4 gene polymorphism +49G/A and SLE, addition that are more common in the SLE patients, there are many researchers have presented results agreement with our result those described that the *CTLA4* gene polymorphism +49A/G may be a linked as one of the genetic risk factor for SLE [22; 23]. Also some researchers suggestion that The *CTLA*-4 gene polymorphisms -318C/T and +49G/A were observed impact SLE susceptibility with MHC class II molecules [24]. Devaraju P., [25] reported the presence of heterozygous (AG) and homozygous mutant (GG) genotype was linked with a significant risk to progress SLE. Mahdieh S. et al., [26] presented study, that a clear correlation between the *CTLA*-4 gene polymorphisms and susceptibility to SLE in the Iranian population. In contrast many of results disagreement with our result which finding, to show a positive association between -318C/T polymorphism and SLE. With deference to the *CTLA*-4 gene, there are many researches obtained that no linked were found between the *CTLA*-4 gene polymorphism -318C/T and SLE patients from many countries such as the Spain [27], USA [28], Korea [29], England [30], Malaysia [31], Japan [32].

Jie Liu and Hong-Xin Zhang reported by meta-analysis on the obtainable studies presented that the G allele was not significantly linked with increased SLE risk [33]. And also, when grouped into Asia and Europe, the + 49A/G site (rs231775) was still not significantly linked with SLE. Others did not find any association and did not consider it to be a risk factor for SLE [34; 35]. Other studies have described that no correlation between 318C/T polymorphism and SLE [36; 37].

Conclusions

According to our research, Iraqi patients' the susceptibility to SLE may be attributed to the *CTLA*-4 gene polymorphism -318C/T and +49A/G. SLE development has been linked to the polymorphism marker -318C>T and +49A>G in the *CTLA*-4 gene. In -318C/T polymorphism compared to allele carriers C and genotype C/C carriers, allele carriers T and genotype T/T and in +49A/G polymorphism allele carriers A and genotype A/A carriers, allele carriers G and genotype G/G have a greater risk of getting SLE.

Conflict of interest information. The authors declare no conflict of interest.

References

1. Yeo, N. K.-W., Lim, C. K., Yeung, K. N., Khoo, N. K. H., Arkachaisri, T., Albani, S., & Yeo, J. G. (2024). Genetic interrogation for sequence and copy number variants in systemic lupus erythematosus. *Frontiers in Genetics*, 15, 1341272. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1341272>.
2. Akhil, A., Bansal, R., Anupam, K., Tandon, A., & Bhatnagar, A. (2023). Systemic lupus erythematosus: Latest insight into etiopathogenesis. *Rheumatology International*, 43(8), 1381–1393. <https://doi.org/10.1007/s00296-023-05346-x>. EDN: <https://elibrary.ru/DDSKFV>
3. Alghamdi, S. A., Kattan, S. W., Toraih, E. A., Alrowaili, M. G., Fawzy, M. S., & Elshazli, R. M. (2021). Association of AIRE (rs2075876), but not CTLA4 (rs231775) polymorphisms with systemic lupus erythematosus. *Gene*, 768, 145270. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2020.145270>. EDN: <https://elibrary.ru/IIDULY>
4. GhodkePuranik, Y., Olferiev, M., & Crow, M. K. (2024). Systemic lupus erythematosus genetics: Insights into pathogenesis and implications for therapy. *Nature Reviews Rheumatology*, 20, 635–648. <https://doi.org/10.1038/s41584-024-01152-2>. EDN: <https://elibrary.ru/KRVTGO>
5. Olfe, L., von Hardenberg, S., Hofmann, W., Auber, B., Baumann, U., Beier, R., et al. (2023). CTLA4 insufficiency due to a novel CTLA4 deletion, identified through copy number variation analysis. *International Archives of Allergy and Immunology*, 184(1), 76–84. <https://doi.org/10.1159/000527051>. EDN: <https://elibrary.ru/HLAFBE>
6. Van Coillie, S., Wiernicki, B., & Xu, J. (2020). Molecular and cellular functions of CTLA4. In *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 1248, pp. 7–32). https://doi.org/10.1007/978-981-15-3266-5_2. EDN: <https://elibrary.ru/CNNTKJ>
7. Chen, L., Wang, Y. F., Liu, L., Bielowka, A., Ahmed, R., Zhang, H., Tombleson, P., Roberts, A. L., Odhams, C. A., Cunninghame, D. S., Zhang, X., Yang, W., Vyse, T. J., & Morris, D. L. (2020). Genomewide assessment of genetic risk for systemic lupus erythematosus and disease severity. *Human Molecular Genetics*, 29(10), 1745–1756. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddaa030>. EDN: <https://elibrary.ru/TNYVTQ>
8. Charras, A., Smith, E., & Hedrich, C. M. (2021). Systemic lupus erythematosus in children and young people. *Current Rheumatology Reports*, 23, 20. <https://doi.org/10.1007/s11926-021-00985-0>. EDN: <https://elibrary.ru/APKCUA>
9. Liphaut, B. L., Caramalho, I., RangelSantos, A., Silva, C. A., Demengeot, J., & CarneiroSampaio, M. M. S. (2020). LRBA deficiency: A new genetic cause of monogenic lupus. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 79, 427–428. <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2019-216410>. EDN: <https://elibrary.ru/ZHAXZW>
10. Scofield, R. H., Sharma, R., Aberle, T., Cooney Carisa, M., Kelly, J. A., Harley, J. B., & Rasmussen, A. (2023). Impact of race and ethnicity on family participation

- in systemic lupus erythematosus genetic studies. *Frontiers in Lupus*, 1, 1100534. <https://doi.org/10.3389/flupu.2023.1100534>.
11. Vinuesa, C. G., Shen, N., & Ware, T. (2023). Genetics of SLE: Mechanistic insights from monogenic disease and disease-associated variants. *Nature Reviews Nephrology*, 19, 558–572. <https://doi.org/10.1038/s41581-023-00732-x>. EDN: <https://elibrary.ru/DSEHMM>
 12. Gonzalez, L. A., Ugarte-Gil, M. F., Pons-Estel, G. J., Duran-Barragan, S., Toloza, S., Burgos, P. I., Bertoli, A., Borgia, R. E., & Alarcón, G. S. (2022). Addressing health disparities as a function of ethnicity in systemic lupus erythematosus patients. *Lupus*, 31, 1691–1705. <https://doi.org/10.1177/09612033221122983>. EDN: <https://elibrary.ru/CRKFNX>
 13. Dominguez, D., Kamphuis, S., Beyene, J., Wither, J., Harley, J. B., Blanco, I., Vila-Inda, C., Brunner, H., Klein-Gitelman, M., & McCurdy, D. (2021). Relationship between genetic risk and age of diagnosis in systemic lupus erythematosus. *The Journal of Rheumatology*, 48, 852–858. <https://doi.org/10.3899/jrheum.200002>. EDN: <https://elibrary.ru/AKLOOL>
 14. Morand, E. F., Fernandez-Ruiz, R., Blazer, A., & Niewold, T. B. (2023). Advances in the management of systemic lupus erythematosus. *BMJ*, 383, e073980. <https://doi.org/10.1136/bmj-2022-073980>. EDN: <https://elibrary.ru/HGQQNI>
 15. Qi, Y. Y., Zhai, Y. L., & Liu, X. R. (2020). Single nucleotide polymorphisms in PPARG associated with systemic lupus erythematosus in Chinese populations. *Journal of Immunology Research*, 31, 7285747. <https://doi.org/10.1155/2020/7285747>. EDN: <https://elibrary.ru/CYGFHI>
 16. Stankey, C. T., & Lee, J. C. (2023). Translating noncoding genetic associations into a better understanding of immunemediated disease. *Disease Models & Mechanisms*, 16, dmm049790. <https://doi.org/10.1242/dmm.049790>. EDN: <https://elibrary.ru/NSLIQU>
 17. Reid, S., Alexsson, A., & Frodlund, M. (2020). High genetic risk score is associated with early disease onset, damage accrual and decreased survival in systemic lupus erythematosus. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 79(3), 363–369. <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2019-216227>. EDN: <https://elibrary.ru/TTIUBQ>
 18. Sandling, J. K., Pucholt, P., & Hultin-Rosenberg, L. (2021). Molecular pathways in patients with systemic lupus erythematosus revealed by genocentred DNA sequencing. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 80(1), 109–117. <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2020-218636>. EDN: <https://elibrary.ru/LJOSLI>
 19. Jasiem, T. M., & Al-Husseini, R. M. (2024). The role of the APE1 Asp148Glu polymorphism on the risk of acute myeloid leukemia in Iraqi patients. *Baghdad Science Journal*, 21(4), 1162. <https://doi.org/10.21123/bsj.2023.8294>. EDN: <https://elibrary.ru/PKXUWE>

20. Rasool, G. S., Hussien, A. A., AlTayie, S. R., AlAwadi, S. J., & AlDahmoshi, H. O. M. (2024). Pharmacogenetics: Influence of CYP2C9*2 and *3 alleles polymorphisms on Iraqi type 2 diabetic patients. *Medical Journal of Babylon*, 21, 118–123. https://doi.org/10.4103/mjbl.mjbl_382_23. EDN: <https://elibrary.ru/NKSCUP>
21. Jasiem, T. M., & AlHusseini, R. M. (2023). The impact of the ERCC2 Lys751Gln polymorphism on the risk of acute myeloid leukemia in Iraqi patients. *Journal of Contemporary Medical Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.22317/jcms.v9i1.1308>. EDN: <https://elibrary.ru/VEVEVE>
22. Jasiem, T. M. (2022). Analysis of some candidate genes for rheumatoid arthritis of the Iraqi population. *International Journal of Drug Delivery Technology*, 12(1), 194–197. <https://doi.org/10.25258/ijddt.12.1.36>. EDN: <https://elibrary.ru/FFIGWP>
23. Obacad, W. R., AlSaadi, M. A. K., & Ali Akbar, A. H. (2023). Association of mycoplasma pneumoniae and (rs9271366) HLADRB1 gene polymorphism with the immune susceptibility to rheumatoid arthritis. *Medical Journal of Babylon*, 20, 511–516. https://doi.org/10.4103/mjbl.mjbl_191_23. EDN: <https://elibrary.ru/SNFTXN>
24. Ahmed, S., Ihara, K., & Kanemitsu, S. (2001). Association of CTLA4 but not CD28 gene polymorphisms with systemic lupus erythematosus in the Japanese population. *Rheumatology*, 40, 662–667. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/40.6.662>. EDN: <https://elibrary.ru/IYLTYY>
25. Sugimoto, K., Fujita, S., & Yanagida, H. (2008). Clinical manifestations and analyses of the cytotoxic Tlymphocyte associated4 gene in two Japanese families with systemic lupus erythematosus. *Clinical and Experimental Nephrology*, 12, 149–154. <https://doi.org/10.1007/s10157-007-0019-0>.
26. Ulker, M., Yazisiz, V., & Sallakci, N. (2009). CTLA4 gene polymorphism of exon 1 (+49 A/G) in Turkish systemic lupus erythematosus patients. *International Journal of Immunogenetics*, 36, 245–250. <https://doi.org/10.1111/j.1744-313X.2009.00856.x>.
27. Devaraju, P., Gulati, R., Singh, B. K., Mithun, C. B., & Negi, V. S. (2014). The CTLA4 +49 A/G (rs231775) polymorphism influences susceptibility to SLE in South Indian Tamils. *Tissue Antigens*, 83, 418–421. <https://doi.org/10.1111/tan.12363>.
28. Mahdich, S., Mehrdad, A., Mahsa, A., Naemeh, J., Fatemeh, S., Patricia, K., Alijan, T., & Abbas, A. (2017). Association between 318C/T polymorphism of the CTLA4 gene and systemic lupus erythematosus in Iranian patients. *International Journal of Rheumatic Diseases*, 20(12), 2040–2044. <https://doi.org/10.1111/1756-185X.12275>.
29. Aguilar, F., Torres, B., SanchezRoman, J., NunezRoldan, A., & GonzalezEscribano, M. F. (2003). CTLA4 polymorphism in Spanish patients with systemic lupus erythematosus. *Human Immunology*, 64, 936–940. [https://doi.org/10.1016/s0198-8859\(03\)00171-x](https://doi.org/10.1016/s0198-8859(03)00171-x).
30. Heward, J. M., Allahabadia, A., & CarrSmith, J. (1998). No evidence for allelic association of a human CTLA4 promoter polymorphism with autoim-

- mune thyroid disease in either populationbased casecontrol or familybased studies. *Clinical Endocrinology*, 49, 331–334. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2265.1998.00542.x>.
31. Chua, K. H., Puah, S. M., Chew, C. H., Tan, S. N., & Lian, L. H. (2010). Study of the CTLA4 gene polymorphisms in systemic lupus erythematosus (SLE) samples from Malaysia. *Annals of Human Biology*, 37, 274–280. <https://doi.org/10.3109/03014460903325185>.
 32. Takeuchi, F., Kawasugi, K., Nabeta, H., Mori, M., & Tanimoto, K. (2003). CTLA4 dimorphisms in Japanese patients with systemic lupus erythematosus. *Clinical and Experimental Rheumatology*, 21, 527–528.
 33. Jie, L., & HongXin, Z. (2013). CTLA4 polymorphisms and systemic lupus erythematosus: A comprehensive metaanalysis. *Genetic Testing and Molecular Biomarkers*, 17(3), 226–231. <https://doi.org/10.1089/gtmb.2012.0302>.
 34. Matsushita, M., Tsuchiya, N., & Shiota, M. (1999). Lack of a strong association of CTLA4 exon 1 polymorphism with the susceptibility to rheumatoid arthritis and systemic lupus erythematosus in Japanese: An association study using a novel variation screening method. *Tissue Antigens*, 54, 578–584. <https://doi.org/10.1034/j.1399-0039.1999.540607.x>.
 35. Parks, C. G., Hudson, L. L., & Cooper, G. S. (2004). CTLA4 gene polymorphisms and systemic lupus erythematosus in a populationbased study of whites and African Americans in the southeastern United States. *Lupus*, 13, 784–791. <https://doi.org/10.1191/0961203304lu1085oa>.
 36. Hudson, L. L., Rocca, K., Yeong, W., Janardan, S., & Pandey, P. (2002). CTLA4 gene polymorphisms in systemic lupus erythematosus: A highly significant association with a determinant in the promoter region. *Human Genetics*, 111, 452–455. <https://doi.org/10.1007/s00439-002-0807-2>. EDN: <https://elibrary.ru/BECBWT>

DATA ABOUT THE AUTHOR

Thamer Mouhi Jassem, PhD, Assistant Professor, Department of Microbiology
College of Science, AL-Karkh University of Science
Baghdad, Iraq
thamerm@kus.edu.iq
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3492-9128>
ResearcherID: N-4596-2017
Scopus Author ID: 57190495864

Поступила 09.01.2026

После рецензирования 17.02.2026

Принята 26.03.2026

Received 09.01.2026

Revised 17.02.2026

Accepted 26.03.2026

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1814](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1814)EDN: [HFKZDT](https://www.edn.ru/HFKZDT)

УДК 591.1.632.939:591.616.619



Морфофункциональные изменения системы крови и органов периферической иммунной системы у морских свинок при экспериментальном моделировании трихинеллезной инвазии и иммунной недостаточности

О.Б. Жданова^{1,2}, О.В. Часовских¹¹Вятский ГАТУ, Киров, Российская Федерация²ВНИИП – филиал ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Морские свинки – перспективная модель для изучения инфекционных и неинфекционных заболеваний, благодаря сходству их иммунологических механизмов с человеческими. Они активно используются для моделирования экспериментальных патологий.

Цель исследования – сравнительное изучение вторичной иммунной недостаточности при инвазии *T. pseudospiralis* и *T. spiralis* и анализ гематологических и иммуноморфологических показателей.

Материалы и методы. Объектом исследования служили морские свинки массой 250-260 грамм. Исследование проводилось на морских свинках (*Cavia porcellus*), массой 250-260 г. Созданы четыре группы по пять животных: первая – перорально инвазирована 10 личинками *Trichinella pseudospiralis* (10 личинок/г массы тела); вторая – 10 личинками *Trichinella spiralis*; третья – с иммуносупрессией, вызванной дексаметазоном; четвертая – контрольная группа. После завершения экспериментального исследования, направленного на моделирование трихинеллезной инвазии у морских свинок в условиях искусственно индуцированной иммунной недостаточности, были проведены иммуноморфологические исследования, с целью детального сравнения изменений в системе крови и органах периферической иммунной системы для оценки патофизиологических механизмов, обусловленных данным патогенным воздействием. Также в рамках настоящего исследования предпринята попытка детального описания распределения личинок и иммуноморфологических показателей у морских свинок, инвазированных *Trichinella pseudospiralis* и *Trichinella spiralis*.

Результаты. Установлено, что при инвазии *Trichinella pseudospiralis* распределение личинок в мышечной ткани более равномерно по сравнению с трихинеллезом, вызванным *Trichinella spiralis*. При анализе гематологических показателей установлено значительное снижение количества эритроцитов и гемоглобина в группах инвазированных животных. Иммуноморфологические показатели, определяющие состояние лимфоидной ткани, ассоциированной с кишечником не имели значительных отличий у животных, инвазированных *T. pseudospiralis* и *T. spiralis*, и животных с иммунодефицитом. Несмотря на то, что при изучении распределения личинок отметили корреляцию в заселении ими отдельных групп мышц, Установлено, что данное животное является оптимальной моделью для воспроизведения и изучения иммунологических аспектов патогенеза трихинеллеза. Описаны наиболее важные гематологические и иммуноморфологические показатели у животных, инвазированных *T. pseudospiralis* и *T. spiralis* и установлено, что при одинаковых дозах заражения общее количество личинок *T. pseudospiralis* значительно превосходило количество *T. spiralis*.

Морские свинки – перспективная модель для изучения инфекционных и неинфекционных патологий, включая иммунологические аспекты трихинеллеза. Они близки к человеку по ключевым параметрам систем комплемента и гистосовместимости, а также имеют сходство во многих белках.

Ключевые слова: экспериментальная модель; морская свинка; трихинеллез; иммуноморфологические показатели; гематологические исследования

Для цитирования. Жданова, О. Б., & Часовских, О. В. (2026). Морфофункциональные изменения системы крови и органов периферической иммунной системы у морских свинок при экспериментальном моделировании трихинеллезной инвазии и иммунной недостаточности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 73–88. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1814>

Morphofunctional changes of the blood system and peripheral immune system organs in rabbits during experimental modeling of trichinella invasion and immune deficiency

O.B. Zhdanova^{1,2}, O.V. Chasovskikh¹

¹*Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russian Federation*

²*All-Russian Research Institute of Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plants, Moscow, Russian Federation*

Abstract

Background. Guinea pigs are a promising model for studying infectious and non-infectious diseases, due to their similar immunological mechanisms to those of humans.

The **purpose** of this study was to compare the secondary immune deficiency caused by *T. pseudospiralis* and *T. spiralis* infections and to analyze hematological and immunomorphological parameters.

Materials and methods. The object of the study was guinea pigs weighing 250-260 grams. The study was conducted on guinea pigs (*Cavia porcellus*) weighing 250-260 g. Four groups of five animals were created: the first group was orally infected with 10 *Trichinella pseudospiralis* larvae (10 larvae/g of body weight); the second group was infected with 10 *Trichinella spiralis* larvae; the third group was immunosuppressed with dexamethasone; and the fourth group was a control group. After the completion of an experimental study aimed at modeling trichinosis in guinea pigs under conditions of artificially induced immune deficiency, immunomorphological studies were conducted to compare in detail the changes in the blood system and organs of the peripheral immune system in order to assess the pathophysiological mechanisms caused by this pathogenic effect. This study also attempts to describe in detail the distribution of larvae and immunomorphological findings.

Results. It was found that in *Trichinella pseudospiralis* infection, the distribution of larvae in muscle tissue is more uniform than in *Trichinella spiralis* infection. When analyzing hematological parameters, a significant decrease in the number of red blood cells and hemoglobin was observed in the groups of infected animals. Immunomorphological parameters that determine the condition of the lymphoid tissue associated with the intestine did not show significant differences between animals infected with *T. pseudospiralis* and *T. spiralis*, and animals with immunodeficiency. Despite the fact that the distribution of larvae was correlated with their settlement in certain muscle groups, this animal was found to be an optimal model for reproducing and studying the immunological aspects of the pathogenesis of trichinosis. The most important hematological and immunomorphological parameters in animals infected with *T. pseudospiralis* and *T. spiralis* were described, and it was found that, at the same doses of infection, the total number of *T. pseudospiralis* larvae significantly exceeded the number of *T. spiralis*.

Guinea pigs are a promising model for studying infectious and non-infectious pathologies, including the immunological aspects of trichinosis. They are similar to humans in terms of key parameters of the complement and histocompatibility systems, as well as in many proteins.

Keywords: experimental model; guinea pig; trichinosis; immunomorphological indicators; hematological studies

For citation Zhdanova, O. B., & Chasovskikh, O. V. (2026). Morphofunctional changes of the blood system and peripheral immune system organs in rabbits during experimental modeling of trichinella invasion and immune deficiency. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 73–88. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1814>

Введение

Вторичные иммунодефициты нередко развиваются при нематодозах, как патологическое состояние, характеризующееся дефектом ряда звеньев иммунного ответа, что приводит к нарушению функций не только периферической, но и центральной иммунной системы в целом. Хотя эти иммунодефициты не обусловлены генетическими дефектами, а являются следствием длительно протекающего процесса, нередко тяжесть возникающих патологий бывает трудно поддающейся коррекции. Вышесказанное обусловлено тем, что практически все нематоды выделяют иммуносупрессивные факторы, которые подавляют защитные реакции организма хозяина. Супрессия может наблюдаться в различных звеньях иммунной системы: лимфоцитарном, макрофагальном, гранулоцитарном, комплементном и других. Гельминты также влияют на показатели врождённой резистентности: угнетают фагоцитарную активность лейкоцитов и стойко снижают титр комплемента по сравнению с неинвазированными животными.

Состояние иммунодефицита отрицательно влияет на резистентность животных к вторичным инфекциям, приводит к затяжному течению и к последующему формированию микстинвазий. Таким образом, изучение иммунного ответа при трихинеллезе имеет большое практическое и теоретическое значение. В настоящее время для моделирования иммунной недостаточности используются практически все лабораторные животные, так, например, часто используются морские свинки (*Cavia porcellus*). Это связано с тем, что морские свинки – лабораторные животные, которые имитируют некоторые аспекты иммунных реакций, характерные для человека.

Имеются следующие общепринятые методы моделирования патологий иммунной системы у морских свинок:

1. Экспериментальное инфицирование. Например, введение клеточной взвеси лимфоцитов, полученной от больной лейкозом коровы, внутривенно. Это вызывает трансформацию показателей иммунного статуса: увеличение числа лейкоцитов, общего числа лимфоцитов и их субпопуляций, снижение относительного содержания Т-лимфоцитов, усиление ферментной и неферментной активности нейтрофилов. Не менее интересным является изучение динамики нейтрализующих антител после введения экспериментального хантавирусного вакцинного препарата на основе вируса Пуумала. Результаты показали, что интенсивность иммунного ответа зависела от дозы вводимого иммуногена, а бустерное введение иммуногена через 3 месяца от начала иммунизации усиливало иммунный ответ пропорционально вводимой дозе.

2. Моделирование гиперчувствительности замедленного типа (ГЗТ). Например, внутрикожное введение авирулентных микобактерий (штамм BCG). Антигенный состав аттенуированных микобактерий близок к патогенным, что моделирует ГЗТ, адекватную инфекционному процессу.

3. Феномен Артюса нередко воспроизводится при многократном введении сыворотки (используется для демонстрации ГЗТ на занятиях по патофизиологии), а также экспериментальные модели астмы (введение овальбумина) и анафилактического шока

4. Исследование эффективности препаратов пиримидинового ряда на модели поражения сердца, вызванного длительным раздражением глоточных рецепторов и последующей сенсibilизацией комплексным аллергеном. В результате длительного раздражения глоточных рецепторов и сенсibilизации комплексным аллергеном у морских свинок было получено экспериментальное поражение сердца, похожее на ревмокардит у людей, сопровождавшееся изменением картины крови и угнетением Т-системы иммунитета.

5. Также в экспериментах по моделированию иммунной недостаточности у морских свинок используют, для изучения действия на иммунную систему иммуномодуляторов. Например, препараты на основе РНК, которые стимулируют иммунную систему, или конъюгаты на основе антигенов вакцинного штамма БЦЖ, которые оказывают иммуностимулирующее действие. Также вводят препараты, влияющие на факторы антиинфекционной защиты. Например, внутримышечное введение препарата «гистохром» у морских свинок с экспериментальным стафилококковым конъюнктивитом, который повышает активность фагоцитарного звена врождённого иммунитета и ферментных систем.

Данное исследование рассматривает возможность расширения использования морских свинок (*Cavia porcellus*) в изучении иммунодефицитных состояний в биомоделировании. Эти грызуны, относящиеся к семейству свинок (Caviidae), имеют длину тела 25-35 см и вес взрослых самцов 1-1,5 кг. Молодые самки весят 700-900 г, а старшие особи – более 1 кг. Домашние морские свинки (*Cavia porcellus*) и их дикие родственники (*Cavia tschudii*) обитают в Южной Америке. Окрас и структура шерсти у этих животных зависят от линии разведения. В лабораториях, хотя и редко, можно встретить альбиносов, но белые крысы и мыши все же остаются более популярными объектами исследований. Половая зрелость у морских свинок наступает довольно рано, но их продолжительность жизни значительно длиннее, чем у лабораторных грызунов (они могут прожить 3,5 года и

больше, а в исключительных случаях, при благоприятных условиях, до 8 лет и более). [1; 9; 14]. Морские свинки впервые использованы как лабораторные животные в 80-х годах XVIII века А.Л. Лавуазье для измерения теплопродукции. Они широко применяются в биологии и медицине, включая донорство компонентов крови и органов. На них моделируют метаболические нарушения, атеросклероз, астму и инфекционные заболевания, включая туберкулез и стафилококкоз. Экспериментальная модель астмы на морских свинках была представлена в 1937 году P. Kallós и W. Pagel. [6; 7; 10-14]. На основании вышесказанного была предпринята попытка воспроизведения иммунной недостаточности и инвазии морских свинок *T. pseudospiralis* и *T. spiralis*. Ранее Б.Л. Гаркави (1974) отметил, что морские свинки более восприимчивы к *T. pseudospiralis*, чем к *T. spiralis*. При одинаковых дозах заражения *T. pseudospiralis* вызывал в 28 раз более интенсивную инвазию, а в мышцах обнаруживалось почти в 2 раза больше личинок [2; 3; 5; 8]. Исследование иммунной недостаточности при нематодозах и экспериментально воспроизведенной иммунной недостаточности, не только позволяет изучить множество аспектов его патогенеза, но и открывает перспективы для использования зараженных животных в качестве источника личинок. Эти личинки, в свою очередь, служат для производства антигена, который активно применяется в диагностических целях.

Целью исследования было сравнительное изучение вторичной иммунной недостаточности при инвазии *T. pseudospiralis* и *T. spiralis* и анализ гематологических и иммуноморфологических показателей.

Материалы и методы

Объектом исследования служили морские свинки массой 250-260 грамм. Методом аналогов были сформированы четыре группы морских свинок, каждая из которых включала пять особей. Животные первой группы подвергались инвазии десятью личинками *Trichinella pseudospiralis* в расчете на один грамм массы тела перорально. Морские свинки второй группы инвазировались аналогичным количеством личинок *Trichinella spiralis*. у морских свинок третьей группы была искусственно индуцирована экспериментальная иммуносупрессия с использованием дексаметазона, четвертая группа служила контролем. В течение последующих шестидесяти дней после заражения все животные содержались в стандартных условиях вивария. Максимальная суточная доза дексаметазона, вводимая парентерально, при моделировании иммунной недостаточности не превышает минимальной токсической, что позволяет избежать побочных

эффектов, характерных для других иммуносупрессоров, таких как доксорубин. Это делает модель максимально приближенной к особенностям вторичной иммунной недостаточности. Все манипуляции с животными проводились в соответствии с нормами, утвержденными Хельсинской декларацией, и в соответствии с протоколом, одобренным этическим комитетом (дата утверждения: 10.03.2025). Морским свинкам из опытной группы трехкратно внутрибрюшинно вводили по 1 мл раствора дексаметазона, содержащего 40 микрограммов активного вещества.

В процессе эвтаназии брали кровь, группы мышц и образцы лимфоидной ткани кишечника при трихинеллезе и иммунной недостаточности, затем проводили патанатомическое исследование ряда органов системы крови и иммунной защиты. Личинок исследовали методами компрессорной трихинеллоскопии и пептолиза. Определяли количество и дифференцировали лейкоциты в камере Горяева, используя метод окраски азур-эозином по Романовскому-Гимзе. После выведения животных из эксперимента макро- и микроскопически исследовали паренхиматозные органы и кишечник, для просветления использовали 1% уксусную кислоту (его измеряли, расправляли, промывали и готовили плоскостные препараты для изучения лимфоидной ткани по методу Hellman, 1921). На тотальных препаратах анализировали количество, размер, форму и расположение лимфоидных узелков и сгруппированных образований. Также исследовали селезенку и лимфоузлы. Описания морфологических структур следовали официальной терминологии. Все манипуляции с животными проводили в соответствии с рекомендациями Commission of the European Communities, 86/609/EEC [7; 9].

Результаты

При исследовании методами КТ и пептолиза обнаружили, что все морские свинки были инвазированы как *T. spiralis*, так и *T. pseudospiralis*. ИИ для *T. spiralis* составило 22 ± 3 личинки на срез, в то время как для *T. pseudospiralis* этот показатель достиг 43 ± 5 личинок. Все обнаруженные личинки *T. pseudospiralis* были жизнеспособны и проявляли активность. Хотя было выявлено коррелирующее распределение личинок по отдельным группам мышц (см. таблицу 1), у животных, заражённых *T. pseudospiralis*, личинки распределялись более равномерно.

У морских свинок, инфицированных *T. pseudospiralis*, уровень эритроцитов оказался ниже, чем у животных из других групп, составляя $4,3 \pm 0,5 \times 10^{12}/л$, у инвазированных *T. spiralis*, количество эритроцитов находилось почти на нижней границе нормы – $4,4 \pm 0,5 \times 10^{12}/л$, а при ис-

кусственно вызванной иммунной недостаточности показатель составил $4,5 \times 10^{12}/л$, тогда как в контрольной группе он достигал $5,6 \pm 0,5 \times 10^{12}/л$. В соответствии с данными М.В. Мирошникова, М.А. Ковалевой, К.Т. Султановой и М.Н. (2024), нормальные значения для самок находятся в диапазоне $4,4-6,1 \times 10^{12}/л$ [7]. Уровень гемоглобина у животных, заражённых *T. pseudospiralis* и *T. spiralis*, был на нижней границе нормы: $11,5 \pm 0,5$ г/дл и $11,9 \pm 0,5$ г/дл соответственно. У иммунодефицитных особей этот показатель также находился на уровне $11,5 \pm 0,5$ г/дл. В контрольной группе уровень гемоглобина был выше: $12,5 \pm 0,5$ г/дл (при референтном интервале для самок 11–16 г/дл, учитывая, что у морских свинок достаточно широкий диапазон нормальных значений).

Таблица 1.

Количество личинок трихинелл *T. spiralis*, так и *T. pseudospiralis* при экспериментальном трихинеллезе

Table 1. Number of Trichinella larvae (both *T. spiralis* and *T. pseudospiralis*) in experimental trichinosis

Группа мышц	Среднее количество личинок в срезе при инвазии <i>T. pseudospiralis</i>	Среднее количество личинок в срезе при инвазии <i>T. spiralis</i>
Мышцы головы и шеи:	$39,9 \pm 0,5$	$20,5 \pm 1,5$
Мышцы грудной конечности:	$36,5 \pm 0,05$	$16,5 \pm 2,5$
Диафрагма и мышцы туловища	$36,6 \pm 0,1$	$21,5 \pm 0,05$
Мышцы задней конечности:	$33,2 \pm 0,05$	$26,1 \pm 0,05$

$p \leq 0,5$

Количество лейкоцитов у животных, инфицированных *T. pseudospiralis*, было увеличено до $15,5 \pm 1,5 \times 10^9/л$, а у особей с *T. spiralis* – до $14,6 \pm 0,5 \times 10^9/л$. У иммуноскомпрометированных животных этот показатель был снижен до $5,4 \times 10^9/л$. В контрольной группе уровень лейкоцитов был $8,7 \pm 0,5 \times 10^9/л$, что в пределах нормы для самок морских свинок, по данным М.В. Мирошникова и соавторов (2024), составляют $3,1-17 \times 10^9/л$. Лимфоциты составляли 74,0% (73–75%) в общем лейкоцитарном профиле, наблюдалось значительное увеличение количества псевдоэозинофилов (гетерофилов) до 19,0%. При дифференциации лейкоцитов у морских свинок учитывалось, что нейтрофильные гранулоциты содержат эозинофильные гранулы ярко-оранжево-розового цвета и называются псевдоэозинофилами или гетерофилами. При инвазии *Trichinella pseudospiralis* и *Trichinella spiralis* их количество увеличивалось до 6,5% и 4,5% соответственно, тогда как в

контрольной группе оно составляло 3%, а у иммунодефицитных животных – 1,3%.

После выведения животных из эксперимента макроскопически грубых изменений в паренхиматозных органах ни в одной группе не выявлено. Гистологически в почках выявлены единичные слущенные клетки в просвете дистальных канальцев и умеренная гиперемия гломерулярного аппарата у инвазированных *T. pseudospiralis* и *T. spiralis*, животных. При осмотре печени при вскрытии отмечено незначительное полнокровие у морских свинок, инвазированных *T. pseudospiralis*, у остальных групп состояние органов соответствовало контрольной группе. При световой микроскопии у инвазированных лабораторных животных обеих групп наблюдался застой в кровообращении печени и центральных венах.

Со стороны лимфоидных органов отмечали усиление их функции у инвазированных животных, у них отмечалось увеличение массы селезенки в 1,2 раза (*T. spiralis*) и в 1,3 (*T. pseudospiralis*), а также длины в 1,4 раза (*T. spiralis*) и 1,5 раза (*T. pseudospiralis*) по отношению к аналогичным показателям у интактных животных, у животных с иммунной недостаточностью размеры и масса селезенки не отличались от контрольной группы. В тоже время при гистологических исследованиях отмечали умеренную гиперплазию белой пульпы, подобные изменения отмечали у кур_несушек, инвазированных *T. pseudospiralis* [4]. Изменения в регионарных лимфатических узлах (подколенных) у инвазированных животных характеризовались увеличением массы ($0,042 \pm 0,01$ г *T. spiralis*, $0,049 \pm 0,01$ г *T. pseudospiralis*) у морских свинок с иммунной недостаточностью масса лимфоузлов составила $0,021 \pm 0,005$ г, а у интактных $0,032 \pm 0,01$ г. В целом реакция в лимфатических узлах заключалась в регистрации различной степени активации отдельных фолликулов и появлении фолликулов со светлыми центрами.

В рамках исследования, посвященного изучению патологических изменений в кишечнике морских свинок при трихинеллёзе, было установлено, что длина кишечника у экспериментальных животных не претерпела значительных изменений. Это связано с тем, что морские свинки были рандомизированы по длине тела, которая составила $26,5 \pm 1,5$ см, при вскрытии обнаружено, что общая длина кишечника варьировала как у опытных, так и у контрольных животных и составила $208,4 \pm 67,2$ см и $199 \pm 36,1$ см у инвазированных животных $179 \pm 26,2$ см (у животных с иммунной недостаточностью) и $214,75 \pm 17,5$ см в контрольной группе. При морфологическом исследовании слизистой оболочки кишечника отмечено, что собственная

пластинка формирует у всех животных ворсинки и крипты, однако важно отметить, что диффузная лимфоидная ткань была выявлена только у инвазированных животных, что свидетельствует о её активации в ответ на патогенное воздействие. Слепоободочный клапан играет ключевую роль в задержке антигенов трихинелл, поэтому лимфоидная ткань в этой области проявляет более выраженную активность у инвазированных животных. Средняя площадь лимфоидных узелков составила $0,00025\text{см}^2$ в контрольной группе, $0,0002\text{см}^2$ у животных с иммунодефицитом и $0,00029\text{см}^2$ у инвазированных особей. В сгруппированной лимфоидной ткани кишечника отмечали увеличение длины пейеровых бляшек в группах с инвазией в 1,3 раза по сравнению с контролем, в группе с экспериментальной иммунной недостаточностью отличий от контрольной группы не наблюдали. Однако, при введении дексаметазона отмечено уменьшение количества лимфоидных узелков со светлыми центрами, а в группах инвазированных животных – их увеличение. При микроскопии гистологических препаратов животных с трихинеллезом, как *T. spiralis*, так и *T. pseudospiralis*, отмечено, что как сгруппированная лимфоидная ткань, так и собственная пластинка и неоформленная соединительная ткань ворсинок, содержат лимфоциты, в т.ч. большие плазмобласты, секретирующие иммуноглобулин А (IgA), и эозинофилы. Плазмобласты живут около 8 дней, но их количество увеличено и у животных, эвтаназированных на 60-й день инвазии, обеспечивая местный иммунитет. Они располагались группами, отличаясь ядрами, напоминающими «колесо со спицами», у животных контрольной группы также отмечали наличие плазмобластов. Высокая плотность плазматических клеток в собственной пластинке кишечника важна для синтеза IgA, который обладает антибактериальной и противопаразитарной активностью. У животных, с иммунной недостаточностью отмечали незначительное их уменьшение. Также в кишечнике инвазированных животных отмечено увеличение количества эозинофилов.

При инвазии *Trichinella pseudospiralis* личинки лучше приживаются у морских свинок, чем у белых крыс, и более равномерно распределяются в мышцах. Полученные данные показывают различия в иммунном ответе на инвазию в зависимости от вида паразита у лабораторных животных. Иммунный ответ при мышечной стадии трихинеллеза характеризуется смещением равновесия между клеточным и гуморальным иммунитетом в сторону последнего, что иллюстрирует активация лимфоидных элементов периферической иммунной системы. Необходимо отметить перспективность использования морских свинок для иммунологических

исследований, в качестве модели изучения иммунитета при трихинеллёзе обосновано их генетической близостью к человеку по составу иммунных белков и молекул. Несмотря на общепринятое мнение о том, что инвазия этими нематодами вызывает иммунодефицитное состояние, в экспериментах с дозой 10 личинок трихинелл на грамм, не только не было выявлено выраженного снижения показателей в лейкограмме, но даже отмечена незначительная стимуляция лимфоидной ткани ПТ и селезенки. Отмечены изменения со стороны красной крови (снижение количества эритроцитов и гемоглобина).

В частности, моделирование на морских свинках различных патологий позволяет проводить детальный анализ продукции ключевых цитокинов (интерлейкинов, в т.ч. ИЛ12 и интерферонов), а также исследовать реакции гиперчувствительности немедленного и замедленного типа. Эти свойства делают данную модель незаменимым объектом для углубленного изучения патогенеза и разработки терапевтических стратегий в области иммунологии, инфекционных и паразитарных заболеваний. Лабораторные мыши также широко используются для моделирования трихинеллезной инвазии из-за простоты и низкой стоимости содержания. Чаще всего применяются беспородные белые мыши, но предпочтительнее линии с изученным иммунным статусом и их гибриды. В контексте исследований, направленных на изучение патогенеза трихинеллёза, была продемонстрирована эффективность рекомбинантного белка гTs-Adsp у мышей линии BALB/c. При экспериментальном его введении наблюдалось значительное снижение количества личинок (на 46,5%), что свидетельствует о его способности повышать противопаразитарный иммунитет. Кроме того, важным аспектом в изучении трихинеллёза является использование трансгенных моделей мышей, характеризующихся гиперпродукцией интерлейкинов (ИЛ4 и ИЛ5) и крыс. Эти модели позволяют проводить детальный анализ иммунных и аллергических реакций, индуцированных паразитарной инвазией, что способствует более глубокому пониманию патофизиологических механизмов данного заболевания [12-15].

Таким образом, при моделировании иммунной недостаточности, вызванной введением дексаметазона и моделировании трихинеллезной инвазии, морские свинки имеют значительные преимущества перед другими лабораторными животными. Широкое их использование в экспериментальной ветеринарии и медицине ограничено лишь дефицитом специфических реагентов для анализа цитокинов, хемокинов и антител. Это обуславливает предпочтение более изученных моделей, таких как лабораторные мыши и

крысы. Учитывая вышесказанное, для современной биологии и медицины весьма перспективно создание специфических тест-систем для определения наиболее важных показателей для оценки иммунного статуса данных животных, и вполне возможно, разработок схем лечения с использованием препаратов с иммуностропной активностью [6; 7; 12-14; 17].

Выводы

Морские свинки перспективны для моделирования инфекционных и неинфекционных патологий. Они удобны для изучения иммунологических процессов и являются оптимальной моделью для исследования иммунологических аспектов патогенеза трихинеллеза. Особенно важно отметить, что они близки к человеку по ключевым параметрам ряда систем, таким как система комплемента, комплекс гистосовместимости, несомненное сродство имеют многие белки. В рамках настоящего исследования предпринята попытка детального описания распределения личинок и иммуноморфологических показателей у морских свинок, инвазированных *Trichinella pseudospiralis* и *Trichinella spiralis*, установлено, что при инвазии *Trichinella pseudospiralis* распределение личинок в мышечной ткани более равномерно по сравнению с трихинеллезом, вызванным *Trichinella spiralis*. При анализе гематологических показателей установлено значительное снижение количества эритроцитов и гемоглобина в группах инвазированных животных. Иммуноморфологические показатели, определяющие состояние лимфоидной ткани, ассоциированной с кишечником не имели значительных отличий у животных, инвазированных *T. pseudospiralis* и *T. spiralis*, и животных с иммунодефицитом.

Информация о спонсорстве. Материалы подготовлены при поддержке гранта Минсельхоз, 2025.

Список литературы

1. Ацапкина, А. А., Крышень, К. Л., Кастинова, А. Е., Макарова, М. Н., & Макаров, В. Г. (2014). Иммунологический статус лабораторных животных при моделировании состояний гиперчувствительности немедленного типа. *Международный вестник ветеринарии*, (1), 91–99.
2. Бландова, З. К., Душкин, В. А., Малашенко, А. М., & Шмидт, Е. Ф. (1983). *Линии лабораторных животных для медико-биологических исследований*. Наука.
3. Жданова, О. Б., Андреянов, О. Н., Часовских, О. В., Успенский, А. В., & Соболева, О. А. (2024). Особенности иммунологической и постмортальной диагностики

- ки трихинеллеза свиней, вызванного *T. pseudospiralis*. *Свиноводство*, 8, 35–37. <https://doi.org/10.37925/0039-713X-2024-8-35-37>. EDN: <https://elibrary.ru/TTRTVV>
4. Жданова, О. Б., Часовских, О. В., & Успенский, А. В. (2024). Влияние экспериментальной инвазии *T. pseudospiralis* на морфологию селезёнки куриц (*Gallus domesticus*). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 167–185. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1155>. EDN: <https://elibrary.ru/IZOLXI>
 5. Жданова, О. Б., Успенский, А. В., Написанова, Л. А., Часовских, О. В., Россохин, Д. В., Андреев, О. Н., Малышева, Н. С., & Качанова, Е. О. (2023). Влияние интенсивности инвазии на морфологические характеристики личинок *Trichinella spiralis* при экспериментальном заражении белых крыс и распределение их в мышцах. *Российский паразитологический журнал*, 1, 74–83. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2023-17-1-74-83>. EDN: <https://elibrary.ru/NBOGKJ>
 6. Макарова, М. Н., & Макаров, В. Г. (2024). Использование морских свинок в доклинических исследованиях. *Лабораторные животные для научных исследований*, 2, 4–26. <https://doi.org/10.57034/2618723X-2024-02-01>. EDN: <https://elibrary.ru/LNPQKI>
 7. Мирошников, М. В., Султанова, К. Т., Ковалева, М. А., & Макарова, М. Н. (2022). Вариабельность биохимических показателей крови и установление референтных интервалов в доклинических исследованиях. Сообщение 7: морские свинки. *Лабораторные животные для научных исследований*, 3, 4–15. <https://doi.org/10.57034/2618723X-2022-03-01>. EDN: <https://elibrary.ru/NMQMUR>
 8. Норматов, Р. А., & Марьяновская, Ю. В. (2017). Лимфоидная ткань кишечника как основа иммунной системы пищеварительного тракта. *Молодой ученый*, 20(154), 201–203. EDN: <https://elibrary.ru/YPECXV>
 9. Райсов, Т. К., Темирбеков, Д. А., Архипов, Г. С., & Озерецковская, Н. Н. (1990). Изменения в инвазионном процессе и иммунном ответе хозяина во время лечения мебендазолом и вольтареном экспериментального трихинеллёза у морских свинок. *Медицинская паразитология*, 2, 31–35.
 10. Слесаренко, Н. А., Комякова, В. А., & Степанишин, В. В. (2019). Морфофункциональная характеристика кишечника у представителей отряда грызунов. *Лабораторные животные для научных исследований*, 3, 1. <https://doi.org/10.2929/6/2618723X-2019-03-01>. EDN: <https://elibrary.ru/PVCYTN>
 11. Трегубова, Н. В., Исмаилов, И. С., & Ткаченко, М. А. (2013). Морские свинки - биологические объекты научных исследований. *Вестник АПК Ставрополя*, 4(12), 211–215. EDN: <https://elibrary.ru/QADRDN>
 12. Catty, D. (1969). *The immunology of nematode infections. Trichinosis in guinea-pigs as a model*. *Monogr Allergy*, 5, 1–134. <https://doi.org/10.1159/isbn.978-3-8055-0436-2>

13. Card, S. E., Tompkins, S. F., & Brien, J. F. (1989). Ontogeny of the activity of alcohol dehydrogenase and aldehyde dehydrogenases in the liver and placenta of the guinea pig. *Biochemical Pharmacology*, 38(15), 2535–2541. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(89\)90099-3](https://doi.org/10.1016/0006-2952(89)90099-3)
14. Kim, C. W. (1966). Delayed hypersensitivity to *Trichinella spiralis* antigens in irradiated guinea pigs. *The Journal of Parasitology*, 52(4), 722–726. <https://doi.org/10.2307/3276440>
15. Kallós, P., & Pagel, W. (1937). Experimentelle Untersuchungen über Asthma bronchiale. *Acta Medica Scandinavica*, 91, 292–305. <https://doi.org/10.1111/j.0954-6820.1937.tb16045.x>
16. Himeno, S., Takekawa, A., Toyoda, H., & Imura, N. (1993). Tissue-specific expression of glutathione peroxidase gene in guinea pigs. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1173(3), 283–288. [https://doi.org/10.1016/0167-4781\(93\)90125-W](https://doi.org/10.1016/0167-4781(93)90125-W)
17. Rudneva, O. V., Napisanova, L. A., Zhdanova, O. B., & Berezhko, V. K. (2018). Evaluation of the protective activity of different immunostimulatory drugs at the experimental trichinosis on white mice. *International Journal of High Dilution Research*, 17(2), 17–18. EDN: <https://elibrary.ru/SCXENM>

References

1. Atsapkina, A. A., Kryshen, K. L., Kastornova, A. E., Makarova, M. N., & Makarov, V. G. (2014). Immunological status of laboratory animals in modeling immediate-type hypersensitivity states. *International Bulletin of Veterinary Medicine*, (1), 91–99.
2. Blandova, Z. K., Dushkin, V. A., Malashenko, A. M., & Shmidt, E. F. (1983). *Lines of laboratory animals for biomedical research*. Nauka.
3. Zhdanova, O. B., Andreyanov, O. N., Chasovskikh, O. V., Uspensky, A. V., & Soboleva, O. A. (2024). Features of immunological and postmortem diagnosis of trichinellosis in pigs caused by *T. pseudospiralis*. *Pig Farming*, 8, 35–37. <https://doi.org/10.37925/0039-713X-2024-8-35-37>. EDN: <https://elibrary.ru/TTRTVV>
4. Zhdanova, O. B., Chasovskikh, O. V., & Uspensky, A. V. (2024). The effect of experimental *T. pseudospiralis* invasion on the spleen morphology of chickens (*Gallus domesticus*). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 167–185. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1155>. EDN: <https://elibrary.ru/IZOLXI>
5. Zhdanova, O. B., Uspensky, A. V., Napisanova, L. A., Chasovskikh, O. V., Rossokhin, D. V., Andreyanov, O. N., Malysheva, N. S., & Kachanova, E. O. (2023). The effect of infection intensity on the morphological characteristics of *Trichinella spiralis* larvae in experimentally infected white rats and their distribution in muscles. *Russian Journal of Parasitology*, 1, 74–83. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2023-17-1-74-83>. EDN: <https://elibrary.ru/NBOGKJ>

6. Makarova, M. N., & Makarov, V. G. (2024). Use of guinea pigs in preclinical studies. *Laboratory Animals for Scientific Research*, 2, 4–26. <https://doi.org/10.57034/2618723X-2024-02-01>. EDN: <https://elibrary.ru/LNPQKI>
7. Miroshnikov, M. V., Sultanova, K. T., Kovaleva, M. A., & Makarova, M. N. (2022). Variability of blood biochemical parameters and establishment of reference intervals in preclinical studies. Report 7: guinea pigs. *Laboratory Animals for Scientific Research*, 3, 4–15. <https://doi.org/10.57034/2618723X-2022-03-01>. EDN: <https://elibrary.ru/NMQMUR>
8. Normatov, R. A., & Maryanovskaya, Y. V. (2017). Intestinal lymphoid tissue as the basis of the digestive tract immune system. *Young Scientist*, 20(154), 201–203. EDN: <https://elibrary.ru/YPECXV>
9. Raisov, T. K., Temirbekov, D. A., Arkhipov, G. S., & Ozeretskovskaya, N. N. (1990). Changes in the invasion process and host immune response during treatment with mebendazole and voltaren in experimental trichinellosis in guinea pigs. *Medical Parasitology*, 2, 31–35.
10. Slesarenko, N. A., Komyakova, V. A., & Stepanishin, V. V. (2019). Morphofunctional characteristics of the intestine in representatives of the rodent order. *Laboratory Animals for Scientific Research*, 3, 1. <https://doi.org/10.29296/2618723X-2019-03-01>. EDN: <https://elibrary.ru/PVCYTN>
11. Tregubova, N. V., Ismailov, I. S., & Tkachenko, M. A. (2013). Guinea pigs as biological objects for scientific research. *Bulletin of the Agro-Industrial Complex of Stavropol Territory*, 4(12), 211–215. EDN: <https://elibrary.ru/QADRDN>
12. Catty, D. (1969). *The immunology of nematode infections. Trichinosis in guinea-pigs as a model. Monographs in Allergy*, 5, 1–134. <https://doi.org/10.1159/isbn.978-3-8055-0436-2>
13. Card, S. E., Tompkins, S. F., & Brien, J. F. (1989). Ontogeny of the activity of alcohol dehydrogenase and aldehyde dehydrogenases in the liver and placenta of the guinea pig. *Biochemical Pharmacology*, 38(15), 2535–2541. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(89\)90099-3](https://doi.org/10.1016/0006-2952(89)90099-3)
14. Kim, C. W. (1966). Delayed hypersensitivity to *Trichinella spiralis* antigens in irradiated guinea pigs. *The Journal of Parasitology*, 52(4), 722–726. <https://doi.org/10.2307/3276440>
15. Kallós, P., & Pagel, W. (1937). Experimentelle Untersuchungen über Asthma bronchiale. *Acta Medica Scandinavica*, 91, 292–305. <https://doi.org/10.1111/j.0954-6820.1937.tb16045.x>
16. Himeno, S., Takekawa, A., Toyoda, H., & Imura, N. (1993). Tissue-specific expression of glutathione peroxidase gene in guinea pigs. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1173(3), 283–288. [https://doi.org/10.1016/0167-4781\(93\)90125-W](https://doi.org/10.1016/0167-4781(93)90125-W)
17. Rudneva, O. V., Napisanova, L. A., Zhdanova, O. B., & Berezhko, V. K. (2018). Evaluation of the protective activity of different immunostimulatory drugs at the

experimental trichinosis on white mice. *International Journal of High Dilution Research*, 17(2), 17–18. EDN: <https://elibrary.ru/SCXENM>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Жданова Ольга Борисовна, доктор биологических наук, профессор кафедры морфологии, микробиологии, химии и фармакологии; с.н.с. лаборатории паразитарных зоонозов

Вятский ГАТУ; ВНИИП – филиал ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН

Октябрьский проспект, 133, г. Киров, 610017, Российская Федерация; ул.

Большая Черемушкинская, 28, г. Москва, 117218, Российская Федерация
oliabio@yandex.ru

Часовских Ольга Владимировна, кандидат ветеринарных наук, зав. кафедрой морфологии, микробиологии, химии и фармакологии

Вятский ГАТУ

Октябрьский проспект, 133, г. Киров, 610017, Российская Федерация

beoli@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Olga B. Zhdanova, Ph.D. in Biological Sciences, Professor, Department of Morphology, Microbiology, Chemistry, and Pharmacology; Senior Research Scientist, Laboratory of Parasitic Zoonoses

Vyatka State Agrotechnological University; All-Russian Research Institute of Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plants

133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, 610017, Russian Federation; 28, Bolshaya

Cheremushkinskaya Str., Moscow, 117218, Russian Federation

oliabio@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4912-8518>

Olga V. Chasovskikh, Candidate of Veterinary Sciences, Head of the Department of Morphology, Microbiology, Chemistry, and Pharmacology

Vyatka State Agrotechnological University

133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, 610017, Russian Federation

beoli@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9492-4017>

Поступила 25.12.2025

После рецензирования 10.02.2026

Принята 16.03.2026

Received 25.12.2025

Revised 10.02.2026

Accepted 16.03.2026

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1486](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1486)EDN: [HMXJCD](https://www.edn.ru/HMXJCD)

UDC 504.5:574.64



Seasonal fluctuations of aliphatic petroleum hydrocarbons in soil and vegetation: A case study near Al-Qurna oil field, Basrah, Iraq

Noor A. Ismael, Nayyef M. Azeez, Widad M. Tahir

College of Science, University of Basrah, Basrah, Iraq

Abstract

Background. Petroleum hydrocarbons have detrimental effects on plant development and growth and there are substantial seasonal changes in the levels of petroleum hydrocarbons.

Purpose. Investigate the seasonal pattern of contamination in soil and plants of petroleum hydrocarbons, paying special attention to the possibility of focusing on the species that may be instrumental in the process of remediation.

Methodology. The sampling of soil and plant matter took place monthly during 3 different stations within the north area of the Basra Governorate between October of 2023 and May of 2024. Samples were collected and taken to the laboratory to be processed instantly. Content of petroleum hydrocarbons was specified through extraction, concentration, division and analytical assessment of the soil/plant samples.

Results. The maximum levels were seen in spring and this was explained by the fact that the inputs of the hydrocarbons were higher due to the high oil extraction activities. On the other hand, the smallest concentration of hydrocarbons was found during summer, perhaps due to the activity of more favourable microbial degradation and volatilization activities. The inter-station comparison showed that the levels of hydrocarbons in spring were always rather high, indicating that there were local or seasonal contamination sources. The results were a clear indication that soil is the most important storage of the hydrocarbons and the concentration in the soil was far much higher than in the tissue of plants.

Conclusion. Petroleum hydrocarbons as monitored seasonally are important in enhancing remediation processes and environmental management measures at oil fields.

Keywords: hydrocarbons; sustainability; soil contamination; plant accumulation; phytoremediation

For citation. Ismael, N. A., Azeez, N. M., & Tahir, W. M. (2026). Seasonal fluctuations of aliphatic petroleum hydrocarbons in soil and vegetation: A case study near Al-Qurna oil field, Basrah, Iraq. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 89–102. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1486>

Introduction

Environmental pollution can be defined as the alteration of an element or a compound that causes harm to life or destruction of ecological systems. The causes of pollutants are chemical products and energy, which can be light or heat, and noise, which is usually dangerous material that causes significant environmental issues [1]. The oil hydrocarbons are unique from the rest of the pollutants due to their widespread presence in nature, and their adverse effects on the survival of the ecosystem. As shown by Al-Hisnawi et al., crude oil consists of hydrocarbons blended with multiple chemical elements, which represent a significant source of environmental contamination [2]. Petroleum hydrocarbons entering ecosystems create ecological disruption while negatively impacting all forms of life, including plants, animals, and humans. As the concentration of petroleum hydrocarbons in plants increases, their toxicity results in significant physiological harm. Plants absorb organic compounds from crude oil through their roots and leaves, which leads to cellular and tissue destruction that negatively affects their growth and development [3]. Industrial activities related to oil extraction and processing also contribute to soil pollution. Such activities include diesel, gasoline, and other petroleum derivatives that cause changes in the physical and chemical properties of the soil. Through an example, the soil PH might be lowered and the amounts of heavy elements like lead and zinc might be provoked. These pollutants are then used up by plants causing their stunted growth and interference with physiological processes [4]. The interactions between the petroleum hydrocarbon pollutants and soil microorganisms as well as plants are critical aspects of study in relation to the effects they cause and designing strategies to reduce these negative effects.

The seasonal changes contribute much to the occurrence and maintenance of the petroleum hydrocarbon in the environment. The seasonal factors like temperature, microbial activity and volatilization rates vary and they affect the levels of hydrocarbons in the soil and plants. Indicatively, a rise in the temperature during summer might increase the amount of microbial activity in degrading and volatilization to lower the level of hydrocarbons, but low temperatures during the colder seasons may promote their formation. Research on these seasonal patterns is critical in the evaluation of the level of contamination and

establishing the best timings in the remediation process [5]. In addition, some of the plant species have shown impressive ability to absorb the hydrocarbons; hence, providing a long-term remedy to the oil pollution. Phytoremediation involving the use of plants to either eliminate or break down contaminants has become an affordable and environmentally friendly method. Alhagi plants have demonstrated a significant potential of hydrocarbon accumulation among these, and are hence, good candidates in phytoremediation remediation [6].

The existence of petroleum hydrocarbon in soil and vegetation has been widely reported by previous research, but the current study is the sole attempt to establish the gap in knowledge on seasonal and spatial changes around oil fields especially in Al-Qurna District of Basra, Iraq [7]. The novelty of such study is that a method of considering the soil and the vegetation together in several seasons and regions will disclose detailed process of contamination. The research questions that are used as the main focus of this paper are: how seasonally and spatially do petroleum hydrocarbon concentrations change in soil and vegetation around oil fields? and which plant species illustrates high hydrocarbon accumulation potential as a phytoremediation alternative?. This study has attempted to examine dynamics of seasonal variation in petroleum hydrocarbon pollution of soils and plants with emphasis placed on the identification of those species that may be significant in the component of remediation i.e. Alhagi.

Materials and methods

Study Area

This study was carried out in Al-Qurna District which is in the north of the Basra Governorate, Iraq. Three distinct sampling stations were selected to represent the environmental diversity of the area, station 1 was located adjacent to the Al-Ezz River, station 2 was situated within the Ezz Al-Din Salim District, and station 3 was in the Al-Sharsh region of Al-Qurna District (Figure 1).

Preparation and Collection of Samples

Samples of plants and soil that had been monthly sampled at each of the stations occurred between October 2023 and May 2024. The samples were collected and taken to the laboratory to process them immediately. The samples were dried at an electric oven of 105 °C to eliminate moisture and ground in a ceramic mortar and dried using a 63-micron mesh sieve to get homogeneous particle sizes that are analyzable.

Petroleum Hydrocarbon Content Determination

The petroleum hydrocarbons determination is a sequential process which is provisioned by extraction, concentration, separation and analytical evalu-

ation. The samples were first placed in extraction thimbles: samples of plant weighing about 1 g. and soil weighing about 5 g. were placed separately as samples in extraction thimbles. A 150 mL blended mixture of methanol and benzene (1:1 proportions) was filled in 250 mL volumetric flasks connected to a continuous extraction set up. Each of the flasks contained glass beads that ensured that they did not boil too much during extraction. The extraction time was maintained at 24h.



Fig. 1. Map of the study area

The extraction was then followed by cooling, and concentrating the extracts in a rotary evaporator. Then 25 mL hexane of each concentrated sample were introduced and passed through columns of chromatographic separation filled with silica gel and covered with a layer of alumina to isolate aliphatic fraction. Aromatic fractions were then collected by pouring 25 mL of benzene to all the chromatographic columns. The aromatic and aliphatic fractions were separated and dried by evaporation and re-dissolved in 5 mL of hexane. The amount of petroleum hydrocarbon of each fraction was quantified by gas chromatography (GC) [8].

Statistical Analysis

The results from the gas chromatography analysis were evaluated using descriptive and inferential statistical methods. Data were summarized to identify the patterns and concentrations of petroleum hydrocarbons in both soil and plant samples across sampling stations and seasons. One-way Analysis of Variance (ANOVA) was conducted to ascertain statistically significant variations in hydrocarbon concentrations among different stations and seasonal intervals. To compare the groups pairwise, the post hoc test provided by Tukey was used,

and the level of the significance was taken to $p < 0.05$. Also, the correlation coefficient of Pearson was used to test the correlation between the hydrocarbon levels of soil and the plant samples. The statistical tests were done with the SPSS statistical package.

Results

(Table 1) details the seasonal and spatial distribution of normal alkanes in *Alhagi graecorum*. during autumn, CPI values ranged from 1.393 (Station 3) to 2.810 (Station 1), corresponding to total alkane loads of 86.30–176.42 $\mu\text{g g}^{-1}$. Winter showed a drop in CPI (0.771–1.339) with moderate alkane concentrations in station 2 (107.54–121.65 $\mu\text{g g}^{-1}$). Spring exhibited the greatest accumulation (CPI 1.221–1.757; total alkanes 492.92–1,087.84 $\mu\text{g g}^{-1}$), while summer CPI (0.775–1.791) and total alkanes (258.09–606.68 $\mu\text{g g}^{-1}$) declined.

(Table 2) presents the corresponding profile of *Suaeda aegyptiaca*. Autumn CPI values of 2.688–1.409 were associated with 125.69–154.51 $\mu\text{g g}^{-1}$ of alkanes. Winter CPI decreased to 1.180–1.757, even as total alkanes rose markedly (414.70–939.35 $\mu\text{g g}^{-1}$). Spring concentrations moderated (CPI 0.775–1.812; total 229.70–551.96 $\mu\text{g g}^{-1}$), and summer values fell sharply (CPI 0.672–1.324; total 74.52–107.21 $\mu\text{g g}^{-1}$).

(Table 3) shows that *Tamarix aucheriana* exhibited a similar seasonal shift in alkane composition, with autumn CPI and total alkane content intermediate between those of *A. graecorum* and *S. aegyptiaca*, peaking in spring and diminishing in summer.

(Table 4) summarizes *Cressa cretica*, where autumn CPI (1.281–2.875) corresponded to 123.47–146.30 $\mu\text{g g}^{-1}$ of alkanes, winter loads rose to 389.32–852.33 $\mu\text{g g}^{-1}$ (CPI 1.176–1.609), spring totals reached 221.30–505.88 $\mu\text{g g}^{-1}$ (CPI 0.812–1.811), and summer concentrations dropped to 92.94–96.47 $\mu\text{g g}^{-1}$ (CPI 0.801–1.324).

Table 1.

Seasonal and spatial variation of normal alkanes in plants *A. agracorum*

N- alkanes	Study stations		
	1	2	3
Autumn			
CPI	2.810	1.489	1.393
even	37.049	34.667	73.720
odd	104.098	51.636	102.700
Phytane	2.856	1.415	2.959

Pristane	2.310	2.387	2.811
Pristane:Phytane	0.809	1.687	0.950
Total	141.146	86.303	176.420
Winter			
CPI	1.339	1.233	0.771
even	45.973	39.021	68.672
odd	61.562	48.112	52.973
Phytane	2.548	4.377	2.771
Pristane	1.758	2.632	1.762
Pristane:Phytane	0.690	0.601	0.636
Total	107.535	87.133	121.645
Spring			
CPI	1.221	1.347	1.757
even	489.690	210.032	214.246
odd	598.147	282.887	376.439
Phytane	2.829	3.996	15.468
Pristane	3.485	4.761	13.116
Pristane:Phytane	1.232	1.191	0.848
Total	1087.837	492.919	590.684
Summer			
CPI	1.476	1.791	0.775
even	244.990	116.395	145.427
odd	361.689	208.457	112.662
Phytane	14.115	13.992	32.992
Pristane	17.084	15.426	39.141
Pristane:Phytane	1.210	0.907	1.186
Total	606.679	384.852	258.089

Table 2.

Seasonal and spatial variation of normal alkanes in plants *S. aegyptiaca*

N- alkanes	Study stations	N- alkanes	Study stations
	1	2	3
Autumn			
CPI	2.688	1.489	1.409
even	34.085	31.894	64.136
Odd	91.606	47.505	90.376
Phytane	2.570	1.217	2.811
Pristane	1.987	2.196	2.446
Pristane:Phytane	0.773	1.805	0.870

Total	125.691	79.399	154.512
Winter			
CPI	1.180	1.269	1.757
even	430.928	182.727	184.251
Odd	508.425	231.968	323.737
Phytane	2.546	3.357	13.457
Pristane	3.241	4.237	12.329
Pristane:Phytane	1.273	1.262	0.916
Total	939.352	414.695	507.988
Spring			
CPI	1.560	1.812	0.775
even	215.591	97.772	129.430
Odd	336.371	177.189	100.269
Phytane	13.409	12.873	28.043
Pristane	15.888	12.958	35.227
Pristane:Phytane	1.185	1.007	1.256
Total	551.962	274.961	229.699
Summer			
CPI	1.324	1.387	0.754
even	40.916	31.217	61.118
odd	54.174	43.301	46.086
Phytane	2.140	3.851	2.410
Pristane	1.565	2.289	1.621
Pristane:Phytane	0.731	0.594	0.672
Total	95.091	74.518	107.205

Table 3.

Seasonal and site variation of normal alkanes in plants *C. cretica*

Normal alkane	Study stations		
	1	2	3
Autum			
CPI	2.875	1.716	1.281
Even	31.862	27.387	64.136
Odd	91.606	46.988	82.160
Phytane	2.456	1.203	2.220
Pristane	2.148	1.790	2.614
Pristane:Phytane	0.875	1.489	1.178
Total	123.468	74.376	146.296

Winter			
CPI	1.176	1.233	1.609
Even	391.752	174.326	177.824
Odd	460.573	214.994	286.093
Phytane	2.150	3.357	13.148
Pristane	2.788	3.713	10.624
Pristane:Phytane	1.297	1.106	0.808
Total	852.325	389.320	463.917
Spring			
CPI	1.549	1.811	0.812
Even	198.442	102.428	122.159
Odd	307.436	185.527	99.142
Phytane	11.715	12.873	30.352
Pristane	14.180	12.804	36.401
Pristane:Phytane	1.210	0.995	1.199
Total	505.878	287.955	221.301
Summer			
CPI	1.324	1.314	0.801
Even	39.997	29.656	53.564
Odd	52.943	38.971	42.908
Phytane	2.293	4.070	2.438
Pristane	1.495	2.263	1.586
Pristane:Phytane	0.652	0.556	0.650
Total	92.940	68.627	96.472

Table 4.

Seasonal and spatial variation of normal alkanes in *T. aucheriana*

N- alkanes	Study stations	N- alkanes	Study stations
	1	2	3
Autumn			
CPI	2.613	1.660	1.472
Even	21.118	21.147	52.341
Odd	55.172	35.112	77.025
Phytane	1.828	1.104	2.131
Pristane	1.571	1.790	2.136
Pristane:Phytane	0.859	1.622	1.003
Total	76.290	56.259	129.366
Winter			
CPI	1.190	1.259	1.783

Even	381.959	96.614	143.545
Odd	454.591	121.642	255.978
Phytane	1.245	2.717	8.972
Pristane	1.463	3.523	8.394
Pristane:Phytane	1.176	1.297	0.936
Total	836.550	218.256	399.523
Spring			
CPI	1.541	2.798	0.968
Even	169.043	55.870	63.988
Odd	260.416	156.343	61.964
Phytane	10.868	9.935	13.197
Pristane	7.859	6.325	15.657
Pristane:Phytane	0.723	0.637	1.186
Total	429.459	212.213	125.952
Summer			
CPI	1.509	1.270	1.149
Even	32.641	26.144	32.276
Odd	49.249	33.198	37.081
Phytane	1.911	2.845	1.967
Pristane	0.774	1.500	1.233
Pristane:Phytane	0.405	0.527	0.627
Total	81.891	59.342	69.357

(Tables 5–8) compile the total hydrocarbon concentrations by season and station for each species. In *A. graecorum* (Table 5), autumn levels of 94.86–163.29 $\mu\text{g g}^{-1}$ gave way to winter (45.33–105.95 $\mu\text{g g}^{-1}$), spring (57.42–265.44 $\mu\text{g g}^{-1}$), and low summer values (4.88–24.05 $\mu\text{g g}^{-1}$). *S. aegyptiaca* (Table 6) peaked in autumn (76.43–128.66 $\mu\text{g g}^{-1}$) and spring (46.40–194.43 $\mu\text{g g}^{-1}$), with minimal summer uptake (4.56–20.18 $\mu\text{g g}^{-1}$). *T. aucheriana* (Table 7) showed autumn totals of 51.41–86.21 $\mu\text{g g}^{-1}$, a spring maximum of 130.27 $\mu\text{g g}^{-1}$ at station 3, and summer lows (3.05–13.72 $\mu\text{g g}^{-1}$). *C. cretica* (Table 8) recorded autumn concentrations of 46.62–76.49 $\mu\text{g g}^{-1}$, a spring peak at station 2 (98.60 $\mu\text{g g}^{-1}$), and summer minima (2.78–12.32 $\mu\text{g g}^{-1}$).

Lastly, (Table 9) confirms the fact that soil TPH follows the same pattern as plant trends, with high loads in the autumn (166.51–290.76 $\mu\text{g g}^{-1}$), a sharp increase in the spring at station 2 (407.86 $\mu\text{g g}^{-1}$), and very low summer residues (10.55–43.81 $\mu\text{g g}^{-1}$), which underlines the fact that vegetation and soil hydrocarbon are strongly correlated.

Table 5.

Variation in total hydrocarbon concentration Seasonal and spatial in *A. agracorum*

Seasonal	Station 1	Station 2	Station 3
Autumn	94.86	103.25	163.29
Winter	105.95	67.23	45.33
Spring	57.42	265.44	87.32
Summer	4.88	17.87	24.05

Table 6.

Variation in total hydrocarbon concentration Seasonal and spatial in *S. aegyptiaca*

Seasonal	Station 1	Station 2	Station 3
Autumn	128.66	80.52	76.43
Winter	41.33	53.45	84.32
Spring	72.56	194.43	46.40
Summer	20.18	16.96	4.56

Table 7.

Variation in total hydrocarbon concentration Seasonal and spatial in *T. aucheriana*

Seasonal	Station 1	Station 2	Station 3
Autumn	86.21	51.41	53.95
Winter	27.69	56.50	35.81
Spring	48.62	31.09	130.27
Summer	13.72	3.05	11.37

Table 8.

Variation in total hydrocarbon concentration Seasonal and spatial in *C. cretica*

Seasonal	Station 1	Station 2	Station 3
Autumn	46.62	49.12	76.49
winter	44.45	30.61	23.21
Spring	23.30	98.60	41.26
Summer	2.78	11.35	12.32

Table 9.

Variation in total hydrocarbon concentration Seasonal and spatial in Soil

Seasonal	Station 1	Station 2	Station 3
Autumn	178.30	166.51	290.76
winter	189.84	120.12	91.11
Spring	105.30	407.86	151.59
Summer	10.55	33.94	43.81

(Figure 2) illustrates the annual mean TPH concentrations at stations 1–3, revealing a clear seasonal pattern: autumn values ($115.27 \pm 36.86 \mu\text{g g}^{-1}$) were substantially higher than those in other seasons and peaked at station 3 ($290.76 \mu\text{g g}^{-1}$), declined through winter ($120.12\text{--}189.84 \mu\text{g g}^{-1}$), rebounded in spring – with a maximum of $407.86 \mu\text{g g}^{-1}$ at station 2 – and reached a minimum plateau in summer ($10.55\text{--}43.81 \mu\text{g g}^{-1}$). (Figure 3) overlays these trends for both plant and soil matrices, demonstrating a strong concordance between vegetative uptake and substrate contamination in all seasons. The plant *A. agracorum* showed the highest values of petroleum hydrocarbons ($113.447 \mu\text{g g}^{-1}$) in station 2. While the lowest value recorded in the plant *C. cretica* ($29.287 \mu\text{g g}^{-1}$) in station 1.

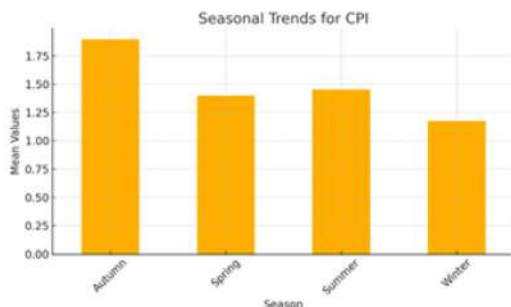


Fig. 2. Annual average of total hydrocarbons at study stations

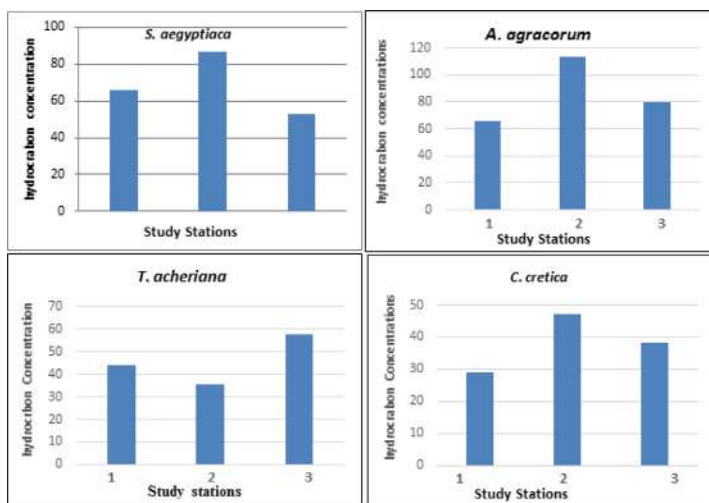


Fig. 3. Total concentrations of petroleum hydrocarbons at study stations

Discussion

The significant peak observed in the autumn season in both the TPHs of the plants and soils is most likely associated with the increased precipitation during this time, which facilitates the accumulation of hydrocarbons, thus being transported into the biotic and abiotic matrices, and lesser microbial decomposition due to the declining temperatures [9]. Seasonal accumulation patterns similar to those observed here have been noted in temperate and subtropical ecosystems, with autumnal precipitation concurrent with leaf senescence and a greater influx of both biogenic and fossil-derived hydrocarbons [10].

The high pristane and phytane levels and CPI values close to unity support a multi-source origin, both plant (waxes during senescence) and anthropogenic (such as fossil fuel residues) [11; 12]. Species-specific trends (*C. cretica*, especially high in spring) are a consequence of metabolic and growth dynamics, including variations in the maximum growth [13].

The agreement of plant biomarker profiles with soil hydrocarbon distributions supports the utility of vegetation as a soil pollution proxy and is consistent with earlier work that identified plant tissues as good bioindicators of meteoric input among terrestrial hydrocarbon pollution [14; 15].

These findings not only point to the importance of the combination of environmental forcing (rainfall and temperature), biological processes (growth, senescence and microbial activity) and human interference that ensures the destiny of hydrocarbons in terrestrial systems but also shows that these factors are not directly related. To further separate these processes, it is advised to perform long-term seasonal monitoring on a longer time scale coupled with more detailed chemical fingerprinting of the sources using a procedure known as compound-specific isotope analysis (CSIA) both to separate source and degradation processes.

Conclusion

According to this research, there was a considerable degree of seasonal and spatial differences in the contamination of petroleum hydrocarbons, the highest levels of contamination were during the fall and spring. The findings were able to confirm that soil was the main reservoir of the hydrocarbons and that some plant species have significant phytoremediation, especially *Cressa cretica*. This highlights the need to conduct constant environmental tests, focus remedial measures and adoption of modern type of bioremediation technology to counter the effect of oil hydrocarbon pollution in the oil producing areas in the long-run.

References

1. Özkara, A., Akyıl, D., & Konuk, M. (2016). Pesticides, environmental pollution, and health. In M. L. Larramendy & S. Soloneski (Eds.), *Environmental health risk – hazardous factors to living species* (pp. 3–29). InTechOpen.
2. Al-Hisnawi, A., Yasser, Y. K., Kadhum, N. H., & Mustafa, J. M. (2022). Hydrocarbon degradation test among the microbial community in oil-contaminated soil of power generators in Kerbala city, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 63(7), 2900–2913. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2022.63.7.14>. EDN: <https://elibrary.ru/LJSCWJ>
3. Acharya, P., Muduli, P. R., Das, M., & Mishra, A. K. (2022). Assessment of total petroleum hydrocarbon accumulation in crabs from Chilika Lagoon. In S. Madhav, S. Nazneen, & P. Singh (Eds.), *Coastal ecosystems* (pp. 285–303). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84255-0_12. EDN: <https://elibrary.ru/BLPCYK>
4. Ekemube, R. A., Emeka, C., Nweke, B., Atta, A. T., & Oporum, A. N. (2022). Evaluation of simulated petroleum hydrocarbon on the physicochemical properties of soil. *Research Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 2(4), 195–210. <https://doi.org/10.31586/rjees.2022.365>. EDN: <https://elibrary.ru/LBXGKL>
5. Anyanwu, I. N., Beggel, S., Sikoki, F. D., Okuku, E. O., Unyimadu, J.-P., & Geist, J. (2023). Pollution of the Niger Delta with total petroleum hydrocarbons, heavy metals and nutrients in relation to seasonal dynamics. *Scientific Reports*, 13(1), 14079. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40995-9>. EDN: <https://elibrary.ru/HXLMAD>
6. Nemati, B., Baneshi, M. M., Akbari, H., Dehghani, R., & Mostafaii, G. (2024). Phytoremediation of pollutants in oil-contaminated soils by *Alhagi camelorum*: Evaluation and modeling. *Scientific Reports*, 14(1), 3532. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56214-y>. EDN: <https://elibrary.ru/ABFBWC>
7. Mushtaq, S. F. (2022). *Distribution and sources of normal alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in some soils of Basrah province and their risk assessment*. University of Basrah, College of Science.
8. Grimalt, J. O., & Olivé, J. (1993). Source input elucidation in aquatic systems by factor and principal component analysis of molecular marker data. *Analytica Chimica Acta*, 278(1), 159–176. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(93\)80094-2](https://doi.org/10.1016/0003-2670(93)80094-2)
9. Zhang, X., Wang, J., Liu, X., & Han, X. (2020). Effects of temperature and moisture on soil microbial communities and enzyme activities in a temperate desert. *Geoderma*, 375, 114501. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114501>. EDN: <https://elibrary.ru/HADYRK>
10. Al-Ali, Z., Al-Ansi, M., & Al-Khayat, J. A. (2022). Seasonal variations of total petroleum hydrocarbons in the coastal sediments of Qatar. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113354. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113354>. EDN: <https://elibrary.ru/WUBXLG>

11. Wang, Z., Fingas, M., & Page, D. S. (1999). Oil spill identification. *Journal of Chromatography A*, 843(1–2), 369–411. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(99\)00120-x](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(99)00120-x). EDN: <https://elibrary.ru/YCBDIA>
12. Tolosa, I., de Mora, S., Sheikholeslami, M. R., Villeneuve, J.-P., Bartocci, J., & Cattini, C. (2004). Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 48(1–2), 44–60. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(03\)00255-8](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(03)00255-8). EDN: <https://elibrary.ru/KXZJKV>
13. Colombo, J. C., Cappelletti, N., & Migoya, M. C. (2007). Biogenic and petroleum-derived hydrocarbons in High-Andean wetlands of the Mendoza River headwaters, Argentina. *Environmental Pollution*, 148(3), 876–884.
14. Honda, M., & Suzuki, N. (2020). Toxicities of polycyclic aromatic hydrocarbons for aquatic animals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1363. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041363>. EDN: <https://elibrary.ru/DVGKQV>
15. Wu, D., Chen, L., Ma, Z., Zhou, D., Fu, L., Liu, M., ... Zhen, Q. (2024). Source analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in total suspended particulate matter (TSP) from Bengbu, China. *Scientific Reports*, 14(1), 2917. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55695-1>. EDN: <https://elibrary.ru/MRKNGB>

DATA ABOUT THE ATHORS

Noor A. Ismael, PhD., Prof., Department of Ecology

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

noora.alinaser@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6217-7963>

zeez, PhD., Prof., Department of Ecology

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

nayyef.azeez@uobasrah.edu.iq

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1539-4749>

Widad M. Tahir, PhD., Prof., Department of Ecology

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

widadmtalasadi@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3449-2632>

Поступила 05.11.2025

После рецензирования 16.03.2026

Принята 02.04.2026

Received 05.11.2025

Revised 16.03.2026

Accepted 02.04.2026

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816)EDN: [ICSHUU](https://www.edn.ru/ICSHUU)

УДК 574.5



Популяционная структура комплекса среднеевропейских зеленых лягушек как индикатор геоэкологической ситуации на территории урбанизированных ландшафтов и водных объектах юга среднерусской возвышенности

А.С. Бархатов, Э.А. Снегин, В.В. Киселев,
Е.А. Снегина, А.Г. Корнилов, М.В. Раевская

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Изучению комплекса среднеевропейских зелёных лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс) посвящено много работ. Однако наибольший интерес исследователей представлен изучением видового состава и образование гибридных форм, в то время как сведения по популяционной структуре скудны.

Целью исследования является проведение анализа генетической структуры популяций среднеевропейских зелёных лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс), основанный на применении изоферментных маркёров, в трансформируемых биотопах юга Среднерусской возвышенности. Данный подход позволяет использовать исследуемые популяции в качестве высокочувствительного биоиндикатора негативных изменений водной и околотоводной среды, обусловленных антропогенным воздействием.

Материалы и методы. Исследование представляло собой комплексную оценку популяционно-генетической структуры 36 изолированных субпопуляций исследуемых земноводных с применением изоферментных молекулярных маркеров. Анализ осуществлялся путем электрофореза изоферментов в 10%-ном полиакриламидном геле. В рамках исследования были изучены три независимые изоферментные системы, характеризующиеся кодоминантным типом наследования: два мономерных локуса эстеразы (EST-1 и EST-2), проявляющих каждая по три аллельных варианта, и один димерный локус лактатдегидрогеназы (LDH-3), также имеющий три аллельные формы. Полученные данные позволяют эффективно применять предложенный набор показателей в качестве надёжного индикатора геоэкологического состояния урбанизированных ландшафтов и малых рек юга Среднерусской возвышенности.

Результаты. Анализ генетической вариабельности исследуемых групп выявил высокий уровень генетической гетерогенности. Полностью полиморфными оказались все изученные изоэнзимные локусы ($P = 100\%$). Среднее число аллелей на локус составило 2,89, эффективное число аллелей – 2,35. Расчетная статистика Райта показала низкий показатель индекса внутривидовой дифференциации при этом среднее значение интенсивности обмена генами достигло более единицы, что свидетельствует о значительной степени межпопуляционного взаимодействия и миграционной активности особей на данной территории несмотря на интенсивную антропогенную трансформацию среды обитания. Полученные данные позволяют предположить наличие эффективной адаптивной стратегии комплекса *P. esculentus*, обеспечивающей успешность существования вида в условиях городской экосистемы. Сопоставление показателей внутривидовой дифференциации тест-объектов с данными экспертных оценок гидроэкологической ситуации в районе исследования позволило выявить слабую, но статистически значимую связь между показателями экспертных балльных оценок гидроэкологической ситуации и эффективным числом аллелей (A_e), что говорит о сильном влиянии дополнительных факторов, не учтенных в комплексной гидроэкологической оценке (ядохимикаты на сельскохозяйственных угодьях, изменения климата, фактор беспокойства и т.п.).

Ключевые слова: *Pelophylax esculentus* комплекс; популяционная структура; урбанизированные ландшафты; малые реки; гидроэкологическое состояние; гидрохимические показатели

Для цитирования. Бархатов, А. С., Снегин, Э. А., Киселев, В. В., Снегина, Е. А., Корнилов, А. Г., & Раевская, М. В. (2026). Популяционная структура комплекса среднеевропейских зеленых лягушек как индикатор геоэкологической ситуации на территории урбанизированных ландшафтов и водных объектах юга среднерусской возвышенности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 103–128. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816>

Population structure of the Central European green frog complex as an indicator of the geoeological situation in urbanized landscapes and water bodies in the south of the Central Russian Upland

A.S. Barkhatov, E.A. Snegin, V.V. Kiselev,
E.A. Snegina, A.G. Kornilov, M.V. Raevskaya

Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation

Abstract

Background. Nowadays a wide range of works is dedicated to *Pelophylax esculentus* complex. The most investigations focus on the structure of species and hybrid forms, at the same time, the information of population structure is insufficient.

The article is **aimed** to genetic structure analysis of Central European green frogs (*Pelophylax esculentus* complex). The tools of isozyme markers in the anthropogenically transformed biotopes (south of the Central Russian Upland) are basis of the analysis. The approach underlines the role of green frog populations as sensitive biological indicators for water quality monitoring as well as near-water ecosystem monitoring.

Materials and methods. The method of protein polymorphism and isozyme molecular markers is implemented for comprehensive assessment of the population genetic structure of 36 isolated amphibian subpopulations (*Pelophylax esculentus*).

Electrophoresis of isozymes took place in 10% polyacrylamide gel. Three independent isozyme systems characterized by codominant inheritance were investigated: two monomeric esterase loci (EST-1 and EST-2), each exhibiting three allelic variants, and one dimeric lactate dehydrogenase locus (LDH-3), also having three allelic forms. The obtained data provide better leverage for reliable indication of the geoecological state of urban landscapes and small rivers within the south of the Central Russian Upland.

Results. The analysis of the genetic variability of the studied groups discovered high level of genetic heterogeneity. All the studied isozyme loci were completely polymorphic ($P = 100\%$). The average number of alleles per locus was 2.89, and the effective number of alleles was 2.35. Wright's statistics showed a low index of intraspecific differentiation, while the average value of gene exchange intensity >1 . Despite the intensive anthropogenic transformation of the habitat, interpopulation interaction and migration activity are significantly high in this area. It could be suggested that effective adaptive strategy for the *Pelophylax esculentus* complex of the investigated species in urban ecosystems exists.

The indicators of intraspecific differentiation (genetic characteristics) of test objects and the data of expert assessments of the hydroecological situation (hydroecological characteristics) in the study area were compared. As a result, a slight correlation was found between the indicators of expert evaluation of the hydroecological situation and the effective number of alleles (A_e), which underlines a strong influence of extra factors. The factors could be such as pesticides from agricultural land, climate changes, disturbance factor, etc.).

Keywords: *Pelophylax esculentus* complex; population structure; urbanized landscapes; small rivers; hydroecological state; hydrochemical indicators

For citation. Barkhatov, A. S., Snegin, E. A., Kiselev, V. V., Snegina, E. A., Kornilov, A. G., & Raevskaya, M. V. (2026). Population structure of the Central European green frog complex as an indicator of the geoecological situation in urbanized landscapes and water bodies in the south of the Central Russian Upland. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 103–128. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816>

Введение

Известно, что с точки зрения современной науки, элементарные эволюционные явления происходят в популяциях в виде направленного изменения частот аллелей. При этом в настоящее время особое внимание уделяется изучению популяций, обитающих в биотопах, подверженных влиянию человеческой деятельности, так как именно на территории городов и промышленных объектов наблюдаются наиболее выраженные изменения генетической структуры популяций [5].

Главной причиной указанных трансформаций является возникновение новых механизмов изоляции, реализующихся на протяжении ограниченного временного интервала и приводящих к фрагментации популяции на небольшие, пространственно разобщенные микрогруппы. Это способствует возникновению значительных модификаций генетической организации, необходимых для формирования адаптивных стратегий выживания [6]. Данные процессы способны существенно влиять на дальнейшую эволюционную траекторию соответствующих демографически обособленных группировок [5; 6].

Объекты, представляющие наибольший интерес для проведения популяционно-генетических исследований среди амфибий, включают виды комплекса среднеевропейских зелёных лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс) [4; 27; 32; 35]. Данный комплекс включает в себя три основные таксономические единицы: прудовая лягушка – *Pelophylax lessonae* (Camerano, 1882); озёрная лягушка – *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771), при этом по многочисленным исследованиям озёрная лягушка представляет собой комплекс криптических форм – «западная» *P. ridibundus* и «восточная» *P. cf. bedriagae* (анатолийская лягушка) [4; 33], а так же съедобная лягушка (гибридная форма) – *Pelophylax esculentus* (Linnaeus, 1758). Таким образом, комплекс среднеевропейских зеленых лягушек представляет собой сложный гибридогенный комплекс обусловленный полуклональным (мероклональным) типом наследования, полиплоидией и разнообразными типами популяционных систем [38].

Изучение генетической структуры и филогеографии указанных видов занимает центральное место во многих научных публикациях. Тем не менее, большая часть публикаций посвящена вопросам определения видового состава комплекса [10; 12; 13; 23; 25; 28; 32; 34], включая методы электрофореза белков [36; 37]. В то же время информация относительно внутривидового полиморфизма белков, выявленного на уровне популяции на территории Российской Федерации, ограничена лишь отдельны-

ми видами бурых лягушек [19]. Следует подчеркнуть, что, несмотря на интенсивные исследования, направленные на изучение генетического полиморфизма ядерных и митохондриальных маркеров, проведение аллозимного анализа сохраняет свою актуальность, для изучения популяционной структуры, поскольку анализу подвергаются кодирующие участки генома [24].

Целью настоящего исследования является комплексная оценка генетической структуры популяций средневропейских зелёных лягушек комплекса *Pelophylax esculentus* посредством анализа полиморфизма изоферментных маркёров, как одного из индикаторов гидроэкологического состояния малых рек юга Среднерусской возвышенности.

Данное исследование представляет собой часть работы по изучению популяционной структуры сложного гибридогенного комплекса средневропейских зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс) включающего в себя изучение морфометрических, морфофизиологических и фенотипических показателей, а также генетической структуры на основе микросателлитных и изоферментных маркеров и определении видового состава и уровня гибридизации в популяционных системах [1].

Материалы и методы исследования

Материал был собран в большей степени на территории Белгородской области, за исключением отдельных точек, находящихся в пределах Воронежского и Курского регионов. Все пункты отбора проб приурочены к водосборам малых рек региона. Различия между пунктами сбора определялись уровнем антропогенного воздействия, классифицированного согласно методике, разработанной В.Л. Вершининым и Р.И. Замалетдиновым [4; 10].

В рамках гидроэкологического мониторинга водной среды изучаемых территорий был рассмотрен показатель УКИЗВ (таблица 1), который характеризует удельную величину гидрохимического загрязнения водных объектов (класс качества воды) [8; 13].

Как видно из таблицы 1 экологическое состояние исследуемых рек Белгородской области в целом имеет неудовлетворительное состояние. В большинстве случаев качество вод оценивается как «загрязнённая» или «грязная».

На рассматриваемых реках было проведено исследование выборки, включающей 770 экземпляров (684 особи вида *Pelophylax ridibundus*, 85—*Pelophylax esculentus*, одна особь—*Pelophylax lessonae*), отобранных из 36 локальных популяций комплекса *Pelophylax esculentus*. Географически ареал изученных популяций охватывал бассейны рек Днепр и Дон (рис. 1).

Таблица 1.

Гидрохимические показатели класса качества воды по мониторинговым данным Росгидромета (фрагмент базы данных)

Table 1. Hydrochemical indicators of water quality classes based on Roshydromet monitoring data (database excerpt)

№ п/п	Река (створ)	УКИЗВ	Класс качества воды	Качество вод	Характерные загрязняющие вещества
1	Северский Донец (с. Беломестное)	2,58	3а	загрязненная	NO_2^- , Cu, Mn, Fe , SO_4^{2-} , БПК ₅
2	Тихая Сосна (1 км выше г. Алексеевка, близ с. Ильинка)	2,25	3а	загрязненная	NO_2^- , Mn, SO_4^{2-} БПК ₅
3	Ворскла (с. Козинка)	4,38	4а	грязная	Fe, NO_2^- , Cu, PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , БПК ₅ , Mg
4	Оскол (с. Пятницкое)	3,51	3б	очень загрязненная	NO_2^- , Cu, PO_4^{3-} , Zn, БПК ₅ , NH_4^+
5	Оскол (с. Ивановка)	5,13	4б	грязная	NO_2^- , Cu, PO_4^{3-} , SO_4^{2-} БПК ₅ , Mn, Fe, NH_4^+
6	Нежеголь (16 км выше г. Шебекино)	2,13	3а	загрязненная	NO_2^- , Cu, БПК ₅ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}
7	Короча (1,5 км выше г. Короча)	2,76	3а	загрязненная	NO_2^- , Cu, БПК ₅ , SO_4^{2-} , NH_4^+

Примечание: УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды

Все пункты отбора проб можно условно разделить [13] по степени антропогенного воздействия на водную среду указанные в таблице 2:

1. Пункты (№ 1, 2, 3, 4, 23) с высокоурбанизированным ландшафтов, которые включают внутригородские территории (г. Белгород, Белгородское водохранилище) в следствие значительного влияния городских стоков, а также территории г. Губкин и Старый Оскол, которые находятся под влиянием селитебно-промышленных стоков Старооскольско-Губкинского горно-промышленного района (5 баллов).

2. Пункты (№ 6, 18, 22, 24, 25, 29, 31) в районах с высокой сельскохозяйственной нагрузкой (много пашни, животноводческие комплексы) (4 балла).

3. Умеренные районы (№ 10, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 32, 33, 36) с сельскохозяйственной нагрузкой (не канализованный частный сектор) (2-3 балла).

4. Квази-природные (5, 7, 9, 11, 30, 34, 35) геоэкологические условия (пункты отбора в лесах, на лугах и т.д.) (1 балл).

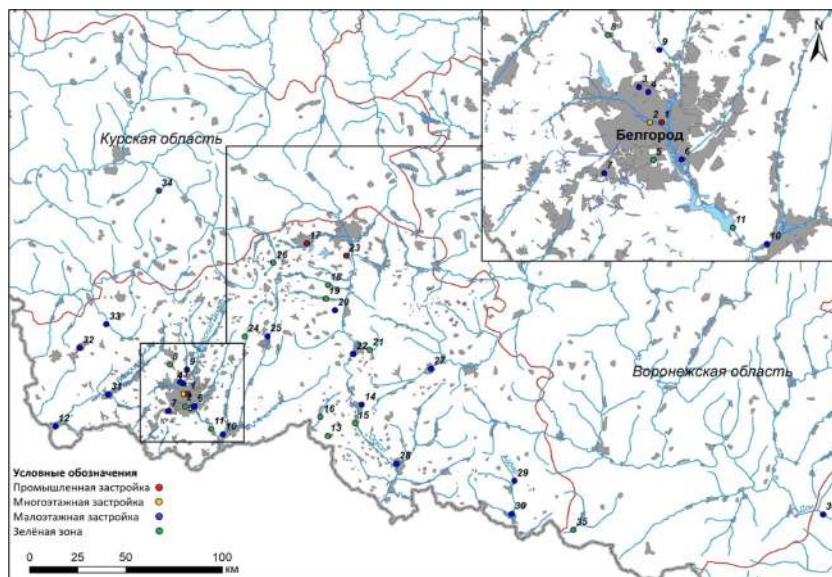


Рис. 1. Пункты сбора *P. esculentus* на водных объектах Белгородской области
Fig. 1. Collection sites for *P. esculentus* in water bodies of the Belgorod Region

Экстракция аллозимов осуществлялась посредством механического диспергирования мышечной ткани с использованием тefлонового гомогенизатора в среде трис-хлористоводородного буфера концентрации 0,05 моль/л (pH = 6,7), после чего материал подвергался криоконсервации при температурном режиме -60°C. Последующая очистка проводилась методом ультрацентрифугирования на протяжении получаса при скорости вращения ротора 10 000 оборотов в минуту и стабильной термостатированной температуре +4°C в ультрацентрифуге 5424 Eppendorf (Германия).

Электрофоретическое разделение аллозимов проводили в камере для вертикального электрофореза VE-20 (Helicon, Россия) с использованием полиакриламидного геля в концентрации 10%, выполненные согласно методике, предложенной Остерманом [20], в электролитической среде

трис-глицинового буфера (pH=8,3). Электрофорез проводился непрерывно в течение четырёх часов при постоянном электрическом потенциале величиной 200 В, и поддерживаемой постоянной низкой температурой (+4°C).

Идентификация эстеразных компонентов осуществлялась путём последовательного погружения обработанных гелевых блоков сначала в раствор борной кислоты (3%, 15 мин.), далее в среду раствора трис-хлористого буфера (0,1 моль/л, pH=7,8), обогащённого субстратом альфа-нафтил ацетатом и красителем Fast Red. Для визуализации лактатдегидрогеназных фракций использовали фосфатный буфер 0,1-молярной концентрации (pH=7,4), дополненный NAD, HCS, FMS и натрия лактатом высокой молярности (1M).

Проведенный анализ электрофореграмм зеленых лягушек выявил наличие трех генетических локусов, кодоминантного типа наследования (рис. 2). Из них выявлены два мономерные локуса эстераз трех аллелями у каждого (EST-1 и EST-2) и димерный локус лактатдегидрогеназы с тремя аллельными вариантами (LDH-3). Учитывая невозможность точного определения аллелей в локусах LDH-1 и LDH-2, исследования по ним не проводилось.

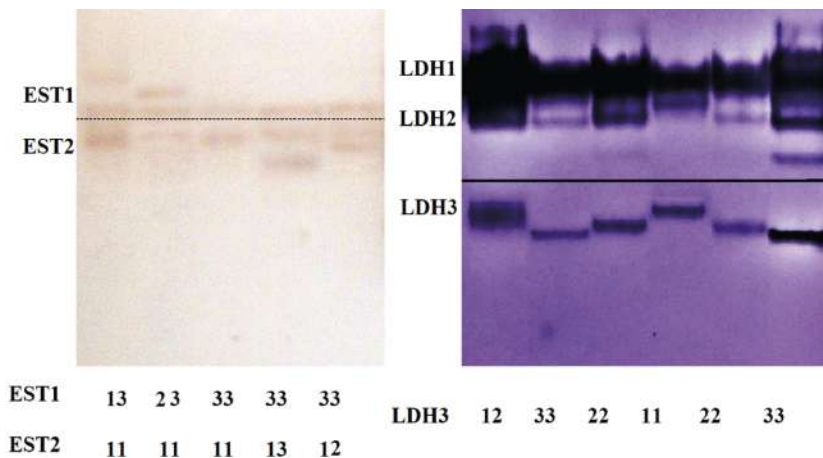


Рис. 2. Фрагмент электрофореграммы ферментов неспецифических эстераз и лактатдегидрогеназы

Fig. 2. A portion of the electrophoregram showing nonspecific esterases and lactate dehydrogenase

Полученные результаты обрабатывали стандартными методами вариационной статистики, с использованием пакета программ PAST V.3.1 [29], GenAlEx v.6.5 [30].

Результаты и их обсуждение

Известно, что экологическое состояние исследуемого региона оценивается как критическое ввиду специфики его географической локализации и длительной историко-эволюционной динамики развития. При этом, продолжается усиление технологического давления, которое ведёт к ухудшению общей экологии, негативно влияя на всю флору и фауну региона [8; 22].

При этом, несмотря на сильную антропогенную нагрузку в изучаемых популяциях наблюдается высокий уровень гетерогенности (табл. 2). Согласно полученным данным все изучаемые локусы полностью полиморфны, а среднее число аллелей на локус (A) составило 2,89.

Таблица 2.

Показатели генетического разнообразия в популяциях *P. esculentus* complex на малых реках Белгородской области

Table 2. Genetic diversity indices in populations of the *P. esculentus* complex in small rivers of the Belgorod Region

Река	Показатели генетического разнообразия*							
	N	P	A	Ae	I	Ho	He	F
1. С. Донец	19	100	2,67	2,26	0,840	0,509	0,508	-0,035
2. Везёлка	20	100	3	2,12	0,850	0,433	0,507	0,097
3. Оскочное	20	100	3	2,1	0,828	0,383	0,488	0,256
4. Ячевский	16	100	3	1,76	0,650	0,417	0,368	-0,065
5. Дубовое	18	100	2,67	1,89	0,718	0,407	0,419	0,003
6. Устье	26	100	2,33	1,76	0,529	0,231	0,305	0,073
7. Майский	16	100	2,67	2,07	0,709	0,438	0,421	-0,030
8. Северный	22	100	2,67	1,99	0,709	0,515	0,430	-0,172
9. Шопино	23	100	2,67	2,12	0,731	0,348	0,439	0,116
10. Нежеголь	22	100	3	2,42	0,953	0,682	0,571	-0,171
11. Графовка	17	100	3	2,6	1,024	0,784	0,615	-0,275
12. Готово	25	100	3	2,39	0,962	0,667	0,578	-0,152
13. Плотнова	13	100	3	2,5	0,967	0,744	0,595	-0,246
14. Сазон	20	100	3	2,42	0,967	0,683	0,574	-0,191
15. Оскол 1	22	100	3	2,42	0,962	0,742	0,578	-0,276
16. Волчья	18	100	3	2,52	0,996	0,741	0,600	-0,254
17. Губкин	60	100	3	2,39	0,961	0,506	0,571	0,108
18. Орлик	25	100	3	2,34	0,926	0,667	0,552	-0,222
19. Ольшанка	14	100	3	2,32	0,928	0,690	0,565	-0,242
20. Халань	34	100	2,67	2,14	0,803	0,559	0,511	-0,139
21. Беленькая	24	100	2,67	2,35	0,855	0,694	0,560	-0,313

22. Оскол	18	100	3	2,43	0,974	0,704	0,582	-0,223
23. Чуфичка	15	100	3	2,38	0,928	0,711	0,576	-0,244
24. Корень	19	100	3	2,37	0,943	0,579	0,564	-0,036
25. Короча	14	100	2,67	2,33	0,862	0,619	0,525	-0,195
26. Сейм	17	100	3	2,12	0,863	0,373	0,528	0,294
27. Т. Сосна	22	100	3	2,64	1,018	0,545	0,610	0,07
28. Валуй	24	100	2,67	2,14	0,784	0,653	0,497	-0,348
29. Г. Дунай	21	100	2,67	2,32	0,892	0,810	0,563	-0,478
30. Айдар	33	100	3	2,78	1,054	0,859	0,639	-0,344
31. Ворскла	19	100	3	2,67	1,026	0,702	0,624	-0,129
32. Ракита	21	100	3	2,51	0,966	0,746	0,594	-0,236
33. Пена	27	100	3	2,65	1,017	0,704	0,620	-0,138
34. Полная	22	100	3	2,82	1,065	0,758	0,645	-0,180
35. Белая	12	100	3	2,73	1,048	0,611	0,633	0,033
36. Дон	12	100	3	2,71	1,037	0,639	0,630	-0,003
Среднее		100	2,89± 0,03	2,35 ±0,05	0,898 ±0,022	0,607 ±0,023	0,544 ±0,014	-0,119 ±0,031

Примечание: N – число особей в выборке; P – процент полиморфных локусов; A – среднее число аллелей; Ae – эффективное число аллелей; I – индекс Шеннона; Ho – наблюдаемая гетерозиготность; He – ожидаемая гетерозиготность; F – индекс фиксации (коэффициент инбридинга).

Максимальное генетическое разнообразие выявлено среди популяций, населяющих ненарушенные либо слабо трансформированные природные биотопы с минимальным уровнем антропогенного воздействия (№34 «Полная», №33 «Айдар», №35 «Белая», №36 «Дон»). В свою очередь, наибольший уровень мономорфизма установлен внутри популяций, локализованных в городской агломерации Белгорода. Вместе с тем, согласно данным ранее проведенного нами исследования с использованием анализа микросателлитной ДНК (STR), наиболее гетерогенные популяции обитают в условиях сильного антропогенного пресса, а именно популяции №3 «Оскольное», №18 «Орлик», №4 «Ячевский» в то время, как наиболее мономорфные показатели генетического разнообразия отмечен в менее затронутых природных регионах (популяции №35 «Белая», №36 «Дон», №28 «Валуй») [3]. Данное противоречие объясняется воздействием естественного отбора на генетическую структуру изучаемых популяций, а именно на распределение частот аллелей изоферментных маркеров. Стоит также отметить, что проведенный ранее анализ фенотипического разнообразия изучаемого комплекса также выявил снижение фенотипического

разнообразия и повышение доли редких морф в градиенте антропогенного пресса [2]. Проведенный корреляционный анализ между уровнем фенотипической вариабельности внутри популяции и показателем наблюдаемой гетерозиготности по изоферментам выявил положительную зависимость ($R=0,699$, $p < 0,001$). В то же время аналогичная зависимость для селективно-нейтральных микросателлитных локусов не выявлена. Рассматриваемое противоречие обусловлено тем обстоятельством, что в условиях урбанизированных ландшафтов и интенсивного антропогенного воздействия некоторые аллельные варианты аллозимов получают селективное преимущество, способствуя формированию мономорфизма по соответствующим локусам. Между тем динамика распределения частот аллелей нейтральных маркеров микросателлитных последовательностей ДНК преимущественно определяется генетико-автоматическими процессами (дрейфом генов), что в контексте крупных размеров популяций земноводных представляется адаптивной реакцией организмов на динамичные и нестабильные экологические условия антропогенных биотопов [26].

Значения коэффициента инбридинга в изучаемых популяциях оказались на низком уровне. В ряде случаев, были отмечены отрицательные значения коэффициента инбридинга. Данный феномен объясняется избытком гетерозигот. По опубликованным нами ранее данным более половины особей от общей выборки представлены интрогрессивными или гибридными особями, что и обуславливает избыток гетерозигот. Данный факт свидетельствует о нестабильных условиях обитания, так как гибридные или интрогрессивные особи обладают селективным преимуществом по сравнению с генетически «чистыми» особями [7; 13], что в свою очередь также может приводить к изменению популяционных систем зеленых лягушек [17].

На следующем этапе исследования, мы определили уровень дифференциации изучаемых популяций при помощи модели Райта (табл. 3).

Индекс подразделенности популяций (F_{st}) в среднем имеет низкое значение, а уровень потока генов (N_m) больше 1, что «согласно теории эволюции со смещающимся равновесием» [39] свидетельствует о существенном обмене генами между популяциями *P. esculentus* комплекс в ходе активных миграций. При этом коэффициент инбридинга особей в субпопуляциях (F_{is}) и коэффициент инбридинга относительно большой популяции (F_{it}) имеют отрицательные значения, также свидетельствуют об избытке гетерозигот, обусловленный гибридизацией в популяциях.

Степень различия между локалитетами оценивали с использованием анализа главных компонент (PCA) на основе генетических дистанций по

Неи (рис. 3). При этом на первую компоненту (PC1) приходится 37,03% наблюдаемой изменчивости популяций, а на вторую (PC2) – 30,13% от общей дисперсии.

Таблица 3.

Значения полокусных значений коэффициентов инбридинга и уровня потока генов в изучаемых популяциях по данным изоферментов

Table 3. Values of the semi-locus inbredness coefficients and gene flow rates in the studied populations, based on isoenzyme data

Локусы	Показатели			
	Fis	Fit	Fst	Nm
Est 1	-0,256	-0,105	0,120	1,828
Est 2	-0,302	-0,111	0,147	1,451
LDH 3	0,143	0,192	0,056	4,205
M ± m	-0,138±0,141	-0,008±0,100	0,108±0,027	2,495±0,862

Примечание: Fis–коэффициент инбридинга особи относительно субпопуляции; Fit–коэффициент инбридинга особи относительно большей популяции; Fst–коэффициент инбридинга субпопуляции относительно большой популяции. Nm–средний показатель интенсивности обмена генами между популяциями.

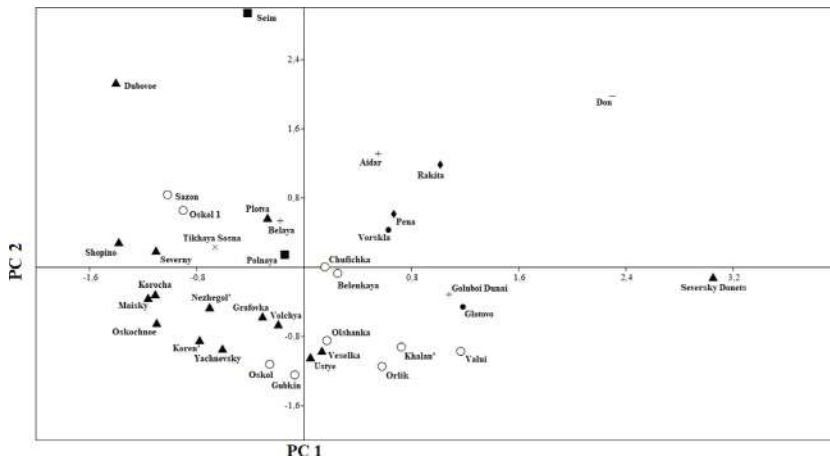


Рис. 3. Результаты анализа по методу главных компонент генетических расстояний Неи изоферментных маркеров. Значками обозначены популяции бассейнов: ♦ – р. Пена; ● – р. Ворскла; ■ – р. Сейм; ▲ – р. Северский Донец; ○ – р. Оскол; + – р. Айдар; × – р. Тихая Сосна; – – р. Дон.

Fig. 3. Results of a principal component analysis of genetic distances among NEI isoenzyme markers. The symbols denote river basin populations: ♦ – Pena River; ● – Vorskla River; ■ – Seim River; ▲ – Seversky Donets River; ○ – Oskol River; + – Aidar River; × – Tikhaya Sosna River; – – Don River.

Метод анализа главных компонент выявил значительную степень генетического сходства между большинством исследуемых популяций, невзирая на существенную пространственно-географическую дисперсность выборки. Тем не менее, диаграмма демонстрирует наличие обособленных кластеров, представленных уникальной популяцией №5 («Дубовое»), существенно географически удаленной локальной группой №36 («Дон») и отдельно стоящим пунктом №26 («Сейм»).

Особое внимание привлекает локализация пункта №1 («Северский Донец»), который характеризуется выраженной генетической дифференциацией относительно соседних локалитетов (№2 «Везёлка», №6 «Устье»), несмотря на территориальную смежность последних. Данный факт свидетельствует о наличии уникальных аллельных комбинаций и подтверждает предположение о генетической уникальности рассматриваемой группы особей.

Результаты анализа методом главных компонент согласуются с визуализацией графика регрессии, отображающего взаимосвязь показателя интенсивности межпопуляционного генного обмена (N_m) с величиной географической дистанции (D_g). Статистическая проверка данной корреляционной связи не позволила выявить наличие достоверной зависимости между указанными показателями (рис. 4).

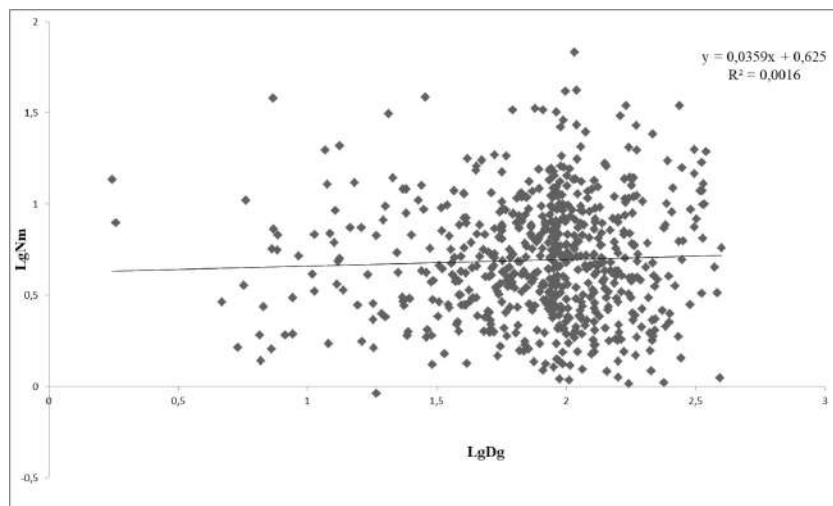


Рис. 4. Уравнение линейной регрессии

Fig. 4. The linear regression equation

Кроме того, нами была установлена существенная генетическая близость исследуемых популяций населяющих Донской и Днепровский водосборные бассейны, что также свидетельствует о высоком уровне обмена генами между этими двумя группами. Рассчитанная генетическая дистанция по Неи ($D = 0,053$), незначительное значение индекса подразделённости ($F_{st} = 0,017$) и высокий уровень межпопуляционного потока генов ($N_m = 14,57$ особей за одно поколение) указывают на активное перемещение амфибий данного таксономического комплекса внутри рассматриваемой территории.

Для сравнения показателей внутривидовой дифференциации тест-объектов с оценками экологической ситуации, построенными с учетом гидрохимического фона были рассчитаны коэффициенты корреляции между показателями экспертных балльных оценок гидроэкологической ситуации и показателями A , A_e , H_o , H_e (табл. 4).

Полученные данные демонстрируют слабую зависимость между показателями экспертных балльных оценок гидроэкологической ситуации и показателем генетического разнообразия. Например, в отношении балльных оценок и показателя A_e коэффициент корреляции $r = -0,34$ ($p > 0,05$), что говорит о сильном влиянии дополнительных факторов, не учтенных в комплексной гидроэкологической оценке (ядохимикаты на сельскохозяйственных угодьях, изменения климата, фактор беспокойства и т.п.). Также статистически не значимы оказались значения коэффициентов попарной корреляции между экспертными оценками экологической ситуации и показателями A , H_o и H_e .

Таблица 4.

Коэффициенты попарной корреляции между балльными оценками благополучия (неблагополучия) гидроэкологической ситуации и показателями генетического разнообразия по изоферментным маркерам

Table 4. Pairwise correlation coefficients between scores for the well-being (or poor state) of the hydroecological situation and indicators of genetic diversity based on isoenzyme markers

	баллы	A	A_e	H_o	H_e
баллы					
A	0,05				
A_e	-0,34	0,60			
H_o	-0,26	0,45	0,76		
H_e	-0,24	0,70	0,95	0,81	

Заключение

Полученные результаты позволяют расширить существующие представления относительно популяционно-генетической структуры комплек-

са *Pelophylax esculentus*, характеризующегося сложной гибридогенной природой. Анализ генетической структуры исследуемого региона на основании полиморфизмов белков (изоферментов) демонстрирует высокое разнообразие аллелей, обусловленное доминированием особей гибридной природы и интрогрессией. Данное явление представляет собой адаптационную реакцию популяции на нестабильность экологических условий местообитаний. Результаты проведенного анализа методом главных компонент, основанные на оценках генетических расстояний Неи и показателях дифференциации F-статистики Райта, указывают на наличие интенсивных миграционных процессов среди популяций данного вида, индуцированных антропогенным воздействием, что косвенно подтверждает негативную динамику гидроэкологических характеристик упомянутых малых рек и их водосборных территорий. Отсутствие тесной корреляционной связи между оценками гидроэкологической и гидрохимической ситуации малых рек Белгородской области и показателями генетического разнообразия в популяциях *P. esculentus* complex может служить основанием для уточнения системы и показателей гидроэкологического мониторинга и последующего уточнения (пересмотра) интегральных геоэкологических оценок.

При том стоит отметить, что нарушение показателей генетического разнообразия в популяциях *P. esculentus* complex, как в высокоурбанизированных ландшафтах, так и в квази-природной среде может быть связано, с одной стороны – с миграционными процессами особей, с другой – с серьезной антропогенной деформацией всех природных экосистем Белгородской области, в том числе и малых рек [7; 14; 15; 20; 33].

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FZWG-2025-0006.

Список литературы

1. Бархатов, А. С. (2022). *Популяционная структура комплекса среднеевропейских зеленых лягушек (Pelophylax esculentus complex) в условиях юга Среднерусской возвышенности* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, специальность 1.5.15]. 168 с. EDN: <https://elibrary.ru/KHCLAU>
2. Бархатов, А. С., & Снегин, Э. А. (2021). Фенотипическая структура популяций *Pelophylax esculentus* complex в условиях урбанизированных ландшафтов юга

- Среднерусской возвышенности. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки*, (3), 68–84. <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2021-3-7>. EDN: <https://elibrary.ru/JHGRAX>
3. Бархагов, А. С., Снегин, Э. А., & Юсупов, С. Р. (2021). Генетическая структура популяций комплекса зеленые лягушки (*Pelophylax esculentus* complex) на территории юга Среднерусской возвышенности. *Экологическая генетика*, 19(2), 107–119. <https://doi.org/10.17816/ecogen48555>. EDN: <https://elibrary.ru/XLXIWX>
 4. Боркин, Л. Я., Литвинчук, С. Н., Розанов, Ю. М., & Скоринов, Д. В. (2004). О криптических видах (на примере амфибий). *Зоологический журнал*, 83(8), 936–960. EDN: <https://elibrary.ru/OWGDLD>
 5. Вершинин, В. Л. (1997). *Экологические особенности популяций амфибий урбанизированных территорий* [Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук, 03.00.16]. Екатеринбург. 47 с. EDN: <https://elibrary.ru/ZKDFHJ>
 6. Вершинин, В. Л. (2007). *Биота урбанизированных территорий*. Екатеринбург. 73 с.
 7. Вершинин, В. Л., Ситников, И. А., Вершинина, С. Д., Трофимов, А. Г., Лебединский, А. А., & Миура, И. И. (2019). Митохондриальная гетероплазмия у озерной лягушки (*Pelophylax ridibundus* Pallas, 1771). *Генетика*, 55(8), 972–977. <https://doi.org/10.1134/S0016675819080174>. EDN: <https://elibrary.ru/MLXSHT>
 8. Дегтярь, А. В., Григорьева, О. И., & Татаринцев, Р. Ю. (2016). *Экология Белогорья в цифрах* [Монография]. Белгород: КОНСТАНТА. 122 с. ISBN 978-5-9786-0456-6. EDN: <https://elibrary.ru/ZEFKPZ>
 9. Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС». (2024). *Ежегодники качества поверхностных вод и эффективности проведенных водоохранных мероприятий по территории деятельности ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС»*. Курск.
 10. Ермаков, О. А., Файзулин, А. И., Закс, М. М., Кайбелева, Э. И., & Зарипова, Ф. Ф. (2014). Распространение «западной» и «восточной» форм озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* s. l. на территории Самарской и Саратовской областей (по данным анализа митохондриальной и ядерной ДНК). *Известия Самарского научного центра РАН*, 16(5-1), 409–412. EDN: <https://elibrary.ru/TVWSFJ>
 11. Замалетдинов, Р. И. (2002). Фенотипическая структура популяций зеленых лягушек на урбанизированных территориях. *Поволжский экологический журнал*, (2), 163–165.
 12. Замалетдинов, Р. И., Павлов, А. В., Закс, М. М., Иванов, А. Ю., & Ермаков, О. А. (2015). Молекулярно-генетическая характеристика лягушек *Pelophylax*

- esculentus* комплекса на восточной периферии ареала (Поволжье, Республика Татарстан). *Вестник Томского государственного университета. Биология*, (3-31), 54–66. <https://doi.org/10.17223/19988591/31/5>. EDN: <https://elibrary.ru/UMIEQJ>
13. Иванов, А. Ю. (2019). *Молекулярно-генетические и экологические особенности распространения криптических форм озерной лягушки в восточной части ареала* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, 03.02.08]. Пенза. 137 с. EDN: <https://elibrary.ru/HBFIIB>
 14. Киселев, В. В., & Корнилова, Е. А. (2025). Оценка общего гидроэкологического состояния малых рек Белгородской области. *Региональные геосистемы*, 49(1), 80–92. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-1-80-92>. EDN: <https://elibrary.ru/MRCUYB>
 15. Курепина, В. А., Киселев, В. В., & Корнилов, А. Г. (2022). Динамика гидроэкологической ситуации р. Тихая Сосна на территории Белгородской и Воронежской областей. *Региональные геосистемы*, 46(1), 108–118. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-1-108-118>. EDN: <https://elibrary.ru/RUFDUZ>
 16. Корнилова, Е. А., Лисецкий, Ф. Н., & Родионова, М. Е. (2023). Гидроэкологические особенности реки Ворсклы (российский участок) в контексте природно-хозяйственных изменений. *Региональные геосистемы*, 47(4), 550–568. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-550-568>. EDN: <https://elibrary.ru/PETHMS>
 17. Лада, Г. А. (2021). Изменения популяционных систем зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* complex) на территории Русской равнины. *Полевой журнал биолога*, (3-1), 53–63. <https://doi.org/10.52575/2658-3453-2021-3-1-53-63>. EDN: <https://elibrary.ru/LLMYZQ>
 18. Лисецкий, Ф. Н., Дегтярь, А. В., Буряк, Ж. А., Павлюк, Я. В., Нарожная, А. Г., Землякова, А. В., & Маринина, О. А. (2015). *Реки и водные объекты Белогорья*. Белгород: Константа. 362 с. ISBN 978-5-9786-0413-9. EDN: <https://elibrary.ru/VTQNNR>
 19. Макеева, В. М., Белоконов, М. М., Малюченко, О. П., & Леонтьева, О. А. (2006). Оценка состояния генофонда природных популяций позвоночных животных в условиях фрагментированного ландшафта Москвы и Подмосковья (на примере бурых лягушек). *Генетика*, 42(5), 628–642. EDN: <https://elibrary.ru/НТОВСВ>
 20. Остерман, Л. А. (1981). *Методы исследования белков и нуклеиновых кислот. Электрофорез и ультрацентрифугирование*. М.: Наука. 288 с.
 21. Петин, А. Н., Петина, М. А., & Новикова, Ю. И. (2014). *Северский Донец: гидрологический режим и экологическое состояние вод* [Монография]. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ». 184 с.

22. Присный, А. В., Седин, И. Ф., Червонный, В. В., Присный, Ю. А., Соколов, А. Ю., & Лобода, Б. М. (2012). *Животный мир Белгородской области* [Коллективная монография] (А. В. Присный, ред.). Белгород: Белгородская обл. тип. 400 с.
23. Свинин, А. О. (2015). *Распространение, типы популяционных систем и морфологическая изменчивость зеленых лягушек гибридогенного Pelophylax esculentus-комплекса на северо-востоке их ареалов* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, 03.02.04]. Казань. 205 с.
24. Снегин, Э. А., Снегина, Е. А., & Артемчук, О. Ю. (2019). Оценка генетической структуры популяций кустарниковой улитки (*Fruticicola fruticum*) на основе локусов неспецифических эстераз. *Экологическая генетика*, 17(4), 15–26. <https://doi.org/10.17816/ecogen17415-26>. EDN: <https://elibrary.ru/BIWHRN>
25. Файзулин, А. И., Замалетдинов, Р. И., Литвинчук, С. Н., Розанов, Ю. М., Боркин, Л. Я., Ермаков, О. А., Ручин, А. Б., Лада, Г. А., Свинин, А. О., Башинский, И. В., & Чихляев, И. В. (2018). Видовой состав и особенности распространения зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* complex) на особо охраняемых природных территориях Среднего Поволжья (Россия). *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.24189/ncr.2018.056>. EDN: <https://elibrary.ru/UZEZJA>
26. Шмальгаузен, И. И. (1968). *Факторы эволюции (Теория стабилизирующего отбора)*. М.: Наука. 451 с.
27. Berger, L. (1970). Some characteristics of crosses within *Rana esculenta* complex in postlarval development. *Annales Zoologici*, 27(17), 373–416.
28. Čavlović, K., Buj, I., Karaica, D., Jelić, D., & Choleva, L. (2018). Composition and age structure of the *Pelophylax esculentus* complex (Anura; Ranidae) population in inland Croatia. *Salamandra*, 54, 11–20. EDN: <https://elibrary.ru/SDXKTT>
29. Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), Article 4. 9 pp.
30. Peakall, R., & Smouse, P. E. (2006). GenAlEx 6: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research — an update. *Molecular Ecology Notes*, 6(1), 288–295. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x>
31. Skierska, K., Lagner, A., Rozenblut-Kościsty, B., et al. (2023). Population structure, mate choice, and genome transmission in naturally formed pairs in a *Pelophylax lessonae*–*Pelophylax esculentus* hybridogenetic system. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 77(8), 92. <https://doi.org/10.1007/s00265-023-03366-y>. EDN: <https://elibrary.ru/UDUVLK>
32. Svinin, A. O., Dedukh, D. V., Borkin, L. J., et al. (2021). Genetic structure, morphological variation, and gametogenic peculiarities in water frogs (*Pelophylax*) from

- northeastern Europe. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 59, 646–662. <https://doi.org/10.1111/jzs.12447>. EDN: <https://elibrary.ru/HYLIGR>
33. Plötner, J. (2005). *Die westpaläarktischen Wasserfrösche: von Märtyren der Wissenschaft zur biologischen Sensation*. Bielefeld: Laurenti-Verlag. 160 p. (Beiheft der Zeitschrift für Feldherpetologie, 9).
34. Lisetskii, F. N., & Buryak, Z. A. (2023). Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin. *Water*, 15(13), 2443. <https://doi.org/10.3390/w15132443>. EDN: <https://elibrary.ru/VRTLTU>
35. Uzzell, T., Gunther, R., & Berger, L. (1977). *Rana ridibunda* and *Rana esculenta*: A leaky hybridogenetic system (Amphibia Salientia). *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 128(9), 147–171.
36. Tunner, H. G. (1973). Das Albumin und andere Bluteiweiße bei *Rana ridibunda* Pallas, *Rana lessonae* Camerano, *Rana esculenta* Linne und deren Hybriden. *Zeitschrift für Zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 11, 219–233.
37. Tunner, H. G. (1974). Die klonale Struktur einer Wasserfroschpopulation. *Zeitschrift für zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 12(4), 309–314.
38. Vinogradov, A. E., Borkin, L. J., Günther, R., & Rosanov, J. M. (1990). Genome elimination in diploid and triploid *Rana esculenta* males: Cytological evidence from DNA flow cytometry. *Genome*, 33(5), 619. <https://doi.org/10.1139/g90-092>. EDN: <https://elibrary.ru/XOFJWI>
39. Wright, S. (1970). *Random drift and shifting balance theory of evolution. Mathematical topics in population genetics*. Berlin: Springer Verlag. 31 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46244-3_1

References

1. Barkhatov, A. S. (2022). *Population structure of the Central European green frog complex (*Pelophylax esculentus* complex) in the southern part of the Central Russian Upland* [Doctoral dissertation, specialty 1.5.15]. 168 pp. EDN: <https://elibrary.ru/KHCLAU>
2. Barkhatov, A. S., & Snegin, E. A. (2021). Phenotypic structure of *Pelophylax esculentus* complex populations in urbanized landscapes of the southern Central Russian Upland. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Povolzhskiy Region. Natural Sciences*, (3), 68–84. <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2021-3-7>. EDN: <https://elibrary.ru/JHGRAX>
3. Barkhatov, A. S., Snegin, E. A., & Yusupov, S. R. (2021). Genetic structure of green frog complex (*Pelophylax esculentus* complex) populations in the southern part of the Central Russian Upland. *Ecological Genetics*, 19(2), 107–119. <https://doi.org/10.17816/ecogen48555>. EDN: <https://elibrary.ru/XLXIWX>

4. Borkin, L. Ya., Litvinchuk, S. N., Rozanov, Yu. M., & Skorinov, D. V. (2004). On cryptic species (using amphibians as an example). *Zoological Journal*, 83(8), 936–960. EDN: <https://elibrary.ru/OWGDLD>
5. Vershinin, V. L. (1997). *Ecological features of amphibian populations in urbanized areas* [Abstract of doctoral dissertation, 03.00.16]. Yekaterinburg. 47 pp. EDN: <https://elibrary.ru/ZKDFHJ>
6. Vershinin, V. L. (2007). *Biota of urbanized areas*. Yekaterinburg. 73 pp.
7. Vershinin, V. L., Sitnikov, I. A., Vershinina, S. D., Trofimov, A. G., Lebedinsky, A. A., & Miura, I. I. (2019). Mitochondrial heteroplasmy in the marsh frog (*Pelophylax ridibundus* Pallas, 1771). *Genetics*, 55(8), 972–977. <https://doi.org/10.1134/S0016675819080174>. EDN: <https://elibrary.ru/MLXSHT>
8. Degtyar, A. V., Grigorieva, O. I., & Tatarintsev, R. Yu. (2016). *Ecology of Belogorye in numbers* [Monograph]. Belgorod: Konstanta. 122 pp. ISBN 978-5-9786-0456-6. EDN: <https://elibrary.ru/ZEFKPZ>
9. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet), Central Black Earth Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring. (2024). *Annual reports on surface water quality and effectiveness of water protection measures within the area of operation of the Central Black Earth Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring*. Kursk.
10. Ermakov, O. A., Faizulin, A. I., Zaks, M. M., Kaibeleva, E. I., & Zaripova, F. F. (2014). Distribution of the “western” and “eastern” forms of the marsh frog *Pelophylax ridibundus* s. l. in the Samara and Saratov regions (based on mitochondrial and nuclear DNA analysis). *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 16(5-1), 409–412. EDN: <https://elibrary.ru/TVWSFJ>
11. Zamaletdinov, R. I. (2002). Phenotypic structure of green frog populations in urbanized areas. *Povolzhsky Ecological Journal*, (2), 163–165.
12. Zamaletdinov, R. I., Pavlov, A. V., Zaks, M. M., Ivanov, A. Yu., & Ermakov, O. A. (2015). Molecular genetic characteristics of frogs of the *Pelophylax esculentus* complex in the eastern periphery of the range (Volga region, Republic of Tatarstan). *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, (3-31), 54–66. <https://doi.org/10.17223/19988591/31/5>. EDN: <https://elibrary.ru/UMIEQJ>
13. Ivanov, A. Yu. (2019). *Molecular genetic and ecological features of the distribution of cryptic forms of the marsh frog in the eastern part of the range* [Doctoral dissertation, 03.02.08]. Penza. 137 pp. EDN: <https://elibrary.ru/HBFIIB>
14. Kiselev, V. V., & Kornilova, E. A. (2025). Assessment of the general hydroecological state of small rivers in the Belgorod region. *Regional Geosystems*, 49(1), 80–92. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-1-80-92>. EDN: <https://elibrary.ru/MRCUYB>

15. Kurepina, V. A., Kiselev, V. V., & Kornilov, A. G. (2022). Dynamics of the hydroecological situation of the Tikhaya Sosna River in the Belgorod and Voronezh regions. *Regional Geosystems*, 46(1), 108–118. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-1-108-118>. EDN: <https://elibrary.ru/RUFDUZ>
16. Kornilova, E. A., Lisetskii, F. N., & Rodionova, M. E. (2023). Hydroecological features of the Vorskla River (Russian section) in the context of natural and economic changes. *Regional Geosystems*, 47(4), 550–568. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-550-568>. EDN: <https://elibrary.ru/PETHMS>
17. Lada, G. A. (2021). Changes in population systems of green frogs (*Pelophylax esculentus* complex) in the East European Plain. *Field Journal of Biologist*, (3-1), 53–63. <https://doi.org/10.52575/2658-3453-2021-3-1-53-63>. EDN: <https://elibrary.ru/LLMYZQ>
18. Lisetskii, F. N., Degtyar, A. V., Buryak, Zh. A., Pavlyuk, Ya. V., Narozhnyaya, A. G., Zemlyakova, A. V., & Marinina, O. A. (2015). *Rivers and water bodies of Belogorje*. Belgorod: Konstanta. 362 pp. ISBN 978-5-9786-0413-9. EDN: <https://elibrary.ru/VTQNNR>
19. Makeeva, V. M., Belokon, M. M., Malyuchenko, O. P., & Leontyeva, O. A. (2006). Assessment of the gene pool state of natural vertebrate populations under fragmented landscape conditions in Moscow and the Moscow region (using brown frogs as an example). *Genetics*, 42(5), 628–642. EDN: <https://elibrary.ru/HTOBCB>
20. Osterman, L. A. (1981). *Methods for studying proteins and nucleic acids: Electrophoresis and ultracentrifugation*. Moscow: Nauka. 288 pp.
21. Petin, A. N., Petina, M. A., & Novikova, Yu. I. (2014). *Seversky Donets: Hydrological regime and ecological state of waters* [Monograph]. Belgorod: Publishing House “Belgorod”, Belgorod State National Research University. 184 pp.
22. Prisnyi, A. V., Sedin, I. F., Chervonnyi, V. V., Prisnyi, Yu. A., Sokolov, A. Yu., & Loboda, B. M. (2012). *Fauna of the Belgorod Region* [Collective monograph] (A. V. Prisnyi, Ed.). Belgorod: Belgorod Regional Printing House. 400 pp.
23. Svinin, A. O. (2015). *Distribution, types of population systems, and morphological variability of green frogs of the hybridogenetic Pelophylax esculentus complex in the northeastern part of their range* [Doctoral dissertation, 03.02.04]. Kazan. 205 pp.
24. Snegin, E. A., Snegina, E. A., & Artemchuk, O. Yu. (2019). Assessment of the genetic structure of shrub snail (*Fruticicola fruticum*) populations based on nonspecific esterase loci. *Ecological Genetics*, 17(4), 15–26. <https://doi.org/10.17816/ecogen17415-26>. EDN: <https://elibrary.ru/BIWHRN>
25. Faizulin, A. I., Zamaletdinov, R. I., Litvinchuk, S. N., Rozanov, Yu. M., Borkin, L. Ya., Ermakov, O. A., Ruchin, A. B., Lada, G. A., Svinin, A. O., Bashinsky, I. V., & Chikhlyayev, I. V. (2018). Species composition and distribution patterns of green

- frogs (*Pelophylax esculentus* complex) in protected areas of the Middle Volga region (Russia). *Nature Conservation Research. Reserve Science*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.24189/ncr.2018.056>. EDN: <https://elibrary.ru/UZEZJA>
26. Shmalgauzen, I. I. (1968). *Factors of evolution (Theory of stabilizing selection)*. Moscow: Nauka. 451 pp.
 27. Berger, L. (1970). Some characteristics of crosses within *Rana esculenta* complex in postlarval development. *Annales Zoologici*, 27(17), 373–416.
 28. Čavlović, K., Buj, I., Karaica, D., Jelić, D., & Choleva, L. (2018). Composition and age structure of the *Pelophylax esculentus* complex (Anura; Ranidae) population in inland Croatia. *Salamandra*, 54, 11–20. EDN: <https://elibrary.ru/SDXKTT>
 29. Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), Article 4. 9 pp.
 30. Peakall, R., & Smouse, P. E. (2006). GenA1Ex 6: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research — an update. *Molecular Ecology Notes*, 6(1), 288–295. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x>
 31. Skierska, K., Lagner, A., Rozenblut-Kościsty, B., et al. (2023). Population structure, mate choice, and genome transmission in naturally formed pairs in a *Pelophylax lessonae*–*Pelophylax esculentus* hybridogenetic system. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 77(8), 92. <https://doi.org/10.1007/s00265-023-03366-y>. EDN: <https://elibrary.ru/UDUVLK>
 32. Svinin, A. O., Dedukh, D. V., Borkin, L. J., et al. (2021). Genetic structure, morphological variation, and gametogenic peculiarities in water frogs (*Pelophylax*) from northeastern Europe. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 59, 646–662. <https://doi.org/10.1111/jzs.12447>. EDN: <https://elibrary.ru/HYLIGR>
 33. Plötner, J. (2005). *Die westpaläarktischen Wasserfrösche: von Märtyrern der Wissenschaft zur biologischen Sensation*. Bielefeld: Laurenti-Verlag. 160 pp. (Beiheft der Zeitschrift für Feldherpetologie, 9).
 34. Lisetskii, F. N., & Buryak, Z. A. (2023). Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin. *Water*, 15(13), 2443. <https://doi.org/10.3390/w15132443>. EDN: <https://elibrary.ru/VRTLTY>
 35. Uzzell, T., Gunther, R., & Berger, L. (1977). *Rana ridibunda* and *Rana esculenta*: A leaky hybridogenetic system (Amphibia Salientia). *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 128(9), 147–171.
 36. Tunner, H. G. (1973). Das Albumin und andere Bluteiweiße bei *Rana ridibunda* Pallas, *Rana lessonae* Camerano, *Rana esculenta* Linne und deren Hybriden. *Zeitschrift für Zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 11, 219–233.

37. Tunner, H. G. (1974). Die klonale Struktur einer Wasserfroschpopulation. *Zeitschrift für zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 12(4), 309–314.
38. Vinogradov, A. E., Borkin, L. J., Günther, R., & Rosanov, J. M. (1990). Genome elimination in diploid and triploid *Rana esculenta* males: Cytological evidence from DNA flow cytometry. *Genome*, 33(5), 619. <https://doi.org/10.1139/g90-092>. EDN: <https://elibrary.ru/XOFJWI>
39. Wright, S. (1970). *Random drift and shifting balance theory of evolution. Mathematical topics in population genetics*. Berlin: Springer Verlag. 31 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46244-3_1

ВКЛАД АВТОРОВ

- Бархатов А.С.:** Формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач. Общее руководство. Сбор образцов для исследования. Проведение экспериментальной части. Написание черновика рукописи.
- Снегин Э.А.:** Формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач. Общее руководство. Проведение экспериментальной части.
- Киселев В.В.:** Сбор образцов для исследования. Интерпретация результатов исследования. Анализ гидрохимического состояния рассматриваемых водных объектов. Ранжирование (балльная оценка) пунктов отбора по степени антропогенного воздействия на водную среду различных антропо-функциональных зонах. Написание черновика рукописи.
- Снегина Е.А.:** Статистическая обработка данных. Визуализация данных. Интерпретация результатов исследования. Подбор и анализ литературы.
- Корнилов А.Г.:** Общее руководство. Проведение корреляционного анализа между показателями внутривидовой дифференциации тест-объектов с данными экспертных оценок гидроэкологической ситуации в районах исследования, построенными с учетом гидрохимического фона.
- Раевская М.В.:** Профессиональный перевод статьи на английский язык, подбор и анализ списка литературы по гидроэкологической и гидрохимической тематике. Редактирование рукописи и оформление рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

- Anatoly S. Barkhatov:** Formation of an idea; formulation or development of key goals and objectives. General management. Collection of samples for research. Conducting the experimental part. Writing a draft manuscript.
- Eduard A. Snegin:** Formation of an idea; formulation or development of key goals and objectives. General management. Conducting the experimental part.
- Vladislav V. Kiselev:** Collection of samples for research. Interpretation of research results. Analysis of the hydrochemical state of the water bodies under consideration.

Ranking (point assessment) of sampling points according to the degree of anthropogenic impact on the aquatic environment in various anthropo-functional zones. Writing a draft manuscript.

Elena A. Snegina: Statistical data processing. Data visualization. Interpretation of research results. Selection and analysis of literature.

Andrey G. Kornilov: General management. Conducting a correlation analysis between the indicators of intraspecific differentiation of test objects and expert assessments of the hydroecological situation in the study areas, taking into account the hydrochemical background.

Maria V. Raevskaya: Professional translation of the article into English, selection and analysis of the list of literature on hydroecological and hydrochemical topics. Editing and formatting the manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Бархатов Анатолий Сергеевич, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник НИЦ Геномной селекции

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
barkhatov@bsu.edu.ru*

Снегин Эдуард Анатольевич, доктор биологических наук, профессор, директор НИЦ Геномной селекции

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
snegin@bsu.edu.ru*

Киселев Владислав Викторович, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
kiselev_v@bsuedu.ru*

Снегина Елена Андреевна, научный сотрудник НИЦ Геномной селекции

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
snegina@bsu.edu.ru*

Корнилов Андрей Геннадьевич, доктор географических наук, профессор, ведущий кафедрой географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
kornilov@bsuedu.ru*

Раевская Мария Викторовна, ассистент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
raevskaya@bsuedu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anatoly S. Barkhatov, Candidate of Biological Sciences, Junior Research Fellow at the Research Center for Genomic Selection

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
barkhatov@bsu.edu.ru*

Eduard A. Snegin, Doctor of Biological Sciences, Professor, Director of the Research Center for Genomic Selection

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
snegin@bsu.edu.ru*

Vladislav V. Kiselev, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor in the Department of Geography, Geoecology, and Life Safety at the Institute of Earth Sciences

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
kiselev_v@bsuedu.ru*

Elena A. Snegina, Research Associate, Research Center for Genomic Selection

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
snegina@bsu.edu.ru*

Andrey G. Kornilov, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Chair of the Department of Geography, Geoecology, and Life Safety at the Institute of Earth Sciences

Belgorod State University

85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation

kornilov@bsuedu.ru

Maria V. Raevskaya, Assistant Professor, Department of Geography, Geoecology, and Life Safety, Institute of Earth Sciences

Belgorod State University

85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation

raevskaya@bsuedu.ru

Поступила 10.12.2025

После рецензирования 04.02.2026

Принята 26.02.2026

Received 10.12.2025

Revised 04.02.2026

Accepted 26.02.2026

Почвоведение / Soil Science

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1464](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1464)EDN: [IMXVDJ](#)

UDC 631.432:551.491



Using effective moisture content to predict sorptivity

Faris A. Al-Wazzan

University of Mosul, Mosul, Iraq

Abstract

Background. Soil sorptivity is a critical hydraulic property governing early-stage infiltration though it is difficult to measure it directly in field conditions. Effective moisture content (Se) is a more accessible hydraulic parameter that may serve as a proxy.

Purpose. This study aimed to evaluate the potential of effective moisture content, measured at a tension of 336 cm water, to predict soil sorptivity across varying soil textures in semi-arid northern Iraq.

Materials and methods. Eight soil samples (sandy clay loam to clay) were collected from Nineveh Province. Effective moisture content was calculated from saturated and residual moisture measurements. Sorptivity was determined assuming both spherical and cubic aggregate geometries.

Results. Effective moisture content at 336 cm water showed a strong linear relationship with sorptivity ($R^2 = 0.94$ for spherical aggregates). Clay content was the dominant factor influencing both parameters. The spherical aggregate assumption produced higher and more representative sorptivity values compared to cubic geometry.

Keywords: effective moisture content; sorptivity; hydraulic functions; porous medium

For citation. Al-Wazzan, F. A. (2026). Using effective moisture content to predict sorptivity. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 129–141. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1464>

Introduction

It takes time and effort to accurately calculate the soil hydraulic function values. many attempts have been made to develop different methods for predicting a number of hydraulic functions, including effective moisture content. unsaturated hydraulic conductivity and water retention curve [1]. Most predic-

tion models are essentially based on assumptions about capillary medium characteristics and on the volumetric distribution of soil pores. These assumptions are widely accepted in theory and been found valid in practice. Various mathematical models have been used to describe the hydraulic functions of the soil [2-4]. Effective Moisture Content is one of the important hydraulic functions of the soil and is actually calculated using the following equation:

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

where $\theta(h)$ = Moisture content at influencer tensions.

(θ_r, θ_s) = residual and saturated moisture content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Numerous attempts have been made to develop mathematical models to predict effective moisture content values (S_e), the most important of which is:

Brooks and Corey Model (1964)

It depends mainly on the air-entry value, and this model represents the basis for other mathematical models [5].

$$S_e = (\psi_e / \psi)^{-\lambda} \quad \psi < \psi_e \\ S_e = 1 \quad \psi \geq \psi_e \quad (2)$$

where S_e = predicted effective moisture content. ψ_e = air-entry value.

λ = is an empirical parameter often referred to as the pore size distribution index, ψ = matric potential at any point.

It should be indicated that the use of this model showed good results for predicting the water properties of the soil [6].

Van Genuchten Model (1980)

Being a closed-form analytical mathematical model developed from [5]. The model depending on the relationship between volumetric moisture content and tensions Therefore, it is called the moisture retention model [7]. It is considered one of the most important mathematical models for the moisture retention curve and he relied on it to develop numerical models and solutions and to use software to predict soil water characteristics as in the HYDRUS-1D to predict some soil hydraulic parameters [1; 2; 8].

$$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (3)$$

The right side of the equation represents the predicted effective moisture content (S_e).

where h = soil water pressure (cm).

n and m are curve shape parameters of water retention. The parameter (α) is described as inverse of the pressure head at the point, it is a n value greater than (1), Either (m) value is related to (n) value and equal to ($m = \frac{1}{1 - n}$).

Modified Water Retention Equation (MWR)

The model was modified by [9;10] to obtain a modified water retention equation, to predict the moisture content in terms of tensions, the following formula is used:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_m - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad h < h_s \quad (4)$$

$$\theta_s \quad h \geq h_s$$

where (θ_m) = represents an extension of the curve line as well as the theoretical basis for the modification of the equation. As the moisture content upon saturation (θ_s) , is replaced by an estimating factor, which is (θ_m) and always be $\theta_m > \theta_s$.

The most accurate result is in favour of (θ_m) .

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \quad (5)$$

$$\theta_m = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + |\alpha h_s|^n)^m \quad (6)$$

The effective moisture content was used to predict some hydraulic functions for soil [11], used the equations of [9;12]. To obtain a model for calculating the unsaturated hydraulic conductivity, as in the following model:

$$K(\theta) = K_0 S_e^L \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^2 \right] \quad (7)$$

where $K(\theta)$ = unsaturated hydraulic conductivity, K_0 = saturated hydraulic conductivity, L = a constant related to the soil pores; imposed by Mualem by (0.5).

The MVG model is successful for describing water movement and runoff in an unsaturated condition, as well as the mathematical properties of the model to estimate the range of different soil textures, especially medium and coarse. Several attempts have been made to modify the model and make it more flexible, especially for fine textures with high clay content the modification of the model was when linking the modified water retention equation with the MVG model is obtained modified model MMVG as stated in [11].

$$K(S_e) = K_0 S_e^L \left[\frac{1 - F(S_e)}{1 - F(1)} \right]^2 \quad (8)$$

$$\text{Where } F(S_e) = [1 - (S_e)^{1/m}]^m \quad (9)$$

sorptivity depends on the initial moisture content (θ_o) , Since the value (S) ,

It is almost Non-existent when the initial moisture content reaches (θ_s) , The sorptivity is a function of the cumulative infiltration values [13].

$$I = S t^{0.5} \quad (10)$$

where I = Horizontal cumulative infiltration (cm).

S = sorptivity ($\text{cm min}^{-0.5}$).

The study *aims* to develop a new and easy method for measuring sorptivity. This is an important and difficult property to measure. Therefore, this research represents an innovative scientific method for measuring hydraulic functions in a simple way, which saves a lot of time and effort.

Materials and methods

Soil sample collection

Surface soil samples were collected at a depth of (0-30) cm. For eight sites with different textures, under various plant covers. It ranged from sandy clay loam to clayey, and from different regions in Nineveh province, northern Iraq. It is about by 222 meters above sea level and is considered among the arid and semi-arid area. The soil is calcareous and the largest group according to the American classification is Calciorthisds. Soil samples were taken to the laboratory aggregations were obtained through a sieve with a diameter of (9) mm, and it received the permeable part on a sieve of the diameter of its openings (4) mm, soil aggregate were taken and dried under laboratory conditions, soil samples were also obtained for the remainder of the soil after drying, grinding and passing it through a sieve with a diameter of (2) mm, to be ready for various physical and chemical analyzes.

Physical and chemical analyzes of the soil

Some chemical and physical properties were measured according to [14]. The volumetric distribution of soil particles was estimated using the hydrometer method, as stated in [15]. The bulk density was estimated using the core sample method using an open-ended metal cylinder with a height of (5) cm and a diameter of (4.5) cm, as stated in [16]. The electrical conductivity (EC) of soil and water extract (1:1) was measured using an EC-meter. The degree of reactivity of the soil pH was measured using a pH-meter and according to the method reported by [17]. The organic matter was quantified by the method of wet digestion and as stated in Walkely and Black cited in [18]. The soil content of total carbonates, positive ions and negative ions were estimated according to the methods described by [19]. Tables (1 and 2) show the results of the chemical and physical analyzes.

Table 1.

Some chemical properties of the soil study

Texture	Property				
	pH	EC dSm ⁻¹	Na exchanged	CEC	Total carbonate g kg ⁻¹
			Cmolc kg ⁻¹		
Clay	8.30	1.66	2.22	27	360
loam	7.65	2.10	3.70	23	260

Clay loam	8.11	0.45	0.75	26	330
Silty loam	7.67	3.12	3.90	28	275
Silty clay loam	7.80	1.30	2.05	29	305
Silty clay	8.22	0.68	0.92	31	380
Sandy clay	7.70	0.73	1.37	18	240
Sandy clay loam	7.78	0.82	1.65	16	255

Table 2.

Some physical properties of the soil study

Soil type	Order	Soil particle fractions gm. Kg ⁻¹			Bulk density Mg. m ⁻³	Total porosity cm.cm ⁻¹	Initial Volumetric water content cm.cm ⁻³	Hydraulic conductivity cm. hr ⁻¹	Soil Organic Matter gm. Kg ⁻¹
		Clay	silt	sand					
Clay	ARIDISOLS	560	300	140	1.17	0.558	0.24	0.075	20.55
loam	ENTISOLS	210	420	370	1.33	0.498	0.141	0.255	11.30
Clay loam	ENTISOLS	350	360	290	1.36	0.486	0.192	0.144	12.76
Silty loam	ARIDISOLS	200	640	160	1.30	0.509	0.183	0.200	10.63
Silty clay loam	ENTISOLS	330	515	155	1.34	0.494	0.190	0.104	8.40
Silty clay	ARIDISOLS	455	460	85	1.38	0.479	0.200	0.111	5.88
Sandy clay	ARIDISOLS	405	100	495	1.27	0.520	0.188	0.287	4.50
Sandy clay loam	ENTISOLS	240	205	555	1.31	0.505	0.121	0.406	3.75

Sorptivity measurement

The hydration velocity of the soil aggregates was measured according to the method proposed by [20]. Assuming that the shape of the soil aggregates is cubic. Six soil aggregates weighing (3) gm were taken, It was placed on the ceramic surface inside the glass funnel to increase the contact of soil aggregates with water. The sorptivity was calculated using the following method:

1. The total volume of the six soil aggregates = The mass of soil aggregates of (3) gm divided by bulk density.
2. The size of one group = The total volume of the six soil aggregates divided by (6).
3. The length of the side of the cube = The cube root (power of the 0.33) of the volume of one group.
4. Area of one face of the cube = The length of the side of the cube multiplied by itself.
5. The total surface area of soil aggregates in contact with water= The area of one face of the cube multiplied by (6).
6. The depth of the absorbed water (I) = The volume of water absorbed divided by total surface area.

The volume of absorbed water is calculated per unit time for five readings and for a period not exceeding 7-10 minutes.

While the sorptivity (S) was calculated assuming the spherical shape in the following way:

1. Six aggregates of soil are taken that passed through a sieve with a diameter of openings of (6) mm and settled on a sieve with a diameter of openings of (4) mm. After that, the mean of the diameters of the sieves (6 and 4) is found, which is equal to 5 mm and converted to centimeters, so it is 0.5 cm
2. Finding the radius of one group equal to 0.25. While the surface area of one group is calculated using the law:

$$\text{surface area} = 4 \pi r^2 \quad (11)$$

It is equal to 0.785 cm^2 surface area for one group, while the six groups are 4.712 cm^2 .

3. The surface is in contact with water for a spherical shape, assume (0.3) So the surface in contact with water is 1.413 cm^2 .
4. The depth of the absorbed water (I) is calculated by dividing the volume of the absorbed water (which is measured for each texture) by the surface in contact with the water, and by knowing the time, the sorptivity is calculated.

Results and discussion

Effective moisture content

The results showed an increase of measured effective moisture content (Se_m), at the low tension of (336) cm; It ranged from 0.488 for the clay texture to 0.354 for the sandy clay loam texture Table (3). While these values decreased with increasing tension and for all texture, the reason for this is due to the ability of fine soils to retain moisture at different tensions, which increased the values of (Se_m), the high ability of these soils to retain moisture, due to their large specific surface area and high percentages of fine interstitial spaces, which led to slow movement of water and not easy loss from the soil, and this is consistent with the results of [21]. While coarse soils lose more moisture with increasing tension, which reduces the effective moisture content values the reason for this is due to the large porous size of these soils with wide passages, which helped the movement and loss of water the moisture content is also within the porous medium of the soil, starting from the saturation state (θ_s), to the residual moisture content (θ_r), It is associated with a direct relationship with the content of soil clay; Therefore, a clear decrease was observed for the values of (Se_m), with a decrease in the proportion of clay and

all study sites. Thus, the effective moisture content is a function of the ability of soils to retain moisture and its content of clay and a means of predicting unsaturated hydraulic conductivity, and this is consistent with what was indicated by [6; 22-24]. It was also noted a secondary role for other physical soil characteristics in affecting the effective moisture content values, represented in the percentage of organic matter and porosity, which was the highest percentage in the clay texture which contributed to increasing the ability of the soil to retain water and at different tensions; While the saturated hydraulic conductivity (K_s), is a function of the soil content of clay separator and is associated with an inverse relationship with the clay percentage. The lowest value was recorded in clay soils, which was $0.075 \text{ cm} \cdot \text{hr}^{-1}$. While the highest value was at the sandy clay loam which reached $0.406 \text{ cm} \cdot \text{hr}^{-1}$. Therefore, the saturated hydraulic conductivity gives an initial idea of the values of other water functions, including the effective moisture content.

Sorptivity

The results showed that the sorptivity values calculated assuming the spherical shape of the aggregates were higher than their values for the cubic shape and for all soil textures Table (4). The reason for this is that the part in contact with the water of the soil aggregates is larger for the spherical shape, which represents 0.3 of the total area so it gives more opportunity for water absorption and movement within the porous medium; While the cube shape is the area of one face of the cube's six faces, which gives less opportunity for water movement. The geometric shape of the soil aggregates is important in understanding the movement of water and salts within the medium, and it gives an image of the regularity and distribution of particles and good construction. The geometric shape of the arrangement of the particles gives a preliminary idea of the values of the different water function. Therefore, the measured sorptivity values for the spherical shape were more realistic than the cubic shape. The results also showed that there is a direct relationship between the soil content of clay and the absorptive values, because of the role of clay with a high surface area, which gives a greater chance of moisture retention and water absorption; Then the fine silt separator of a size close to the size of clay which has a role similar to the clay, while the role of sand is reversed because of the size of its large particles. The results also showed that there is an inverse relationship between the saturated water conductivity values and the sorptivity values, we note that the clay soil, which recorded the highest values of (S), reached 410 and $0.471 \text{ (cm min}^{-0.5}\text{)}$, for the cubic and spherical shapes, respectively. It had the lowest percentage of saturated hydraulic conductivity (K_s) which was $0.075 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$; This indicates the ability of these soils to retain more water and lose it slowly, the reason for this may be due to the formation of fine bundles of capillary tubes

that have the ability to hold water in addition to the specific surface area of the clay that retain the maximum amount of water and at all tensions; as for the sandy clay loam, which recorded the lowest values of (S), which amounted to 0.330 and 0.348 ($\text{cm min}^{-0.5}$), for the cubic and spherical shapes It had the highest value of saturated hydraulic conductivity, which was (0.406) cm. h^{-1} . This reflects the ability of this soil to lose water quickly due to the weakness of the specific surface area, which increase the values of hydraulic conductivity.

Table 3.

Measured effective moisture content (Se_m) at different tensions								
Tension cm water	Moisture at tension $\theta(h)$ and Measured effective moisture content (Se_m)							
	Clay	loam	Clay loam	Silty loam	Silty clay loam	Silty clay	Sandy clay	Sandy clay loam
$\theta(h)$ 336	0.401	0.270	0.345	0.290	0.340	0.340	0.255	0.200
(Se_m)	0.488	0.456	0.470	0.433	0.472	0.437	0.373	0.354
1021	0.362	0.235	0.300	0.271	0.290	0.300	0.226	0.170
	0.397	0.345	0.353	0.370	0.333	0.329	0.281	0.258
5105	0.270	0.176	0.232	0.200	0.223	0.270	0.182	0.125
	0.183	0.156	0.169	0.133	0.147	0.140	0.136	0.112
7147	0.245	0.143	0.199	0.190	0.195	0.200	0.160	0.100
	0.125	0.051	0.080	0.10	0.069	0.059	0.072	0.032
9189	0.222	0.138	0.181	0.171	0.180	0.189	0.145	0.096
	0.072	0.035	0.032	0.036	0.027	0.029	0.025	0.019
11231	0.200	0.130	0.176	0.164	0.174	0.182	0.141	0.092
	0.020	0.009	0.018	0.013	0.011	0.010	0.0126	0.006
θ_e	0.621	0.440	0.540	0.460	0.530	0.548	0.453	0.400
θ_r	0.191	0.127	0.169	0.160	0.170	0.176	0.137	0.090

Table 4.

Sorptivity values assuming the shape of the spherical and cubic aggregates					
Texture	Clay con- tent gm. Kg ⁻¹	(Sorptivity) as- sumption		effective mois- ture content at 336 cm water	Hydrau- lic con- ductivity, cm. hr ⁻¹
		cubic aggre- gates	spherical aggre- gates		
		(cm.min ^{-0.5})			
Clay	560	0.410	0.471	0.488	0.075
loam	210	0.349	0.364	0.456	0.255
Clay loam	350	0.438	0.459	0.470	0.144
Silty loam	200	0.400	0.421	0.433	0.200
Silty clay loam	330	0.443	0.462	0.472	0.104
Silty clay	455	0.411	0.430	0.437	0.111
Sandy clay	405	0.352	0.365	0.373	0.287
Sandy clay loam	240	0.330	0.348	0.354	0.406

Effective moisture content and its relationship to sorptivity

The results showed that the effective moisture content values, which represent one of the important and relatively easy-to-measure hydraulic functions, are a function of other hydraulic functions that are more difficult and complex to estimate. When making a relationship between the values of effective moisture content (S_e) at different tensions and linking them to the values of sorptivity (S), It was found that the best agreement appeared with us at the values of the effective moisture content at tension of 336 cm water and for all soil textures. The reason may be due to the fact that the tension of 336 cm represents the first stage of entering the water; It also corresponds to the beginning of the infiltration, so this tension was adopted as a function of sorptivity, while the effective moisture content at high tensions can be adopted as a function of other water functions such as diffusivity or unsaturated hydraulic conductivity. Therefore, the sorptivity (S) is a hydraulic property of the porous medium affected by the matric potential and has low values in coarse soils and high in clay soils. The results showed that when assuming the shape of the cubic aggregates, the relationship between the effective moisture content at tension of 336 cm water was close to the measured (S) values for all texture. Figure (1) and the fine the textures or the higher the clay content, the more accurate the values In other words, the values of effective moisture content (S_e) at this tension are close to the sorptivity (S) values with the increase in the proportion of clay ,while we have a slight difference when the percentage of clay is low and the percentage of sand is high, the reason for this may be due to the difficulty of arranging the soil granules in a cubic shape when the percentage of sand is high.

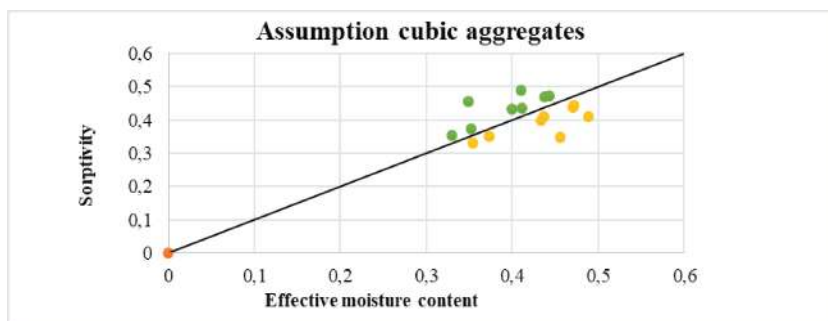


Fig. 1. The relationship between the effective moisture content and the Sorptivity values, assuming the cubic shape of the soil aggregate.

The results showed that when comparing the effective moisture content values when tension 336 cm of water with the sorptivity values, the spherical

shape of the soil aggregates has a high agreement between the values and the closeness of the values for all textures, the deviations that appeared in the cubic shape were treated when adopting the spherical shape of the soil aggregates, the reason for this may be due to the fact that the spherical shape is more realistic for the arrangement of soil grains and has a higher water absorption at effective tension and for all the texture representing different locations, Figure (2) also, adopting the area in contact with water estimated at 0.3 is more accurate to represent the surface in contact with water. Thus, the effective moisture content at tension 336 cm of water is a function or an alternative method for measuring sorptivity in an easier and suitable way for all soil textures.

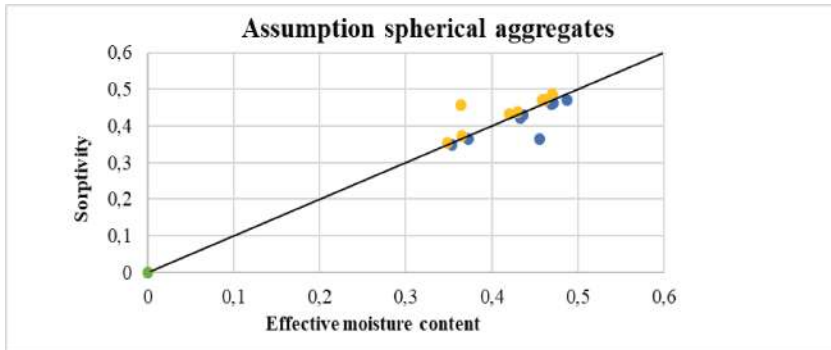


Fig. 2. The relationship between the effective moisture content and the sorptivity values, assuming the spherical shape of the soil aggregates.

Conclusion

This study proves the need to measure the effective moisture content, which is one of the important hydraulic functions, which is directly related to the physical properties of the soil especially the soil content of clay. It is one of the easy-to-measure functions. Thus, it is possible to predict difficult-to-measure hydraulic functions, depending on the effective tension. This study showed the possibility of adopting the values of the effective moisture content at tension of 336 cm of water as a function of the sorptivity values or an alternative innovative method for measuring absorbance over a large range of texture and adopting the spherical shape of the soil aggregates, is more realistic, than the cubic shape. Bearing in mind that the most suitable surface in contact with water is at 0.3 future studies can be conducted on the effective moisture content at high tensions to be a function of measuring more difficult water functions such as unsaturated water conductivity or diffusivity.

Acknowledgment. The author expresses deep gratitude to the University of Mosul, College of Agriculture and Forestry for their provided facilities, which helped to improve the quality of this work.

References

1. Al-Wazzan, F. (2025). Using Hydrus-1D software to predict cumulative infiltration values for different soil textures. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 283–299. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1035>. EDN: <https://elibrary.ru/KTSAMQ>
2. Mohammed, E., Abid-Alziz AL-Qassab, S., & Salih AL-Wazan, F. A. (2022). Using inverse modeling by HYDRUS-1D to predict some soil hydraulic parameters from soil water evaporation. *Colombia Forestal*, 25(1), 21–35. <https://doi.org/10.14483/2256201x.18157>. EDN: <https://elibrary.ru/BZYCAM>
3. Hewelke, E., Gozdowski, D., Korc, M., Małuszyńska, I., Górská, E. B., Sas, W., & Mielnik, L. (2022). Influence of soil moisture on hydrophobicity and water sorptivity of sandy soil no longer under agricultural use. *Catena*, 208, Article 105780. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105780>. EDN: <https://elibrary.ru/OZASOL>
4. Al-Wazzan, F. A., & Abdulrahman, M. K. (2025). Effect of soil amendment (perlite) on some physical characteristics and *Zea mays* L. productivity. *Membrane Technology*, 2025(1), 1036–1044. <https://membranetechnology.org/index.php/journal/article/view/390>
5. Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). *Hydraulic properties of porous media* (Hydrology Paper No. 3). Civil Engineering Department, Colorado State University. <https://www.proquest.com/openview/af1ed3ec818dc0fd0fecde1385f721a7/1?pq-orig-site=gscholar&cbl=18750&diss=y>
6. Vogel, T., Cislerova, M., & Sir, M. (1985). Reliability of indirect estimation of soil hydraulic conductivity. *Vodohospodářský Časopis*, 33(2), 204–224. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170800000373>
7. Lenhard, R., Parker, J. C., & Mishra, S. (1989). On the correspondence between Brooks-Corey and van Genuchten model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115(4), 744–751. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(744\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(744))
8. van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., Van Walsum, P. E., Groenendijk, P., & Van Diepen, C. A. (1997). *Theory of SWAP. Version 2.0* (Report 71). Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/222782>
9. van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.036159950>

10. Radcliffe, D. E., & Simunek, J. (2018). *Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315275666>
11. Vogel, T., van Genuchten, M. Th., & Cislérova, M. (2000). Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably saturated flow predictions. *Advances in Water Resources*, 24(2), 133–144. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(00\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00037-3)
12. Mualem, Y. (1976). A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
13. Hillel, D. (1980). *Applications of soil physics*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50005-5>
14. Klute, A. (Ed.). (1986). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods* (2nd ed.; Agronomy Monograph No. 9). ASA-SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed>
15. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 383–409). ASA-SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
16. Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 363–375). ASA-SSSA. <https://worldveg.tind.io/record/6790>
17. Baruah, T. C., & Barthakur, H. P. (1999). *A textbook of soil analysis*. Vishal Printers. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ije1&volume=46&issue=2&article=012>
18. Jackson, M. L. (1958). *Soil chemical analysis*. Prentice-Hall. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1958.tb01903.x>
19. Page, A. L., Miller, R. H., & Kenney, D. R. (Eds.). (1982). *Methods of soil analysis* (2nd ed.). American Society of Agronomy; Crop Science Society of America. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203739433/soil-analysis-handbook-reference-methods-soil-plant-analysis-council-inc>
20. Al-Ani, A. N., & Dudas, M. (1988). Influence of calcium carbonate on mean weight diameter of soils. *Soil and Tillage Research*, 11, 19–26. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90028-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90028-1)
21. Mustafa, B. M., & Al-Wazzan, F. A. (2022). The variation of some soil physical properties by using water with different salinities. *International Journal of Agricultural Statistics and Sciences*, 18(1), 2099–2110. <https://connectjournals.com/pages/articledetails/toc036676>
22. Harbawi, M. A., Al-Barhawee, N. I. K., & Al-Wazzan, F. A. (2025). Estimation of indole-3-acetic acid production from new molecularly characterized rhizobacteri-

- al strains. *Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences*, 13, 1385–1394. <https://doi.org/10.22194/JGIAS/25.1528>. EDN: <https://elibrary.ru/AQZRTZ>
23. Al-Wazzan, F. A., & Muhammad, S. A. (2022). Effects of conservation and conventional tillage on some soil hydraulic properties. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1060, No. 1, Article 012002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012002>. EDN: <https://elibrary.ru/YYYYPZS>
24. Harbawi, M. A., Al-Barhawe, N. I. K., & Al-Wazzan, F. A. (2025). Molecular and biochemical characterization of rhizobacterial isolates from agricultural soils and estimation of indole-3-acetic acid production. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1487, No. 1, Article 012210). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1487/1/012210>. EDN: <https://elibrary.ru/LFQWQV>

DATA ABOUT THE AUTHOR

Faris Akram Al-Wazzan, Ph.D., Assistant Professor, Department of Soil Science and Water Resources, College of Agriculture and Forestry
University of Mosul
Mosul, Iraq
dr.farisakram@uomosul.edu.iq
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5547-9168>
Scopus Author ID: 57958078600
ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Faris-Al-Wazzan?ev=hdr_xprf

Поступила 20.12.2025

После рецензирования 11.03.2026

Принята 25.03.2026

Received 20.12.2025

Revised 11.03.2026

Accepted 25.03.2026

Биохимия, генетика и молекулярная биология / Biochemistry, Genetics and Molecular Biology

Научный обзор

Scientific review

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1468](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1468)EDN: [HGDPHT](https://edn.ru/HGDPHT)

УДК 619:575:636:001.608.1



Генетически детерминированные заболевания симментальской породы крупного рогатого скота: современные вызовы и перспективы селекции (обзор)

Н.А. Безбородова¹, О.В. Соколова¹, А.В. Зверев¹, Н.А. Мартынов¹,
Е.В. Романов¹, Ч.Р. Юсупова¹, О.С. Зайцева¹, А.М. Шаповалова²

¹ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный
научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии
наук», Екатеринбург, Российская Федерация

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Интенсификация животноводства и использование ограниченного количества высокоценных быков-производителей приводят к накоплению летальных мутаций и наследственных аномалий в популяциях крупного рогатого скота. Это снижает экономическую эффективность отрасли из-за падежа молодняка, снижения фертильности и продуктивного долголетия животных. Особую актуальность проблема представляет для симментальской породы, широко используемой в различных направлениях продуктивности.

Цель исследования — проведение комплексного анализа современного состояния изученности, методов диагностики, распространенности и системы контроля основных наследственных заболеваний у симментальской породы крупного рогатого скота и родственных популяций для оценки генетического груза и эффективности селекционно-профилактических программ.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе научных публикаций за период 2015–2025 гг., данных племенного учета и результатах ДНК-диагностики (ПЦР, полногеномное секвенирование, SNP-генотипирование) быков-производителей и маточного поголовья. Рассмотрены данные из России, стран Европы (Германия, Швейцария), Азии (Китай, Турция). Оценена частота мутаций по аномалиям: арахномелия (А), субфертильность быков (BNS), цинк-зависимый дерматоз (ZLD), тромбопатия (TP), карликовость (GON4L), летальные гаплотипы (BH2, FH2, FH4).

Результаты. Установлено, что среди импортированного в Россию поголовья симменталов доля носителей генетических аномалий достигала 34,8%, что более чем вдвое превышает среднеевропейский показатель (15,5%). Максимальная концентрация мутаций выявлена в линиях быков Редада (45,3%) и Метца (41,3%). Среди российских коров-потомков носителями являлись 19,3% особей. В Китае и Турции зафиксировано распространение арахномелии (мутация гена MOCS1), связанное с использованием быка Ромель. Напротив, в Швейцарии, где внедрен жесткий геномный мониторинг, частота тромбопатии составляет лишь 0,24%, а синдрома Фанкони-Бикель – 0,03%. Для каждой рассмотренной аномалии детализированы тип наследования и клинико-патогенетические особенности.

Ключевые слова: крупный рогатый скот; симментальская порода; генетические заболевания; аутосомно-рецессивные мутации; сельскохозяйственные животные; летальные гаплотипы; молекулярная диагностика; геномная селекция; эмбриональная смертность

Для цитирования. Безбородова, Н. А., Соколова, О. В., Зверев, А. В., Мартынов, Н. А., Романов, Е. В., Юсупова, Ч. Р., Зайцева, О. С., & Шаповалова, А. М. (2026). Генетически детерминированные заболевания симментальской породы крупного рогатого скота: современные вызовы и перспективы селекции (обзор). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 142-175. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1468>

Genetically determined diseases of the Simmental cattle breed: Modern challenges and prospects of breeding (review)

N.A. Bezborodova¹, O.V. Sokolova¹, A.V. Zverev¹, N.A. Martynov¹,
E.V. Romanov¹, Ch.R. Yusupova¹, O.S. Zaitseva¹, A.M. Shapovalova²

¹Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

²ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

Background. The intensification of livestock production and the use of a limited number of highly valuable sires lead to the accumulation of lethal mutations and hereditary abnormalities in cattle populations. This reduces the economic efficiency of the industry due to calf mortality, decreased fertility, and reduced productive longevity of animals. The problem is particularly relevant for the Simmental breed, which is widely used in various production directions.

Purpose. To conduct a comprehensive analysis of the current state of knowledge, diagnostic methods, prevalence, and control systems for major hereditary diseases in Simmental cattle and related populations to assess the genetic load and the effectiveness of selection and prevention programs.

Materials and methods. The study is based on an analysis of scientific publications from 2015–2025, breeding records, and DNA diagnostics results (PCR, whole-genome sequencing, SNP genotyping) of sires and breeding stock. Data from Russia, European countries (Germany, Switzerland), and Asia (China, Turkey) were reviewed. The frequency of mutations was assessed for the following abnormalities: arachnomelia (A), bull subfertility (BNS), zinc-dependent dermatosis (ZLD), thrombopathy (TP), dwarfism (GON4L), and lethal haplotypes (BH2, FH2, FH4).

Results. It was found that among Simmental cattle imported into Russia, the proportion of carriers of genetic abnormalities reached 34.8%, which is more than twice the average European rate (15.5%). The highest concentration of mutations was identified in the lines of sires Redad (45.3%) and Metz (41.3%). Among Russian cows – descendants of such sires – 19.3% of animals were carriers. In China and Turkey, the spread of arachnomelia (MOCS1 gene mutation) was recorded, associated with the use of the bull Romel. In contrast, in Switzerland, where strict genomic monitoring is implemented, the frequency of thrombopathy is only 0.24%, and Fanconi-Bickel syndrome – 0.03%. For each abnormality considered, the inheritance type and clinical-pathogenetic features are detailed.

Keywords: cattle; Simmental breed; genetic diseases; autosomal recessive mutations; farm animals; lethal haplotypes; molecular diagnostics; genomic selection; embryonic mortality

For citation. Bezborodova, N. A., Sokolova, O. V., Zverev, A. V., Martynov, N. A., Romanov, E. V., Yusupova, Ch. R., Zaitseva, O. S., & Shapovalova, A. M. (2026). Genetically determined diseases of the Simmental cattle breed: Modern challenges and prospects of breeding (review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 142–175. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1468>

Введение

В настоящее время современное животноводство сталкивается с серьезной проблемой распространения наследственных заболеваний, оказывающих значительное влияние на продуктивность и здоровье сельскохозяйственных животных [2; 3; 18]. За последние десятилетия интенсивная селекция, направленная на улучшение продуктивных качеств, способствовала накоплению рецессивных аллелей, ассоциированных с генетическими заболеваниями в популяции крупного рогатого скота различных пород [1; 5; 17; 35]. Накопление аутосомно рецессивных мутаций внутри стад может привести

к резкому увеличению гомозиготных особей по дефектным аллелям генов, и как следствие, снижению способности животных к самовоспроизводству, что также снижает рентабельность отрасли. К такого рода генетическим нарушениям, как правило, относятся: гаплотипы, ассоциированные с фертильностью; мутации, связанные с нарушением развития; генетические дефекты, снижающие устойчивость к заболеваниям [2; 3; 24; 29; 38].

Симментальская порода крупного рогатого скота ценится за высокую продуктивность, но распространенность наследственных заболеваний снижает ее экономическую эффективность. В данной породе крупного рогатого скота выявлен ряд наследственных генетических аномалий, которые могут существенно влиять на здоровье, продуктивность и фертильность животных [7; 17; 37]. В настоящее время утвержден перечень наследственных дефектов, подлежащих обязательному контролю в странах ЕАЭС: А – арахномелия (синдром «паучьих конечностей»), BNS – субфертильность быков, ZLD – врожденный дефицит цинка, TP – тромбопатия, GON4L – карликовость симменталов, летальные гаплотипы BH2 – гаплотип 2 бурой швицкой породы, FH2 – симментальский гаплотип 2, FH4 – симментальский гаплотип 4. В соответствии с Решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 17.12.2024 №140 были составлены требования к племенным животным включающий в себя запрет на использование носителей указанных аномалий в племенном разведении, обязательное ДНК-тестирование быков-производителей и маточного поголовья, с маркировкой животных в племенных документах - N/N – свободен от мутации, N/mut – носитель, mut/mut – пораженный (подлежит выбраковке). Диагностические методы для арахномелии (А) – тест на мутацию *MOCSI* (с.363G>A), для BNS – анализ *SLC37A2* (с.664T>C), для летальных гаплотипов (FH2, FH4, BH2) – SNP-генотипирование. Для осуществления реализации с 1 июля 2025 года все племенные хозяйства обязаны предоставлять генетические паспорта животных для создания в дальнейшем единой базы данных ЕАЭС по генетическим аномалиям [35].

Выявление и контроль генетических аномалий – ключевая задача современной селекционной работы. При этом основными проблемами являются: высокая частота носительства рецессивных мутаций (до 8% в отдельных популяциях); наличие летальных и сублетальных вариантов, влияющих на воспроизводство и жизнеспособность; экономические потери из-за снижения продуктивности и выбраковки животных.

Наследственные генетические аномалии изучаются с помощью современных технологии геномного анализа (SNP-генотипирование, NGS),

в работе применяются биоинформатические подходы и популяционные исследования. Данные подходы помогают в оптимизации программ селекции и снижении частоты генетических аномалий в стадах [17; 19].

Цель исследования – проведение комплексного анализа современного состояния изученности, методов диагностики, распространенности и системы контроля основных наследственных заболеваний у симментальской породы крупного рогатого скота и родственных популяций для оценки генетического груза и эффективности селекционно-профилактических программ.

Материалы и методы

В работе использованы научные публикации за период 1990–2025 гг., нормативные документы ЕАЭС и сводные данные популяционно-генетических исследований по наследственным заболеваниям симментальского скота и родственных пород. Применялись методы систематизации и классификации генетических аномалий по типам, генам-мишеням и характеру мутаций, сравнительный анализ диагностических подходов (ПЦР-RFLP, секвенирование, SNP-генотипирование), популяционно-генетический анализ распространенности мутаций в разных странах, нормативно-правовой анализ требований ЕАЭС, а также обобщение и синтез данных с составлением сводной таблицы распространенности аномалий.

Результаты

Арахномиелия (А)

Первое научное описание синдрома арахномиелии было представлено Rieck, GW. и Schade, W. в 1975 году в немецком ветеринарном журнале. Исследователи охарактеризовали данное состояние как новый наследственный синдром с летальным исходом, подробно описав изменения в фенотипе у животных-носителей [44]. В конце 2000-х годов несколько исследовательских групп независимо друг от друга провели работы по генетическому картированию: Vuitkamp J. с соавторами (2009) локализовали locus синдрома на 23-й хромосоме у симментальского скота [14]; Drögemüller C. с коллегами (2009) идентифицировали связь заболевания с 5-й хромосомой у бурых швейцарских коров [21]. Ключевые открытия были сделаны в 2010-2011 годах, когда удалось идентифицировать конкретные генетические мутации, ответственные за развитие синдрома: Drögemüller C. и др. (2020) с помощью массового параллельного секвенирования выявил мутацию в гене *SUOX* (сульфитоксидаза), указывающую

на роль данного фермента в развитии костной ткани [22]. Buitkamp J. с группой исследователей (2011) обнаружили, что синдром арахномелии у симментальского скота вызван гомозиготной делецией 2 пар оснований в гене *MOCSI*, кодирующем первую стадию синтеза молибденового кофактора [15]. Последующие исследования были направлены на разработку практических методов диагностики. Параллельно с другими исследованиями в Швейцарии был выявлен бык-производитель с мозаицизмом по *MOCSI*, дающий клинически здоровое потомство, но являющийся скрытым носителем [26]. В 2013 году был разработан метод выявления двух генов, вызывающих синдром арахномелии [16]. Jiao S. с группой исследователей (2013) применили сетевой подход к определению приоритетности генов, вызывающих заболевания [30]. В более поздних работах были разработаны и применены методы генетического выявления синдрома в различных популяциях скота в Китае и Турции [38; 42]. В 2014 году группа ученых под руководством Jung, S. [32], выявили отдельных телят с арахномалией, у которых обнаруживали сопутствующий дефицит цинка из-за мутации в *PLD4*, что усложняло диагностику. Ген *PLD4* отвечает за метаболизм цинка, а его нарушение приводит к тяжёлой гипозинкемии, дерматитам, иммунодефициту и вторичным бактериальным инфекциям. Из-за чего в диагностике ранее была путаница, но сейчас молекулярные тесты современных панелей (например, Illumina BovineHD) включают оба маркера (*MOCSI* и *PLD4*) [32].

Арахномелия (А) охарактеризована, как врождённая летальная генетическая аномалия скелетной системы (ген *MOCSI* (BTA23), хромосома BTA23 (Bos taurus autosome 23), мутация с.363G>A (p.Trp121Ter), приводящая к нонсенс-мутации у крупного рогатого скота. Также характеризуется превалирующим мертворождением телят и сложными аномалиями, такими как деформация морды, позвоночного столба и очень тонкими и удлинёнными конечностями у потомства [14; 15; 22]. Диагностические методы включают в себя ПЦР-RFLP, секвенирование, коммерческие SNP-чипы (Illumina BovineHD) (FAANG). Методы контроля - скрининговая программа с обязательным тестированием быков-производителей и 20% маточного поголовья [28; 37].

Субфертильность быков (BNS - Bovine Neutrophil Syndrome)

В 2014 году группа исследователей под руководством Pausch H. установили, что нонсенс-мутация в гене *TMEM95*, кодирующем неспецифический трансмембранный белок, является причиной идиопатической субфертильности у крупного рогатого скота. Это открытие стало возможным благо-

даря применению передовых методов геномного анализа и стало первым документальным подтверждением роли этого гена в репродуктивной функции [36]. Исследование Zhang S. и коллег (2019) расширило понимание частоты встречаемости данной мутации. Ученые провели масштабный скрининг 13 местных пород Китая и обнаружили мутацию *TMEM95* p.Cys161X в различных популяциях, что свидетельствует о широком распространении данного генетического дефекта и его значительном влиянии на воспроизводство стад в регионе [47]. Современным этапом исследований стала работа Shormanova M. и коллег (2024), которые разработали альтернативную систему диагностики нескольких гаплотипов фертильности (HH1, HH3, HH5 и HCD) и синдрома пониженной фертильности. Их подход представляет собой важный шаг в практическом применении молекулярно-генетических знаний для селекционно-племенной работы [41].

Таким образом, субфертильность у быков проявляется вследствие мутации в гене *TMEM95* (G3378652941, с.483C>A, p.Cys161X), кодирующем трансмембранный белок 95, что приводит к образованию преждевременного стоп-кодона и, как следствие, усечению кодируемой аминокислотной последовательности. Данное генетическое нарушение наследуется по аутосомно-рецессивному типу.

Известно, что идиопатическая субфертильность характеризуется крайне низкой эффективностью осеменения при сохранении нормальных показателей спермы, потерей экспрессии *TMEM95* на мембране сперматозоидов и нарушением процессов взаимодействия сперматозоида с ооцитом [36].

Принята общая номенклатура обозначения генотипов животных по данному аллелю: MSC – носитель рецессивного аллеля, MSF – свободная особь [8; 35; 36; 47]. Мутация была обнаружена в популяции Fleckvieh (FV). Частота встречаемости рецессивного аллеля составила 7,2%, а частота гетерозигот – 13,9%, соответственно. Однако данный генетический дефект не был выявлен у других пород крупного рогатого скота [3; 23; 41].

Цинк-зависимый дерматоз,

врождённый дефицит цинка (ZLD) у крупного рогатого скота

Данный генетический дефект характерен для молочной и мясной линий симментальской породы, также встречается у флекви (Fleckvieh), монбельярдской и абердин-ангусской пород. Частота носителей в некоторых популяциях достигает 8%.

Причиной мутацией данного генетического дефекта является однонуклеотидный полиморфизм с.G645A в 6 экзоне гена *PLD4*, что приводит к образованию преждевременного стоп-кодона, и как следствие, укора-

чиванию кодируемой аминокислотной последовательности на 273 аминокислотных остатка. Синтезируемый белок получается лишен доменов, необходимых для ферментативного катализа, и как следствие, не способен выполнять свою функцию [34; 35]. Экономический ущерб от ZLD связан со снижением привесов на 15-20%, увеличением заболеваемости молодняка и затратами на лечение. Заболевание клинически проявляется симптомами, сходными с дефицитом цинка, но имеет совершенно иную генетическую природу. Патогенез заболевания связан с нарушением функции макрофагов и иммунологическими нарушениями. Данное генетическое заболевание клинически проявляется в виде прогрессирующего паракератоза, гиперкератоза и алопеций, кожных изъязвлений (особенно на конечностях и голове). Также наряду с основными признаками наследственного заболевания у животных наблюдаются сопутствующие признаки - задержка роста, диарея, нарушения репродуктивных функций, иммунодефицитные состояния [6; 33].

Исследования, проведенные в период с 2014 по 2022 гг., позволили идентифицировать и детально охарактеризовать ранее неизвестное наследственное заболевание у крупного рогатого скота породы флекви, связанное с дефицитом фосфолипазы D4. В 2014 году группой исследователей под руководством Jung S. было сделано ключевое открытие. С помощью методов геномного анализа они установили, что нонсенс-мутация в гене PLD4 ассоциирована с синдромом, клинически напоминающим дефицит цинка у крупного рогатого скота породы Флекви. Это стало первым документальным подтверждением роли данного гена в развитии патологического состояния у сельскохозяйственных животных [32]. Исследование Langenmayer M.C. и коллег (2018) предоставило детальное описание клинических и патологических проявлений синдрома. Ученые провели комплексный анализ, который позволил дифференцировать это генетически обусловленное состояние от наследственного дефицита цинка у крупного рогатого скота. Были описаны характерные клинические признаки и патологические изменения, что имело важное значение для практической диагностики [33]. В 2022 году та же исследовательская группа углубила понимание механизмов развития заболевания. В работе Langenmayer M.C. и коллег было показано, что макрофаги играют ключевую роль в развитии кожных заболеваний у телят породы Флекви с дефицитом фосфолипазы D4. Это исследование раскрыло иммунологические аспекты патогенеза и предоставило важное понимание в клеточные механизмы развития дерматологических проявлений [34].

Для диагностики ZLD используется ПЦР-анализ (коммерческие тест-системы LABOGENA (Франция), ВНИИплем (Россия), для исключения нехватки цинка дополнительно проводится биохимический анализ на сывороточный цинк и исследуется гистопатология на акантоз и паракератоз кожи [11]. Профилактика ZLD включает в себя генетическое тестирование племенных животных, исключение носителей из разведения, коррекцию рациона (добавки цинка для групп риска) [29; 45].

Тромбопатия (ТР) – наследственное нарушение свертываемости крови у симменталов, флекви и монбельярдской пород скота однонуклеотидным полиморфизмом 701A>G в гене *RASGRP2*, картированном на 29 хромосоме. Тип наследования аутосомно-рецессивный, соответственно. Клинические проявления - геморрагический синдром, длительные кровотечения после кастрации/декорнуации, подкожные гематомы, кровоизлияния в суставы (гемартрозы) [35; 43].

Наследственная тромбопатия у симментальского скота представляет собой классический пример успешного многолетнего исследования группой авторов Searcy, G.P, Steficek B.A., Thomas J.S., Sheridan D. и т.д. в период 1990-1993 годов генетического заболевания - от первоначального клинического описания до идентификации конкретной молекулярно-генетической причины. Ранние исследования, проведенные в 1990-х годах, были сосредоточены на детальном клиническом и лабораторном описании нарушения свертываемости крови у симментальского скота. Было установлено, что заболевание характеризуется повышенной кровоточивостью, нарушением агрегации тромбоцитов в ответ на АДФ, нормальным количеством тромбоцитов, но с нарушением их функции [9]. Ключевое открытие было сделано Boudreaux МК с соавторами в 2007 году, когда были идентифицированы мутации в гене кальций-диацилглицерол гуанин-нуклеотид обменного фактора I (*CalDG-GEFI*). Это открытие позволило объяснить молекулярный механизм нарушения активации тромбоцитов и их способности к агрегации [11; 12]. Более поздние исследования были сосредоточены на разработке молекулярно-генетических тестов для выявления носителей тромбопатии (ТР), изучении распространенности мутации в различных популяциях, мониторинге частоты патологического аллеля в популяциях симментальского скота, разработке стратегий селекции для снижения частоты заболевания [9; 43; 46].

В настоящее время для выявления ТР у животных применяют полногеномное секвенирование (Illumina NovaSeq), ПЦР-RFLP, коагулологические тесты [9,35]. На рынке существует коммерческие ПЦР тест-системы

зарубежных компаний - LABOGENA (Франция) RT-PCR и проводится исследование на базе ВНИИПлем (Россия) с использованием аллель-специфичной ПЦР с последующим рестрикционным анализом (PCR-RFLP).

Карликовость, связанная с геном *GON4L*

Представляет собой наследственное аутосомно-рецессивное заболевание симментальской породы крупного рогатого скота, характеризующееся выраженным нарушением роста и пропорций тела [35]. Данная мутация в гене *GON4L* (с.550delA) приводит к синтезу укороченного белка, играющего ключевую роль в регуляции пролиферации хондроцитов [35; 40].

Исследования наследственной карликовости у крупного рогатого скота породы Флекви представляют собой уникальный пример многолетнего научного поиска - от первоначального клинического описания до идентификации конкретной генетической мутации. Исследование Gottwald (1967) стало первым научным описанием карликовости в породе Флекви. Автор документально зафиксировал появление случаев карликовости в потомстве одного быка, что указывало на наследственную природу заболевания. Это наблюдение положило начало многолетним исследованиям данной аномалии. Прорыв в понимании причины карликовости произошел почти через 50 лет после первоначального описания. Исследовательская группа под руководством Schwarzenbacher Н. в 2016 году идентифицировала конкретную генетическую причину заболевания с помощью методов полногеномного анализа: была обнаружена frameshift-мутация в гене *GON4L*; был выявлено, что заболевание наследуется по аутосомно-рецессивному типу; мутация приводит к пропорциональному уменьшению размеров тела [40]. Работа Weber В.А. с группой исследователей представляют современный обзор генетических дефектов в швейцарской популяции флекви, включая мутацию, вызывающую карликовость. Исследование предоставляет данные о текущей распространенности мутации в популяции, эффективности программ селекционного контроля и методах ДНК-диагностики для выявления носителей [43].

В работе Schwarzenbacher Н. с соавторами описаны более подробные клинические признаки *GON4L* у крупного рогатого скота. Авторы говорят о том, что вес и размер телят при рождении зависят от нескольких ключевых факторов: породы, продолжительности стельности и пола новорожденного. У коров породы Флекви (Fleckvieh) стандартный вес новорожденных телят обычно составляет от 38 до 45 кг. Однако в некоторых случаях рождаются телята с аномально низкой массой тела и малы-

ми размерами при нормальной продолжительности беременности - таких животных принято называть «карликами». Феномен карликовости (К) был зафиксирован у различных пород крупного рогатого скота, включая Флекви. Основными клиническими проявлениями этого состояния являются: значительно сниженная масса тела при рождении; замедленный рост в постнатальный период. Карликовость может проявляться в двух основных формах: пропорциональная форма - телята сохраняют нормальные пропорции тела, общее состояние организма удовлетворительное, где основной признак малые размеры при сохранении гармоничного телосложения; непропорциональная форма (хондродисплазия), при которой характерно укорочение конечностей, наблюдаются различные деформации скелета, в тяжелых случаях возможны структурные аномалии, может приводить к летальному исходу [40]. Следует отметить, что карликовость представляет собой серьезную проблему в животноводстве, так как такие животные часто имеют сниженную продуктивность и могут передавать дефектные гены потомству. В связи с этим важное значение приобретает генетический мониторинг племенного стада и своевременное выявление носителей соответствующих мутаций. Наследственный дефект диагностируется молекулярно-генетическими методами, которые включают в себя ПЦР-анализ и секвенирование нового поколения (NGS) [18; 22].

Летальный гаплотип ВН2 у бурого швицкого скота. Выявлена миссенс-мутация (с.1325T>C) в гене *TUBD1*, ассоциированная с высокой ювенильной смертностью в популяции Braunvieh (12.3% носителей) и Fleckvieh (8.7% носителей). Клинические проявления - неонатальная смертность (до 14 дней) - 89% гомозигот. Множественные врожденные аномалии (гидроцефалия, гипоплазия легких, еардиомегалия). Механизм - нарушение формирования микротрубочек в эмбриогенезе [20; 39].

Согласно работе Schwarzenbacher Н. с коллегами учеными(2016), гомозиготные особи с мутацией в гене *TUBD1* демонстрируют комплекс респираторных нарушений, включая хронические заболевания дыхательных путей. Эти патологии сопровождаются характерными симптомами дисфункции реснитчатого эпителия, что приводит к выраженной задержке роста и повышенной смертности молодняка. Важно отметить, что, как установили Schwarzenbacher Н. и соавторы, данный летальный аллель обладает неполной пенетрантностью - не все гомозиготные животные погибают, хотя и имеют серьезные нарушения здоровья [27; 39]

Одним из ключевых объектов изучения стал синдром Фанкони-Бикеля, вызываемый так называемым гаплотипом 2 у породы Fleckvieh.

Исследование Burgstaller J. и его коллег (2016) впервые дало полное клиническое и биохимическое описание этого летального заболевания. Ученые установили, что телята, гомозиготные по данной мутации, страдают от тяжелой задержки роста, истощения и нарушения функции почечных канальцев, что проявляется в глюкозурии и ацидозе. Все больные животные неминуемо погибали в первые месяцы жизни, что подтвердило рецессивный летальный характер этого наследственного синдрома. Для эффективного обнаружения подобных скрытых угроз был разработан современный биоинформатический подход [13]. Исследовательская группа под руководством Pausch H. (2015) применила метод геномного анализа, основанный на поиске гаплотипов, которые никогда не встречаются в гомозиготном состоянии у живых особей. Этот метод позволил выявить несколько новых рецессивных мутаций, которые приводят к гибели эмбрионов или новорожденных телят. Важным открытием стало то, что даже достаточно распространенные аллели могут долгое время оставаться незамеченными, пока не произойдет инбридинг и рождение гомозиготного потомства. Эти мутации были признаны ключевым фактором, значительно снижающим общую репродуктивную эффективность и результативность выращивания скота. Полученные данные легли в основу систематических обзоров и программ мониторинга [37]. Работы Glatthard S. (2025) по Braunvieh и Weber B.A. (2025) по Fleckvieh обобщили все известные и новые наследственные заболевания в этих породах. Ученые составили подробные каталоги генетических дефектов, куда вошли, например, дефицит адгезии лейкоцитов, мышечная гипертрофия, летальные гаплотипы и различные лейкодистрофии. Для каждого заболевания была оценена текущая распространенность аллелей-носителей в популяции, что является критически важной информацией для селекционеров [25; 43].

Общим выводом всех представленных исследований является необходимости постоянного генетического мониторинга. ДНК-тестирование племенных животных и грамотный подбор пар позволяют избежать спариваний носителей одинаковых генетических мутаций. Таким образом, современная селекция опирается на молекулярно-генетические методы как на основной инструмент для контроля наследственных заболеваний, минимизации экономических потерь и поддержания здоровья и продуктивности пород.

В настоящее время диагностика летального гаплотипа BH2 у бурого швицкого скота осуществляется с помощью разработанными аллель-спец-

ифичными ПЦР-тест-системами, SNP-генотипирования с использованием маркеров, полногеномного ассоциативного анализа (GWAS), использованием биоинформатических инструментов (например, PLINK) для статистической обработки [10; 25; 27; 45].

Летальный гаплотип FH2 (Fleckvieh Haplotype 2) – генетическое нарушение, которое представляет собой серьезное наследственное заболевание у крупного рогатого скота симментальской породы. Заболевание возникает вследствие мутации в гене *SLC2A2*, расположенном на хромосоме 9. Данный ген кодирует белок-переносчик глюкозы GLUT2, который играет важную роль в метаболизме углеводов, обеспечивая транспорт глюкозы через клеточные мембраны в печени, почках и кишечнике. Заболевание наследуется по аутосомно-рецессивному типу. Особи, гетерозиготные по данной мутации (носители одной мутантной копии гена), являются клинически здоровыми, но передают дефектный аллель потомству [13; 31].

В 2015 году Pausch H. с группой исследователей (2015) с помощью биоинформатического анализа впервые был идентифицирован геномный регион (гаплотип), гомозиготность по которому была летальной для плодов. Это ключевая работа легла в основу всех последующих клинических описаний. Работа Burgstaller J. (2016), в соавторстве с Pausch H. (2015), являлась прямым продолжением исследований в данной области. Авторы подтвердили, что исследованный гаплотип приводит к синдрому Фанкони-Бикель, что являлось причиной мутация в гене *SLC2A2* (кодирующем переносчик глюкозы GLUT2). Также Burgstaller (2016) провел ряд клинико-биохимических исследований и секвенирование мутации в гене *SLC2A2*, с описанием болезни. Открытие позволило разработать ДНК-тесты для выявления носителей этой мутации. Были проведены масштабные работы по составлению полных каталогов известных и новых генетических дефектов для двух ключевых швейцарских пород: Braunvieh (Буряя швейцарская) и Swiss Fleckvieh (Пестрая швейцарская). В популяции Swiss Fleckvieh были обнаружены новые, ранее не описанные генетические дефекты, что демонстрирует постоянную эволюцию генетического груза в закрытых популяциях сельскохозяйственных животных [13; 25; 37; 43]. В 2018 году исследователем Joller S. с коллегами (2018), впервые было описано и охарактеризовано наличие синдрома Фанкони-Бикель в популяции Original Braunvieh. Клиническая и биохимическая картина заболевания была идентичной той, что наблюдалась у телят породы Fleckvieh. Это подтверждает консервативность механизма

заболевания при нарушении функции гена *SLC2A2*. Для породы Original Braunvieh был разработан свой ДНК-тест для выявления носителей данной конкретной мутации. Работа добавила еще один подтвержденный генетический дефект в каталог наследственных заболеваний породы Braunvieh, что имеет огромное значение для программ управления генетическим здоровьем породы [31].

Распространенность рецессивного аллеля в популяции симментальского скота составляет приблизительно 5%. Это указывает на относительно высокий риск рождения больного потомства при бесконтрольном разведении. Основные клинические проявления включают - задержку роста и развития нарушения функции почек (почечный канальцевый ацидоз) глюкозурию (наличие глюкозы в моче), нарушение утилизации глюкозы, общее истощение организма. Патогенез заболевания связан с невозможностью нормального транспорта глюкозы, что приводит к ее накоплению в крови одновременно с потерей через почки. Это вызывает серьезные нарушения энергетического обмена и функций основных органов. Заболевание характеризуется 100% летальностью [13; 31].

В настоящее время ПЦР-анализ проводят с детекцией специфической делеции и SNP генотипированием используя маркеры. Существуют коммерческие тест-системы зарубежных производителей Zoetis FH2 Carrier Test.

Летальный гаплотип FH4

Группа исследователей под руководством Pausch H. впервые выявила летальный гаплотип у симментальского скота методом анализа гомозиготного дефицита гаплотипов. Биоинформатический анализ показал хромосомный участок, никогда не встречающийся в гомозиготном состоянии. Гаплотип представлял собой протяженный участок хромосомы 12, содержащий мутацию в гене *SUGT1*. Был установлен аутосомно-рецессивный тип характера наследования [37].

Исследователи клинически подтвердили летальный гаплотип FH4 у симментальского скота в 2025 году. Так же была установлена причинно-следственная связь между мутацией в гене *SUGT1* и летальным исходом у гомозиготных животных. Общие проявления у носителя летальный гаплотип FH4 - выраженная задержка роста и развития, прогрессирующее истощение (кахексия), непереносимость физических нагрузок, вялость. Частота носительства - 5% в симментальской породе [43].

На основе обнаруженной мутации был разработан коммерческий ДНК-тест, к 2025 году тестирование стало обязательным элементом селекционных программ, позволив снизить частоту рождения нежизне-

способного потомства через целенаправленный подбор родительских пар [37; 43].

На основании анализа предоставленных научных источников (2015–2025 гг.) была сформирована сводная таблица, систематизирующая данные о распространённости наследственных патологий у симментальской молочной, мясной и полученных в результате скрещивания пород. Таблица отражает результаты многолетних исследований в области ветеринарной генетики и селекции (Таблица 1).

Таблица 1.

Сводная таблица встречаемости генетических аномалий у симментальской молочной, мясной и полученных в результате скрещивания пород

Table 1. Summary Table of the Prevalence of Genetic Anomalies in Simmental Dairy, Beef, and Crossbred Cattle

Вид аномалии	Порода	Популяция	Количество голов в выборке	Количество носителей	% встречаемости генетических аномалий	Методы выявления	Год исследования	Источник
FN2	Симменталы	Немецко-австрийские быки	22 425	448	2,0%	Анализ родословных, ДНК-тесты	2000-2018	[4]
TP		Немецко-австрийские быки	22 425	1,233	5,5%	Анализ родословных, ДНК-тесты	2000-2018	
BMS		Немецко-австрийские быки	22 425	336	1,5%	Анализ родословных, ДНК-тесты	2000-2018	
Арахномелия (А)		Немецко-австрийские быки	22 425	157	0,7%	Анализ родословных, ДНК-тесты	2000-2018	
FN2		Российские быки (потомки импортированных животных)	1251	58	4.6%	Анализ родословных, ДНК-тесты	2000-2018	

Вид аномалии	Порода	Популяция	Количество голов в выборке	Количество носителей	% встречаемости генетических аномалий	Методы выявления	Год исследования	Источник
ТР	Симменталы	Российские быки (потомки импортированных животных)	1251	73	5,8%	Анализ родословных, ДНК-тесты	2000-2018	[4]
BMS		Российские быки (потомки импортированных животных)	1251	93	7,4%	Анализ родословных, ДНК-тесты	2000-2018	
BMS		Российские коровы Симментальской породы (дочери зарубежных быков)	19 440	1 089	5,6%	Базы данных ИАС «Селекс»	2000-2018	
ТР		Российские коровы Симментальской породы (дочери зарубежных быков)	19 440	408	2,1%	Базы данных ИАС «Селекс»	2000-2018	
FN2		Российские коровы Симментальской породы (дочери зарубежных быков)	19 440	506	2,6%	Базы данных ИАС «Селекс»	2000-2018	

Вид аномалии	Порода	Популяция	Количество голов в выборке	Количество носителей	% встречаемости генетических аномалий	Методы выявления	Год исследования	Источник
Арахномелия (А)	Симменталы, Саньхэ-Шусюань, Синьцзян-коричневая	Популяции животных Китайской Народной Республики	1926	15	1,08% (симменталы)	ПЦР, секвенирование	2023	[28]
Арахномелия (AS)	Симменталы	Популяции животных Турецкой республики (регион Yozgat)	387	4	1,03%	ПЦР, секвенирование по Сэнгеру	2025	[42]
TP	Швейцарский пятнистый скот (SF)	Популяция животных Швейцарской Конфедерации	>65 000	~156	0,24%	SNP-генотипирование	2025	[43]
FN2		Популяция животных Швейцарской Конфедерации	>65 000	~20	0,03%	SNP-генотипирование	2025	
TUBD1	Швейцарская Браунви (Braunvieh)	Швейцария (животные из 2 географически изолированных популяций)	2500	183	7,3%	WGS, SNP-генотипирование	2021	[27]

Как видно из таблицы 1, результаты исследований Игнатьевой Л. П. и Семягиной А.А, проведённым на обширной выборке животных за 2000–2018 гг., наблюдалась серьезная ситуация с распространенностью гене-

тических аномалий. Среди немецко-австрийских быков-производителей доля носителей мутаций составляла 15,5%, причем наиболее распространены были тромбопатия (5,5%), субфертильность быков (1,5%), а у 1,4% быков выявлено носительство до 2 мутаций. Однако ситуация с импортированными в Россию быками была значительно хуже - здесь носителями являлись уже 34,8% животных, что более чем в два раза превышало европейские показатели. Также была обнаружена множественная мутация: 7,1% быков – носители 2 мутаций (комбинации TP+BMS, TP+FH2); 1,1% – носители 3 мутаций (TP + BMS + FH2). Особую озабоченность вызывала высокая концентрация носителей в определенных генетических линиях. Наибольшие показатели отмечены в линиях быков Редада (45,3%) и Метца (41,3%), где преобладают различные типы мутаций. Среди российских коров, являющихся потомками импортированных быков, потенциальными носителями являлись 19,3% животных, с максимальными показателями в линиях Перутца (43,5%) и Метца (32,4%). Проведенный анализ демонстрирует эффективность селекционных программ в Европе, где за 15 лет удалось снизить долю носителей с 32,2% до 2,8%. В России импорт генетического материала в 2000–2018 года привел к значительному увеличению частоты наследственных аномалий [4]. В 2023 году было проведено масштабное исследование генетических особенностей крупного рогатого скота в Китайской Народной Республике. Учёные проанализировали 582 быка и 1926 коров из популяций пород двойного назначения: симменталы, саньхэ, шусюань и синьцзян-коричневая. Результаты исследования выявили важную генетическую особенность. У 15 животных симментальской породы (4 быка и 11 коров) и 12 животных салерской породы (6 быков и 6 коров) была обнаружена мутация в гене *MOCSI*, которая является причиной развития синдрома арахномелии – наследственного заболевания, характеризующегося нарушениями опорно-двигательного аппарата. Проведённый генеалогический анализ установил происхождение данной мутации. Все случаи носительства были связаны с общим предком – немецким симментальским быком по кличке Ромель. Это открытие объясняет пути распространения генетического дефекта в китайских популяциях крупного рогатого скота. Особый интерес представляет тот факт, что альтернативная мутация с.363_364insG в гене *SUOX*, которая также может вызывать арахномелию, в исследованных популяциях обнаружена не была. Это указывает на специфичность генетической природы заболевания в данном регионе и подтверждает единственный источник распространения дефектного гена [28]. В Турецкой республике предыдущие исследо-

вания генетических патологий крупного рогатого скота ограничивались молочными породами, такими как голштинская. Данное исследование стало пионерским в изучении наследственных заболеваний у пород двойного назначения, имеющих важное мясное значение. В ходе работы была обследована популяция из 387 симментальских коров в регионе Йозгат. Молекулярно-генетический анализ выявил наличие двухнуклеотидной делеции в гене *MOCSI* со сдвигом рамки считывания у четырёх животных. Результаты были верифицированы методом секвенирования по Сэнгеру, что подтвердило наличие мутации у 1,03% особей. Это открытие имеет существенное значение для животноводства, поскольку впервые документально подтверждено наличие арахномелии у симментальской породы крупного рогатого скота в Турецкой республике [42].

Анализ данных SNP-генотипирования более 65 000 голов швейцарского пятнистого скота (Swiss Fleckvieh) выявил исключительно низкую распространенность наследственных заболеваний в данной популяции. Исследование показало минимальные показатели носительства основных генетических аномалий: тромбопатия (TP) была обнаружена лишь у 0,24% животных, а синдром Фанкони-Бикель (FH2) - только у 0,03% поголовья. Гаплотип FH4 не был выявлен вообще. Эти результаты демонстрируют высокую эффективность селекционных программ и системы генетического мониторинга, применяемых в Швейцарии, что обеспечивает сохранение генетического здоровья популяции [43].

Комплексный анализ геномных данных 2500 животных из двух изолированных популяций швейцарского Braunvieh с применением полногеномного секвенирования (WGS) и SNP-генотипирования идентифицировал ранее неизвестную мутацию с.1325T>C в гене *TUBD1*. Выяснено, что данная миссенс-мутация приводит к эмбриональной летальности в 92% случаев и встречается с частотой носительства 7,3% в изученной популяции. Исследование демонстрирует эффективность современных геномных технологий для выявления наследственных причин снижения фертильности и предоставляет основание для разработки ДНК-теста с целью исключения данного генетического дефекта из популяции [27].

В исследовании 2019 года проводился скрининг мутации с.483C>A у 765 животных 13 китайских пород КРС. Данная мутация не была обнаружена, однако была выявлена новая делеционная мутация в гене *TMEM95*, присутствующая в 11 породах [47].

Проведенный анализ данных из Европы, Азии и России демонстрирует формирование глобальной системы мониторинга наследственных заболе-

ваний крупного рогатого скота. Ключевым инструментом стало массовое ДНК-тестирование с использованием технологий SNP-генотипирования и полногеномного секвенирования, позволяющее выявлять как известные, так и новые мутации. Наиболее эффективные системы скрининга созданы в странах с развитым животноводством (Швейцария, Германия), где достигнута минимальная частота вредных мутаций (0.03–0.24%) благодаря строгой селекции и запрету на использование животных-носителей. В то же время страны-импортеры генетического материала (Россия, Китай, Турция) сталкиваются с повышенным генетическим грузом (1–35%), требующим внедрения национальных программ тестирования. Мировой опыт подтверждает, что успешный контроль генетических аномалий требует: обязательного тестирования племенных животных, создания открытых баз данных носителей, международной координации селекционных программ, постоянного мониторинга новых мутаций. Перспективы развития связаны с переходом к полногеномному скринингу и разработке международных стандартов генетической безопасности, что позволит минимизировать экономические потери от наследственных заболеваний в глобальном масштабе.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ «Разработка высокоточных методов идентификации генетических детерминант устойчивости к заболеваниям для использования в селекции крупного рогатого скота» (0532-2025-0003).

Список литературы

1. Бытов, М. В., Зубарева, В. Д., Зайцева, О. С., Соколова, О. В., Юсупова, Ч. Р., & Мартынов, Н. А. (2025). Разработка диагностических тест-систем и скрининг гаплотипов фертильности крупного рогатого скота голштинской породы. *Достижения науки и техники АПК*, 39(4), 58–65. https://doi.org/10.53859/02352451_2025_39_4_58. EDN: <https://elibrary.ru/SHBCVV>
2. Бытов, М. В., Соколова, О. В., Безбородова, Н. А., Красноперов, А. С., & Исаева, А. Г. (2023). Методы генотипирования крупного рогатого скота для post-GWAS аннотирования SNPs. *Аграрный вестник Урала*, 23(6), 67–75. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-235-06-67-75>. EDN: <https://elibrary.ru/KGDRES>
3. Зайцева, О. С., Соколова, О. В., Мартынов, Н. А., Безбородова, Н. А., & Бытов, М. В. (2022). Диагностика генетически детерминированных заболеваний голштинской породы крупного рогатого скота. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, (97), 167–177. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-97-167-177>. EDN: <https://elibrary.ru/UVNTSG>

4. Игнатьева, Л. П., & Семягин, А. А. (2019). Генетический мониторинг аномалий в современной популяции симментальской породы крупного рогатого скота в России. *Генетика и разведение животных*, (4), 33–42. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2019-4-33-42>. EDN: <https://elibrary.ru/NBSSCW>
5. Мартынов, Н. А., Модоров, М. В., Соколова, О. В., Бытов, М. В., Зайцева, О. С., Безбородова, Н. А., Зубарева, В. Д., Кожуховская, В. В., & Шкуратова, И. А. (2022). Молекулярно-генетическая оценка распространённости дефицита фактора свёртываемости крови в уральской популяции голштинизированного чёрно-пёстрого скота. *Проблемы биологии продуктивных животных*, (1), 54–61. <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2022.1.54-61>. EDN: <https://elibrary.ru/WKZBTU>
6. Никулин, И., & Калужный, И. (2021). Клинические симптомы йодной и цинковой недостаточности у молочных коров. *BIO Web of Conferences*, 32, 04005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213204005>. EDN: <https://elibrary.ru/KLXANJ>
7. Самсонова, О. Е., & Бабушкин, В. А. (2021). Генетические и фенотипические корреляции для некоторых характеристик чистопородных молочных коров симментальской породы. *Биология в сельском хозяйстве*, (4), 2–6.
8. Филипченко, А. А., Форнара, М. С., Костюнина, О. В., & Сермягин, А. А. (2018). Разработка тест-системы для диагностики наследственной аномалии BMS, ассоциированной с бесплодием быков-производителей симментальской породы. *Генетика и разведение животных*, (4), 23–28. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2018-4-23-28>. EDN: <https://elibrary.ru/YQORTN>
9. Aebi, M., Wiedemar, N., Drögemüller, C., & Zanolari, R. (2016). Hereditäre Thrombozytopathie beim Simmental Rind. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 158(2), 102–108. <https://doi.org/10.17236/sat00050>
10. Ask-Gullstrand, P., Strandberg, E., Båge, R., Rius-Vilarrasa, E., & Berglund, B. (2024). The effect of genetic defects on pregnancy loss in Swedish dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 107(5), 2999–3005. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24159>. EDN: <https://elibrary.ru/XSCRRQ>
11. Boudreaux, M. K. (2008). Characteristics, diagnosis, and treatment of inherited platelet disorders in mammals. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 233(8), 1251–1259. <https://doi.org/10.2460/javma.233.8.1251>
12. Boudreaux, M. K., Schmutz, S. M., & French, P. S. (2007). Calcium diacylglycerol guanine nucleotide exchange factor I (CalDAG-GEFI) gene mutations in a thrombopathic Simmental calf. *Veterinary Pathology*, 44(6), 932–935. <https://doi.org/10.1354/vp.44-6-932>
13. Burgstaller, J., Url, A., Pausch, H., Schwarzenbacher, H., Egerbacher, M., & Wittek, T. (2016). Clinical and biochemical signs in Fleckvieh cattle with genetically

- confirmed Fanconi-Bickel syndrome (cattle homozygous for Fleckvieh haplotype 2). *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift*, 129, 132–137.
14. Buitkamp, J., Luntz, B., Emmerling, R., Reichenbach, H. D., Weppert, M., Schade, B., Meier, N., & Götz, K. U. (2008). Syndrome of arachnomelia in Simmental cattle. *BMC Veterinary Research*, 4, 39. <https://doi.org/10.1186/1746-6148-4-39>. EDN: <https://elibrary.ru/MVWYND>
 15. Buitkamp, J., Semmer, J., & Götz, K. U. (2011). Arachnomelia syndrome in Simmental cattle is caused by a homozygous 2-bp deletion in the molybdenum cofactor synthesis step 1 gene (MOCS1). *BMC Genetics*, 12, 11. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-12-11>
 16. Chu, Q., Jiao, S. H., Wang, Y. C., Liu, L., Liu, A. R., Wu, H. J., Xie, Z. Q., Hou, S. Y., Geng, F. J., Wang, C. Y., Huang, X. X., Tan, S. X., Tan, R., Zhang, Y., Yu, Y., & Zhang, Y. (2013). [Establishment of the detection method for two causative genes of cattle arachnomelia syndrome]. *Yi Chuan*, 35(5), 623–627. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1005.2013.00623>
 17. Cieplach, A., Rutkowska, K., Oprządek, J., & Poławska, E. (2017). Genetic disorders in beef cattle: a review. *Genes & Genomics*, 39, 461–471. <https://doi.org/10.1007/s13258-017-0525-8>. EDN: <https://elibrary.ru/CLAROS>
 18. Cole, J. B. (2015). A simple strategy for managing many recessive disorders in a dairy cattle breeding program. *Genetics Selection Evolution*, 47, 94. <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0174-9>. EDN: <https://elibrary.ru/GEEUNI>
 19. Cole, J. B., Baes, C. F., Eaglen, S. A. E., Lawlor, T. J., Maltecca, C., Ortega, M. S., & VanRaden, P. M. (2025). Invited review: Management of genetic defects in dairy cattle populations. *Journal of Dairy Science*, 108(4), 3045–3067. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-26035>. EDN: <https://elibrary.ru/GPEKTY>
 20. Cole, J. B., Null, D. J., & VanRaden, P. M. (2016). Phenotypic and genetic effects of recessive haplotypes on yield, longevity, and fertility. *Journal of Dairy Science*, 99(9), 7274–7288. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10777>
 21. Drögemüller, C., Rossi, M., Gentile, A., Testoni, S., Jörg, H., Stranzinger, G., Drögemüller, M., & Glowatzki-Mullis, M. L. (2009). Arachnomelia in Brown Swiss cattle maps to chromosome 5. *Mammalian Genome*, 20, 53–59. <https://doi.org/10.1007/s00335-008-9157-2>. EDN: <https://elibrary.ru/UXCVJS>
 22. Drögemüller, C., Tetens, J., Sigurdsson, S., Gentile, A., Testoni, S., Lindblad-Toh, K., & Leeb, T. (2010). Identification of the bovine Arachnomelia mutation by massively parallel sequencing implicates sulfite oxidase (SUOX) in bone development. *PLoS Genetics*, 6(8), e1001079. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1001079>. EDN: <https://elibrary.ru/NYTFQH>
 23. Elango, K., Kumaresan, A., Sharma, A., Nag, P., Pushpam, P. L., Arumugam, M., & Datta, T. K. (2020). Sub-fertility in crossbred bulls: deciphering testicular level

- transcriptomic alterations between zebu (*Bos indicus*) and crossbred (*Bos taurus* x *Bos indicus*) bulls. *BMC Genomics*, 21, 502. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06907-1>. EDN: <https://elibrary.ru/YFDGMG>
24. Johnston, I. A., Kent, M. P., Boudinot, P., Looseley, M., Bargelloni, L., Faggion, S., & Lien, S. (2024). Advancing fish breeding in aquaculture through genome functional annotation. *Aquaculture*, 583, 740589. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740589>. EDN: <https://elibrary.ru/XFSJIW>
25. Glatthard, S., Seefried, F. R., Gentile, A., Jacinto, J. P. G., & Drögemüller, C. (2025). Erbfehler beim Schweizer Braunvieh — eine Übersicht [Genetic defects in Braunvieh cattle of Switzerland — an overview]. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 167(2), 98–108. <https://doi.org/10.17236/sat00344>. EDN: <https://elibrary.ru/FPJLPC>
26. Häfliger, I. M., Seefried, F. R., & Drögemüller, C. (2021). Reverse genetic screen for deleterious recessive variants in the Local Simmental cattle population of Switzerland. *Animals*, 11(12), 3535. <https://doi.org/10.3390/ani11123535>. EDN: <https://elibrary.ru/SFNGKS>
27. Häfliger, I. M., Seefried, F. R., Spengeler, M., & Drögemüller, C. (2021). Mining massive genomic data of two Swiss Braunvieh cattle populations reveals six novel candidate variants that impair reproductive success. *Genetics Selection Evolution*, 53, 95. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00686-3>. EDN: <https://elibrary.ru/RCWNGG>
28. Hu, L., Tian, Y., Chu, Q., Sammad, A., Jiao, S., Huang, X., Xie, Z., Hou, S., Liu, A., Wu, H., Liu, L., Wang, W., Yu, Y., & Wang, Y. (2022). Development and application of arachnomelia syndrome genetic detection in four Chinese dual-purpose cattle populations. *Research in Veterinary Science*, 152, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2022.08.009>. EDN: <https://elibrary.ru/KGDAGF>
29. International Committee for Animal Recording (ICAR). (2023). *Guidelines for genetic testing of zinc deficiency disorders in cattle* (Version 2.1). ICAR Technical Series No. 18. Retrieved from https://www.icar.org/wp-content/uploads/2023/05/ICAR_Zinc_Deficiency_Guidelines.pdf
30. Jiao, S., Chu, Q., Wang, Y., Xie, Z., Hou, S., Liu, A., Wu, H., Liu, L., Geng, F., Wang, C., Qin, C., Tan, R., Huang, X., Tan, S., Wu, M., Xu, X., Liu, X., Yu, Y., & Zhang, Y. (2013). Identification of the causative gene for Simmental arachnomelia syndrome using a network-based disease gene prioritization approach. *PLoS ONE*, 8(5), e64468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064468>
31. Joller, S., Stettler, M., Locher, I., Dettwiler, M., Seefried, F., Meylan, M., & Drögemüller, C. (2018). [Fanconi-Bickel-Syndrom: a novel genetic disease in Original Braunvieh]. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 160(3), 179–184.
32. Jung, S., Pausch, H., Langenmayer, M. C., Schwarzenbacher, H., Majzoub-Altweck, M., Gollnick, N. S., & Fries, R. (2014). A nonsense mutation in PLD4 is associated

- with a zinc deficiency-like syndrome in Fleckvieh cattle. *BMC Genomics*, 15, 623. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-623>
33. Langenmayer, M. C., Jung, S., Majzoub-Altweck, M., Trefz, F. M., Seifert, C., Knubben-Schweizer, G., Fries, R., Hermanns, W., & Gollnick, N. S. (2018). Zinc deficiency-like syndrome in Fleckvieh calves: Clinical and pathological findings and differentiation from bovine hereditary zinc deficiency. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 32(2), 853–859. <https://doi.org/10.1111/jvim.15040>
34. Langenmayer, M. C., Jung, S., Fux, R., Wittlinger, C., Tschoner, T., Majzoub-Altweck, M., Knubben-Schweizer, G., Fries, R., Hermanns, W., & Trefz, F. M. (2022). Macrophages in dermal disease progression of phospholipase D4-deficient Fleckvieh calves. *Veterinary Pathology*, 59(2), 319–327. <https://doi.org/10.1177/03009858211062629>. EDN: <https://elibrary.ru/DUCEEK>
35. Nicholas, F. W., Tammen, I., & Sydney Informatics Hub. (2025). *Online Mendelian Inheritance in Animals (OMIA)*. <https://omia.org>
36. Pausch, H., Kölle, S., Wurmser, C., Schwarzenbacher, H., Emmerling, R., Jansen, S., Trottmann, M., Fuerst, C., Götz, K. U., & Fries, R. (2014). A nonsense mutation in TMEM95 encoding a nondescript transmembrane protein causes idiopathic male subfertility in cattle. *PLoS Genetics*, 10(1), e1004044. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1004044>. EDN: <https://elibrary.ru/SPTUOD>
37. Pausch, H., Schwarzenbacher, H., Burgstaller, J., Flisikowski, K., Wurmser, C., Jansen, S., Jung, S., Schnieke, A., Wittek, T., & Fries, R. (2015). Homozygous haplotype deficiency reveals deleterious mutations compromising reproductive and rearing success in cattle. *BMC Genomics*, 16, 312. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1483-7>. EDN: <https://elibrary.ru/UTYWKT>
38. Rodriguez-Villamil, P., Beaton, B. P., & Krisher, R. L. (2024). Gene editing in livestock: Innovations and applications. *Animal Reproduction*, 21(3), e20240054. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2024-0054>. EDN: <https://elibrary.ru/VAWKZF>
39. Schwarzenbacher, H., Burgstaller, J., Seefried, F. R., Wurmser, C., Hilbe, M., Jung, S., Fuerst, C., Dinhopf, N., Weissenböck, H., Fuerst-Waltl, B., Dolezal, M., Winkler, R., Grueter, O., Bleul, U., Wittek, T., Fries, R., & Pausch, H. (2016). A missense mutation in TUBD1 is associated with high juvenile mortality in Braunvieh and Fleckvieh cattle. *BMC Genomics*, 17, 400. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2742-y>. EDN: <https://elibrary.ru/WTZELD>
40. Schwarzenbacher, H., Wurmser, C., Flisikowski, K., Misurova, L., Jung, S., Langenmayer, M. C., Schnieke, A., Knubben-Schweizer, G., Fries, R., & Pausch, H. (2016). A frameshift mutation in GON4L is associated with proportionate dwarfism in Fleckvieh cattle. *Genetics Selection Evolution*, 48, 25. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0207-z>. EDN: <https://elibrary.ru/RSVGOK>

41. Shormanova, M., Makhmutov, A., Shormanova, A., Muslimova, Z., & Ussenbekov, Y. (2024). Development of alternative diagnosis of HH1, HH3, HH5 and HCD fertility haplotypes and subfertility syndrome in cattle. *Reproduction in Domestic Animals*, 59(3), e14533. <https://doi.org/10.1111/rda.14533>. EDN: <https://elibrary.ru/PQGPIN>
42. Temizkan, M. C., Sonmez, G., & Sayar, E. (2025). Detection of arachnomelia syndrome in Simmental cattle in Türkiye. *Veterinary Medicine and Science*, 11(4), e70442. <https://doi.org/10.1002/vms3.70442>. EDN: <https://elibrary.ru/JYZJWE>
43. Weber, B. A., Leuenberger, T., Hauser, M., Bousmar, J. C. F., Gurtner, C., Seefried, F. R., Drögemüller, C., & Jacinto, J. G. P. (2025). Übersicht über bekannte und neue Erbfehler sowie deren Verbreitung bei Swiss Fleckvieh Rindern [Overview of known and new genetic defects and their prevalence in Swiss Fleckvieh cattle]. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 167(5), 280–291. <https://doi.org/10.17236/sat00452>. EDN: <https://elibrary.ru/ORITKH>
44. Weppert, M., Reichenbach, H.-D., Emmerling, R., Luntz, B., Buitkamp, J., Schade, B., Meier, N., & Götz, K.-U. (2008). Syndrome of arachnomelia in Simmental cattle. *BMC Veterinary Research*, 4, 39. <https://doi.org/10.1186/1746-6148-4-39>. EDN: <https://elibrary.ru/MVWYND>
45. Wu, X., Mesbah-Uddin, M., Guldbbrandtsen, B., Lund, M. S., & Sahana, G. (2020). Novel haplotypes responsible for prenatal death in Nordic Red and Danish Jersey cattle. *Journal of Dairy Science*, 103(5), 4570–4578. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17831>. EDN: <https://elibrary.ru/MNVCTR>
46. Zerbin, I., Metzger, J., Dierks, C., & Distl, O. (2015). Segregation of the hereditary thrombopathia-associated polymorphism in polled German Fleckvieh cattle. *Animal Genetics*, 46(5), 584–585. <https://doi.org/10.1111/age.12322>
47. Zhang, S., Peng, K., Zhang, G., Cao, Y., Zhang, M., Chen, H., Lei, C., Lan, X., & Zhao, Y. (2019). Detection of bovine TMEM95 p.Cys161X mutation in 13 Chinese indigenous cattle breeds. *Animals*, 9(7), 444. <https://doi.org/10.3390/ani9070444>

References

1. Bytov, M. V., Zubareva, V. D., Zaitseva, O. S., Sokolova, O. V., Yusupova, Ch. R., & Martynov, N. A. (2025). Development of diagnostic test systems and screening of fertility haplotypes in Holstein cattle. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*, 39(4), 58–65. https://doi.org/10.53859/02352451_2025_39_4_58. EDN: <https://elibrary.ru/SHBCVV>
2. Bytov, M. V., Sokolova, O. V., Bezborodova, N. A., Krasnoperov, A. S., & Isaeva, A. G. (2023). Methods for genotyping cattle for post-GWAS annotation of SNPs. *Agrarnyy Vestnik Urala*, 23(6), 67–75. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-235-06-67-75>. EDN: <https://elibrary.ru/KGDRES>

3. Zaitseva, O. S., Sokolova, O. V., Martynov, N. A., Bezborodova, N. A., & Bytov, M. V. (2022). Diagnosis of genetically determined diseases in Holstein cattle. *Trudy Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, (97), 167–177. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-97-167-177>. EDN: <https://elibrary.ru/UVNTSG>
4. Ignatieva, L. P., & Semyagin, A. A. (2019). Genetic monitoring of anomalies in the modern Simmental cattle population in Russia. *Genetika i Razvedenie Zhivotnykh*, (4), 33–42. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2019-4-33-42>. EDN: <https://elibrary.ru/NBSSCW>
5. Martynov, N. A., Modorov, M. V., Sokolova, O. V., Bytov, M. V., Zaitseva, O. S., Bezborodova, N. A., Zubareva, V. D., Kozhukhovskaya, V. V., & Shkuratova, I. A. (2022). Molecular genetic assessment of the prevalence of blood coagulation factor deficiency in the Ural population of Holsteinized black-and-white cattle. *Problemy Biologii Produktivnykh Zhivotnykh*, (1), 54–61. <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2022.1.54-61>. EDN: <https://elibrary.ru/WKZBTU>
6. Nikulin, I., & Kalyuzhny, I. (2021). Clinical symptoms of iodine and zinc deficiency in dairy cows. *BIO Web of Conferences*, 32, 04005. <https://doi.org/10.1051/bio-conf/20213204005>. EDN: <https://elibrary.ru/KLXANJ>
7. Samsonova, O. E., & Babushkin, V. A. (2021). Genetic and phenotypic correlations for some traits of purebred Simmental dairy cows. *Biologiya v Selskom Khozyaystve*, (4), 2–6.
8. Filipchenko, A. A., Fornara, M. S., Kostyunina, O. V., & Semyagin, A. A. (2018). Development of a test system for diagnosing the hereditary BMS anomaly associated with infertility in Simmental breeding bulls. *Genetika i Razvedenie Zhivotnykh*, (4), 23–28. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2018-4-23-28>. EDN: <https://elibrary.ru/YQORTN>
9. Aebi, M., Wiedemar, N., Drögemüller, C., & Zanolari, R. (2016). Hereditäre Thrombozytopathie beim Simmental Rind. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 158(2), 102–108. <https://doi.org/10.17236/sat00050>
10. Ask-Gullstrand, P., Strandberg, E., Båge, R., Rius-Vilarrasa, E., & Berglund, B. (2024). The effect of genetic defects on pregnancy loss in Swedish dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 107(5), 2999–3005. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24159>. EDN: <https://elibrary.ru/XSCRRQ>
11. Boudreaux, M. K. (2008). Characteristics, diagnosis, and treatment of inherited platelet disorders in mammals. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 233(8), 1251–1259. <https://doi.org/10.2460/javma.233.8.1251>
12. Boudreaux, M. K., Schmutz, S. M., & French, P. S. (2007). Calcium diacylglycerol guanine nucleotide exchange factor I (CalDAG-GEFI) gene mutations in a thrombopathic Simmental calf. *Veterinary Pathology*, 44(6), 932–935. <https://doi.org/10.1354/vp.44-6-932>

13. Burgstaller, J., Url, A., Pausch, H., Schwarzenbacher, H., Egerbacher, M., & Wittek, T. (2016). Clinical and biochemical signs in Fleckvieh cattle with genetically confirmed Fanconi-Bickel syndrome (cattle homozygous for Fleckvieh haplotype 2). *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift*, 129, 132–137.
14. Buitkamp, J., Luntz, B., Emmerling, R., Reichenbach, H. D., Weppert, M., Schade, B., Meier, N., & Götz, K. U. (2008). Syndrome of arachnomelia in Simmental cattle. *BMC Veterinary Research*, 4, 39. <https://doi.org/10.1186/1746-6148-4-39>. EDN: <https://elibrary.ru/MVWYND>
15. Buitkamp, J., Semmer, J., & Götz, K. U. (2011). Arachnomelia syndrome in Simmental cattle is caused by a homozygous 2-bp deletion in the molybdenum cofactor synthesis step 1 gene (MOCS1). *BMC Genetics*, 12, 11. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-12-11>
16. Chu, Q., Jiao, S. H., Wang, Y. C., Liu, L., Liu, A. R., Wu, H. J., Xie, Z. Q., Hou, S. Y., Geng, F. J., Wang, C. Y., Huang, X. X., Tan, S. X., Tan, R., Zhang, Y., Yu, Y., & Zhang, Y. (2013). [Establishment of the detection method for two causative genes of cattle arachnomelia syndrome]. *Yi Chuan*, 35(5), 623–627. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1005.2013.00623>
17. Cieplach, A., Rutkowska, K., Oprządek, J., & Polawska, E. (2017). Genetic disorders in beef cattle: a review. *Genes & Genomics*, 39, 461–471. <https://doi.org/10.1007/s13258-017-0525-8>. EDN: <https://elibrary.ru/CLAROS>
18. Cole, J. B. (2015). A simple strategy for managing many recessive disorders in a dairy cattle breeding program. *Genetics Selection Evolution*, 47, 94. <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0174-9>. EDN: <https://elibrary.ru/GEEUNI>
19. Cole, J. B., Baes, C. F., Eaglen, S. A. E., Lawlor, T. J., Maltecca, C., Ortega, M. S., & VanRaden, P. M. (2025). Invited review: Management of genetic defects in dairy cattle populations. *Journal of Dairy Science*, 108(4), 3045–3067. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-26035>. EDN: <https://elibrary.ru/GPEKTY>
20. Cole, J. B., Null, D. J., & VanRaden, P. M. (2016). Phenotypic and genetic effects of recessive haplotypes on yield, longevity, and fertility. *Journal of Dairy Science*, 99(9), 7274–7288. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10777>
21. Drögemüller, C., Rossi, M., Gentile, A., Testoni, S., Jörg, H., Stranzinger, G., Drögemüller, M., & Glowatzki-Mullis, M. L. (2009). Arachnomelia in Brown Swiss cattle maps to chromosome 5. *Mammalian Genome*, 20, 53–59. <https://doi.org/10.1007/s00335-008-9157-2>. EDN: <https://elibrary.ru/UXCVJS>
22. Drögemüller, C., Tetens, J., Sigurdsson, S., Gentile, A., Testoni, S., Lindblad-Toh, K., & Leeb, T. (2010). Identification of the bovine Arachnomelia mutation by massively parallel sequencing implicates sulfite oxidase (SUOX) in bone development. *PLoS Genetics*, 6(8), e1001079. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1001079>. EDN: <https://elibrary.ru/NYTFQH>

23. Elango, K., Kumaresan, A., Sharma, A., Nag, P., Pushpam, P. L., Arumugam, M., & Datta, T. K. (2020). Sub-fertility in crossbred bulls: deciphering testicular level transcriptomic alterations between zebu (*Bos indicus*) and crossbred (*Bos taurus* x *Bos indicus*) bulls. *BMC Genomics*, 21, 502. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06907-1>. EDN: <https://elibrary.ru/YFDGMG>
24. Johnston, I. A., Kent, M. P., Boudinot, P., Looseley, M., Bargelloni, L., Faggion, S., & Lien, S. (2024). Advancing fish breeding in aquaculture through genome functional annotation. *Aquaculture*, 583, 740589. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740589>. EDN: <https://elibrary.ru/XFSJIW>
25. Glatthard, S., Seefried, F. R., Gentile, A., Jacinto, J. P. G., & Drögemüller, C. (2025). Erbfehler beim Schweizer Braunvieh — eine Übersicht [Genetic defects in Braunvieh cattle of Switzerland — an overview]. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 167(2), 98–108. <https://doi.org/10.17236/sat00344>. EDN: <https://elibrary.ru/FPJLPC>
26. Häfliger, I. M., Seefried, F. R., & Drögemüller, C. (2021). Reverse genetic screen for deleterious recessive variants in the Local Simmental cattle population of Switzerland. *Animals*, 11(12), 3535. <https://doi.org/10.3390/ani11123535>. EDN: <https://elibrary.ru/SFNGKS>
27. Häfliger, I. M., Seefried, F. R., Spengeler, M., & Drögemüller, C. (2021). Mining massive genomic data of two Swiss Braunvieh cattle populations reveals six novel candidate variants that impair reproductive success. *Genetics Selection Evolution*, 53, 95. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00686-3>. EDN: <https://elibrary.ru/RCWGNG>
28. Hu, L., Tian, Y., Chu, Q., Sammad, A., Jiao, S., Huang, X., Xie, Z., Hou, S., Liu, A., Wu, H., Liu, L., Wang, W., Yu, Y., & Wang, Y. (2022). Development and application of arachnomelia syndrome genetic detection in four Chinese dual-purpose cattle populations. *Research in Veterinary Science*, 152, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2022.08.009>. EDN: <https://elibrary.ru/KGDAGF>
29. International Committee for Animal Recording (ICAR). (2023). *Guidelines for genetic testing of zinc deficiency disorders in cattle* (Version 2.1). ICAR Technical Series No. 18. Retrieved from https://www.icar.org/wp-content/uploads/2023/05/ICAR_Zinc_Deficiency_Guidelines.pdf
30. Jiao, S., Chu, Q., Wang, Y., Xie, Z., Hou, S., Liu, A., Wu, H., Liu, L., Geng, F., Wang, C., Qin, C., Tan, R., Huang, X., Tan, S., Wu, M., Xu, X., Liu, X., Yu, Y., & Zhang, Y. (2013). Identification of the causative gene for Simmental arachnomelia syndrome using a network-based disease gene prioritization approach. *PLoS ONE*, 8(5), e64468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064468>
31. Joller, S., Stettler, M., Locher, I., Dettwiler, M., Seefried, F., Meylan, M., & Drögemüller, C. (2018). [Fanconi-Bickel-Syndrom: a novel genetic disease in Original Braunvieh]. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 160(3), 179–184.

32. Jung, S., Pausch, H., Langenmayer, M. C., Schwarzenbacher, H., Majzoub-Altweck, M., Gollnick, N. S., & Fries, R. (2014). A nonsense mutation in PLD4 is associated with a zinc deficiency-like syndrome in Fleckvieh cattle. *BMC Genomics*, 15, 623. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-623>
33. Langenmayer, M. C., Jung, S., Majzoub-Altweck, M., Trefz, F. M., Seifert, C., Knubben-Schweizer, G., Fries, R., Hermanns, W., & Gollnick, N. S. (2018). Zinc deficiency-like syndrome in Fleckvieh calves: Clinical and pathological findings and differentiation from bovine hereditary zinc deficiency. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 32(2), 853–859. <https://doi.org/10.1111/jvim.15040>
34. Langenmayer, M. C., Jung, S., Fux, R., Wittlinger, C., Tschoner, T., Majzoub-Altweck, M., Knubben-Schweizer, G., Fries, R., Hermanns, W., & Trefz, F. M. (2022). Macrophages in dermal disease progression of phospholipase D4-deficient Fleckvieh calves. *Veterinary Pathology*, 59(2), 319–327. <https://doi.org/10.1177/03009858211062629>. EDN: <https://elibrary.ru/DUCEEK>
35. Nicholas, F. W., Tammen, I., & Sydney Informatics Hub. (2025). *Online Mendelian Inheritance in Animals (OMIA)*. <https://omia.org>
36. Pausch, H., Kölle, S., Wurmser, C., Schwarzenbacher, H., Emmerling, R., Jansen, S., Trottmann, M., Fuerst, C., Götz, K. U., & Fries, R. (2014). A nonsense mutation in TMEM95 encoding a nondescript transmembrane protein causes idiopathic male subfertility in cattle. *PLoS Genetics*, 10(1), e1004044. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1004044>. EDN: <https://elibrary.ru/SPTUOD>
37. Pausch, H., Schwarzenbacher, H., Burgstaller, J., Flisikowski, K., Wurmser, C., Jansen, S., Jung, S., Schnieke, A., Wittek, T., & Fries, R. (2015). Homozygous haplotype deficiency reveals deleterious mutations compromising reproductive and rearing success in cattle. *BMC Genomics*, 16, 312. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1483-7>. EDN: <https://elibrary.ru/UTYWKT>
38. Rodriguez-Villamil, P., Beaton, B. P., & Krisher, R. L. (2024). Gene editing in livestock: Innovations and applications. *Animal Reproduction*, 21(3), e20240054. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2024-0054>. EDN: <https://elibrary.ru/VAWKZF>
39. Schwarzenbacher, H., Burgstaller, J., Seefried, F. R., Wurmser, C., Hilbe, M., Jung, S., Fuerst, C., Dinhopf, N., Weissenböck, H., Fuerst-Waltl, B., Dolezal, M., Winkler, R., Grueter, O., Bleul, U., Wittek, T., Fries, R., & Pausch, H. (2016). A missense mutation in TUBD1 is associated with high juvenile mortality in Braunvieh and Fleckvieh cattle. *BMC Genomics*, 17, 400. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2742-y>. EDN: <https://elibrary.ru/WTZELD>
40. Schwarzenbacher, H., Wurmser, C., Flisikowski, K., Misurova, L., Jung, S., Langenmayer, M. C., Schnieke, A., Knubben-Schweizer, G., Fries, R., & Pausch, H. (2016). A frameshift mutation in GON4L is associated with proportionate dwarfism

- in Fleckvieh cattle. *Genetics Selection Evolution*, 48, 25. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0207-z>. EDN: <https://elibrary.ru/RSVGOK>
41. Shormanova, M., Makhmutov, A., Shormanova, A., Muslimova, Z., & Ussenbekov, Y. (2024). Development of alternative diagnosis of HH1, HH3, HH5 and HCD fertility haplotypes and subfertility syndrome in cattle. *Reproduction in Domestic Animals*, 59(3), e14533. <https://doi.org/10.1111/rda.14533>. EDN: <https://elibrary.ru/PQGPIN>
42. Temizkan, M. C., Sonmez, G., & Sayar, E. (2025). Detection of arachnomelia syndrome in Simmental cattle in Türkiye. *Veterinary Medicine and Science*, 11(4), e70442. <https://doi.org/10.1002/vms3.70442>. EDN: <https://elibrary.ru/JYZJWE>
43. Weber, B. A., Leuenberger, T., Hauser, M., Bousmar, J. C. F., Gurtner, C., Seefried, F. R., Drögemüller, C., & Jacinto, J. G. P. (2025). Übersicht über bekannte und neue Erbfehler sowie deren Verbreitung bei Swiss Fleckvieh Rindern [Overview of known and new genetic defects and their prevalence in Swiss Fleckvieh cattle]. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 167(5), 280–291. <https://doi.org/10.17236/sat00452>. EDN: <https://elibrary.ru/ORITKH>
44. Weppert, M., Reichenbach, H.-D., Emmerling, R., Luntz, B., Buitkamp, J., Schade, B., Meier, N., & Götz, K.-U. (2008). Syndrome of arachnomelia in Simmental cattle. *BMC Veterinary Research*, 4, 39. <https://doi.org/10.1186/1746-6148-4-39>. EDN: <https://elibrary.ru/MVWYND>
45. Wu, X., Mesbah-Uddin, M., Guldbbrandtsen, B., Lund, M. S., & Sahana, G. (2020). Novel haplotypes responsible for prenatal death in Nordic Red and Danish Jersey cattle. *Journal of Dairy Science*, 103(5), 4570–4578. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17831>. EDN: <https://elibrary.ru/MNVCTR>
46. Zerbin, I., Metzger, J., Dierks, C., & Distl, O. (2015). Segregation of the hereditary thrombopathia-associated polymorphism in polled German Fleckvieh cattle. *Animal Genetics*, 46(5), 584–585. <https://doi.org/10.1111/age.12322>
47. Zhang, S., Peng, K., Zhang, G., Cao, Y., Zhang, M., Chen, H., Lei, C., Lan, X., & Zhao, Y. (2019). Detection of bovine TMEM95 p.Cys161X mutation in 13 Chinese indigenous cattle breeds. *Animals*, 9(7), 444. <https://doi.org/10.3390/ani9070444>

ВКЛАД АВТОРОВ

Безбородова Н.А.: администрирование проекта, написание исходного текста статьи, подбор литературы.

Соколова О.В.: структурирование текста статьи, проверка и редактирование исходного текста.

Зверев А.В.: подбор и анализ литературных источников.

Мартынов Н.А.: подбор литературных источников, научное редактирование текста.

Романов Е.В.: оформление статьи в соответствии с правилами публикации, редактирование.

Юсупова Ч.Р.: редактирование текста.

Зайцева О.С.: редактирование текста.

Шаповалова А.М.: подбор и анализ литературных источников.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Natalia A. Bezborodova: project administration, drafting the initial text of the article, literature review.

Olga V. Sokolova: structuring the text of the article, proofreading and editing the initial text.

Anatoly V. Zverev: selection and analysis of literature sources.

Nikolai A. Martynov: selection of literature sources, scientific editing of the text.

Egor V. Romanov: formatting the article in accordance with publication guidelines, editing.

Chulpan R. Yusupova: text editing.

Olga S. Zaitseva: text editing.

Anastasia M. Shapovalova: selection and analysis of literature sources.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Безбородова Наталья Александровна, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник отдела геномных исследований и селекции животных ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»
ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
n-bezborodova@mail.ru

Соколова Ольга Васильевна, доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник отдела геномных исследований и селекции животных ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»
ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
nauka_sokolova@mail.ru

Зверев Анатолий Валерьевич, лаборант-исследователь отдела геномных исследований и селекции животных ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»
ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
anatoliyzverev@mail.ru

Мартынов Николай Александрович, лаборант отдела геномных исследований и селекции животных

ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

*ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
martynov_kolya98@mail.ru*

Романов Егор Владимирович, младший научный сотрудник отдела ветеринарно-лабораторной диагностики с испытательной лабораторией

ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

*ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
romanov.egor.2303@gmail.com*

Юсупова Чулпан Рифовна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела геномных исследований и селекции животных

ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

*ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
chulpan-galina@mail.ru*

Зайцева Ольга Сергеевна, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник отдела геномных исследований и селекции животных

ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

*ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
bodrova-zaizeva@mail.ru*

Шаповалова Анастасия Максимовна, студентка бакалавриата мегафакультета наук о жизни

Университет ИТМО

пр. Кронверкский, 49А, г. Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalia A. Bezborodova, Candidate of Veterinary Sciences, Senior Researcher Department of Genomic Research and Animal Breeding

Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

112a, Belinsky Str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation
n-bezborodova@mail.ru
SPIN-code: 7012-0999
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2793-5001>

Olga V. Sokolova, Doctor of Veterinary Sciences, Leading Researcher Department of Genomic Research and Animal Breeding
Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
112a, Belinsky Str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation
nauka_sokolova@mail.ru
SPIN-code: 7437-2300
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1169-4090>

Anatoly V. Zverev, Laboratory researcher Department of Genomic Research and Animal Breeding
Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
112a, Belinsky Str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation
anatoliyzverev@mail.ru
SPIN-code: 6187-6175
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9408-8106>

Nikolai A. Martynov, Laboratory Assistant Department of Genomic Research and Animal Breeding
Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
112a, Belinsky Str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation
martynov_kolya98@mail.ru
SPIN-code: 7332-1403
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9251-0056>

Egor V. Romanov, Junior Research Assistant, Veterinary Laboratory Diagnostics Department with Testing Laboratory
Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
112a, Belinsky Str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation
romanov.egor.2303@gmail.com

SPIN-code: 4108-5689

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4980-0481>

Chulpan R. Yusupova, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher Department of Genomic Research and Animal Breeding

Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

112a, Belinsky Str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation

chulpan-galina@mail.ru

SPIN-code: 3428-7317

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2970-6528>

Olga S. Zaitseva, Candidate of Veterinary Sciences, Senior Researcher, Department of Genomic Research and Animal Breeding

Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

112a, Belinsky Str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation

bodrova-zaizeva@mail.ru

SPIN-code: 6267-0484

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9251-0056>

Anastasia M. Shapovalova, undergraduate student in the Biotechnology program at the Faculty of Life Sciences

ITMO University

49A, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Поступила 17.10.2025

После рецензирования 16.03.2026

Принята 01.04.2026

Received 17.10.2025

Revised 16.03.2026

Accepted 01.04.2026

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1817](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1817)

EDN: JEQUOT

УДК 633.63:632.93:632.954



Изучение разных схем защиты посевов сахарной свеклы от сорняков в северо-западной части Центрального Черноземья

В.А. Гулидова, Р.В. Щучка, В.Л. Захаров,
В.А. Кравченко, Б.А. Сотников

*ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»,
Елец, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Обосновывается подход расширения химических средств защиты сахарной свеклы от сорной растительности в целях реализации генетического потенциала свекловичного растения современных гибридов, сохранения экологии и увеличения эффективности проводимых обработок. Химические средства должны быть ориентированы на оптимизацию использования известных и новых гербицидов на принципах эффективности и экологической безопасности. Современные средства защиты сахарной свеклы - это высоко активные химические соединения, которые являются токсичными и могут негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека.

Цель исследований состояла в разработке экономически эффективных и экологически малоопасных схем применения многокомпонентных инновационных гербицидов для защиты сахарной свеклы от вредоносных объектов и минимизация последствий их воздействия на агроценоз культуры.

Материалы и методы. Исследования проводили в полевых мелкоделяночных опытах в соответствии с «Методическое руководство по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве» (2009). Объектами исследований была сахарная свекла гибрида Дубрава КВС и гербофауна агроценозов данной культуры. При выборе пестицидов, руководствовались «Государственным каталогом пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории РФ, 2025 г.

Результаты. Подавление двудольных сорняков лучше всего было от применения схем защиты № 3 и № 4. Эффективность высокая - 97,6 и 95,8%. Все изучае-

мые схемы хорошо защищали посевы сахарной свеклы от однодольных сорняков, кроме схемы №1 (эталонный вариант). На этом варианте было больше на 3,4% однодольных сорняков в сравнении со схемой № 4. Наибольшего эффекта по урожайности корнеплодов (67,6 т/га) и сбору сахара (11,42 т/га) удается достичь с использованием четвертой схемы защиты. Превышение над другими вариантами по сбору сахара составило 3,4 % (схема № 3), 7,3% (схема № 2) и 10,9% (схема №1). Если не проводить защиты посевов от сорняков потери сахара составят 23,8% (2,2 т/га).

Заключение. Система защиты сахарной свеклы, построенная по примеру схемы № 4 обуславливает высокую биологическую и экологическую эффективность за счет применения в этой схеме дважды метамитрона в виде препаратов Метафол, СК (700 г/л метамитрона) и Пилот, ВСК (700 г/л метамитрона) – 1,5 л/га. Метамитрон очень хорошо переносится молодыми растениями сахарной свеклы, даже при высоких дозах по послеуборочному способу. Очень низкая фитотоксичность для свеклы, широкий диапазон сроков применения и высокая надежность действия метамитрона способствуют снижению производственного риска при возделывании сахарной свеклы.

Ключевые слова: сахарная свекла; сорняки; защита; урожайность; сахаристость; схема защиты; гербициды; эффективность; метамитрон

Для цитирования. Гулидова, В. А., Щучка, Р. В., Захаров, В. Л., Кравченко, В. А., & Сотников, Б. А. (2026). Изучение разных схем защиты посевов сахарной свеклы от сорняков в северо-западной части Центрального Черноземья. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 176–196. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1817>

Study of different schemes for protecting sugar beet crops from weeds in the northwestern part of the Central Black Earth Region

V.A. Gulidova, R.V. Shchuchka, V.L. Zakharov,
V.A. Kravchenko, B.A. Sotnikov

Yelets State University named after I.A. Bunin, Yelets, Russian Federation

Abstract

Background. This paper substantiates an approach to expanding chemical weed control measures for sugar beets in order to realize the genetic potential of modern sugar beet hybrids, preserve the environment, and increase the effectiveness of treatments. Chemical control measures should be focused on optimizing the use of existing and new

herbicides based on principles of efficiency and environmental safety. Current sugar beet protection products contain highly active chemical compounds that are toxic and can negatively impact the environment and human health.

Purpose. The aim of the research was to develop cost-effective and environmentally friendly schemes for the application of multi-component innovative herbicides to protect sugar beets from harmful objects and to minimize the consequences of their impact on the crop agrocenosis.

Materials and methods. The research was conducted in small-plot field trials in accordance with the “Methodological Guide for the Study of Herbicides Used in Crop Production” (2009). The objects of the study were Dubrava KVS hybrid sugar beet and the herbivorous fauna of this crop’s agrocenoses. The selection of pesticides was guided by the “State Catalog of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use in the Russian Federation, 2025.”

Results. Dicotyledonous weed suppression was best achieved with control schemes № 3 and № 4, with high efficiency rates of 97.6% and 95.8%. All studied schemes provided good protection for sugar beet crops from monocotyledonous weeds, except for scheme №1 (the reference variant). This variant had 3.4% more monocotyledonous weeds than scheme № 4. The greatest effect on root crop yield (67.6 t/ha) and sugar yield (11.42 t/ha) was achieved with the fourth control scheme. The sugar yield increase over other variants was 3.4% (scheme № 3), 7.3% (scheme № 2), and 10.9% (scheme № 1). If crops are not protected from weeds, sugar losses will amount to 23.8% (2.2 t/ha).

Conclusion. The sugar beet protection system based on Scheme #4 demonstrates high biological and ecological effectiveness due to the double application of metamiltron: Metafol, SK (700 g/L metamiltron) and Pilot, VSK (700 g/L metamiltron) at 1.5 L/ha. Metamiltron is very well tolerated by young sugar beet plants, even at high post-emergence doses. Its very low phytotoxicity to sugar beets, wide application window, and highly reliable performance contribute to the reduction of production risks in sugar beet cultivation.

Keywords: sugar beet; weeds; protection; yield; sugar content; protection scheme; herbicides; efficiency; metamiltron

For citation. Gulidova, V. A., Shchuchka, R. V., Zakharov, V. L., Kravchenko, V. A., & Sotnikov, B. A. (2026). Study of different schemes for protecting sugar beet crops from weeds in the northwestern part of the Central Black Earth Region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 176–196. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1817>

Введение

Сахарная свекла важнейшая техническая культура современной России [3-5; 19], которая не терпит ошибок в агротехнике. Производство сахарной

свеклы не обходится без применения химических средств, особенно когда ее возделывают без затрат ручного труда [1; 14; 15; 21].

В последние годы на сахарной свекле появились вредители и патогены, которые были мало распространены и не наносили экономического ущерба культуре. Но в настоящее время они наносят вред урожаю [7]. Причем, некоторые виды становятся устойчивыми к традиционным химическим препаратам [20]. Это связано не только с изменениями в регионе климатических условий в сторону потепления, но и с тем, что 98% семян сахарной свеклы импортируются из регионов, где они в сильной степени распространены.

Современные средства защиты сахарной свеклы - это высоко активные химические соединения. Они часто являются токсичными и могут негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека [13]. Их применение отрицательно сказывается на экосистемах и плодородии земель, отмечается снижение биологической активности почв [12].

Химическая структура и препаративная форма пестицида, концентрация, норма расхода рабочей жидкости и кратность внесения оказывают значительное влияние на поведение пестицида в почве [11], так как действие ряда препаратов связаны с патологическим и генетическим действием на биоту [10]. Поэтому в настоящее время целью применения пестицидов для защиты сахарной свеклы от вредных объектов должно быть сведение до минимума негативных последствий для агроэкосистемы [18], а также надежная защита культуры от стрессовых биотических и абиотических факторов. И все это на фоне максимального выхода конечного продукта - белого кристаллического свекловичного сахара.

Северо-запад Центрального Черноземья (ЦЧР) отличается специфическими почвенно-климатическими условиями, которые влияют на эффективность высокоэффективных пестицидов. При их применении важно учитывать ряд факторов: климатические условия, тип почвы, биологическое разнообразие культурных и сорных растений.

Цель исследований состояла в разработке экономически эффективных и экологически малоопасных разных схем применения многокомпонентных инновационных гербицидов для защиты сахарной свеклы от вредоносных объектов и минимизация последствия их воздействия на агроценоз культуры.

Материалы и методы

Исследования проводились в хозяйстве «Заря» ГК Доминант Краснинского района Липецкой области в течение 2021-2022 гг. Объектами

исследований была сахарная свекла гибрида Дубрава КВС и гербофауна агроценозов данной культуры. Сахарная свекла возделывалась по технологии, рекомендованной для Центрального Черноземья. В исследованиях применяли общепринятые методы проведения полевых опытов [9].

Сроки внесения гербицидов увязывали как с фазой развития растений сахарной свеклы, так и с фазой развития сорняков. Гербициды вносили 3 раза за вегетацию культуры: 1-ое внесение, когда культура находилась в фазе семядолей-вилочки, 2-ое внесение - фаза 2-4 настоящих листьев, 3-е внесение – фаза 4-6 настоящих листьев. Защита посевов от вредителей была одинаковой на всех вариантах. При появлении долгоносиков и свекловичных блошек вносили препарат Борея, СК (имidakлоприд 150 г/л + лямбда-цигалотрин 50 г/л) в дозе 0,12 л/га.

Для оценки уровня засоренности сахарной свеклы использовали метод наложения рамки площадью 0,25м² и подсчета количества всех видов сорняков внутри нее [16]. Уровень засоренности оценивали по 5-бальной шкале [22]. Этот метод позволяет получить количественную оценку засоренности участка, что важно для принятия решений о проведении опрыскивания гербицидами. Засоренность сахарной свеклы учитывали три раза: перед опрыскиванием, через 30 дней после опрыскивания и перед уборкой урожая.

Изучаемые схемы защиты сахарной свеклы от сорной растительности показаны в табл.1. При выборе пестицидов, руководствовались «Государственным каталогом пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории РФ, 2025 г.» [2].

Таблица 1.

Схемы защиты сахарной свеклы от сорной растительности**Table 1. Methods for Controlling Weeds in Sugar Beet Fields**

Фаза развития растений сахарной свеклы	Схема №1 (эталон)	Схема № 2	Схема № 3	Схема № 4
	Контроль (без применения пестицидов)			
1-обработка (семядолей-вилочки)	Бицепс 300, МКЭ (десмедифам 150 г/л + фенмедифам 150 г/л) – 1,5 л/га	Бицепс 300, МКЭ (десмедифам 150 г/л + фенмедифам 150 г/л) – 1,5 л/га	Бицепс Гарант, КЭ (этофумизат 110 г/л + фенмедифам 91 г/л + десмедифам 71 г/л) – 1,0 л/га	Бицепс 300, МКЭ (десмедифам 150 г/л + фенмедифам 150 г/л) – 1,5 л/га + Борея, СК (имidakлоприд 150 г/л + лямбда-цигалотрин 50 г/л) – 0,12 л/га

2 обработ- ка (2-4 на- стоящих листьев)	Бицепс Га- рант, КЭ (этофумизат 110 г/л + фенмедифам 91г/л+десме- дифам 71г/л)- 3л/га+Три- цепс, ВДГ (трифлусуль- фурон-ме- тил 750 г/л)-0,02 л/ га+Борей, СК (имидакло- прид 150 г/ л+лямбда-ци- галотрин 50 г/л)-0,12 л/га	Бис 300, ВР (клопира- лид 300г/л)- 0,3 л/га+ Метафол, СК (мета- митрон 700 г/л) - 1,5 л/га	Пилот, ВСК (метамитрон 700 г/л) -1,5 л/га	Бицепс Гарант, КЭ (этофумизат 110 г/ л+фенмедифам 91г/ л+десмедифам 71 г/л)-2,0 л/га+ Мета- фол, СК (метамитрон 700г/л)-1,5 л/га
3 обработ- ка (4-6 на- стоящих листьев)	Фюзилад Форте, КЭ (флуази- фоп-П-бутил 150 г/л) - 1,0 л/га	Метафол, СК (мета- митрон 700г/л) - 1,5 л/га + Фюзилад Форте, КЭ (флуази- фоп-П-бутил 150 г/л) - 1,0 л/га +Борей, СК (имидакло- прид 150 г/л +лямбда-ци- галотрин 50 г/л)-0,12 л/га	Трицепс, ВДГ (трифлусуль- фурон-метил 750 г/л)-0,02 л/га + Фюзи- лад Форте, КЭ (флуази- фоп-П-бутил 150 г/л) - 1,0 л/ га)+ Борей, СК (имидакло- прид 150 г/ л+лямбда-ци- галотрин 50 г/л)-0,12 л/га	Пилот, ВСК (метамитрон 700 г/л)+Трицепс, ВДГ (трифлусульфу- рон-метил 750 г/л)- 0,02 л/га + Фюзилад Форте, КЭ (флуа- зифоп-П-бутил 150 г/л) - 1,0л/га)+Аль- бит, ТПС – 0,3 л/га

Погодные условия в годы проведения основных полевых учетов и наблюдений были разнообразны. Сумма осадков с апреля по сентябрь отличалась от среднеголетних значений: в 2021 г. выпало 83,9 %, в 2022 г. 73,9 % от среднеголетней нормы. Особенно засушливым был период в течение двух месяцев (май и июнь) в 2022 г., когда выпало всего 10 мм осадков, а температура воздуха была выше среднеголетних значений за этот период на 3,4°C. По температурному режиму вегетационный период 2021 г. был теплее на 2,8 °С, 2022 г. – на 1,5°C среднеголетних значений.

Гербициды, применяемые в исследованиях, относятся к разным химическим классам и с разным механизмом действия на сорные растения (табл. 2).

Таблица 2.

Механизм действия гербицидов, используемых в изучаемых схемах для защиты сахарной свеклы от сорняков

Table 2. Mechanism of action of the herbicides used in the study protocols to protect sugar beets from weeds

Класс химических соединений	Действующее вещество	Препарат	Механизм действия на сорное растение
Сульфонилмочевины	Трифлу-сульфурон-метил	Трицепс, ВДГ	Ингибиторы ацетолактатсинтазы (ALS)
Триазиноны	Метамитрон	Пилот, ВСК; Метафол, СК	Ингибиторы фотосинтеза, системы II
Пиридазины	Этофумизат	Бицепс Гарант, КЭ	Ингибиторы биосинтеза каротиноидов фитоендисатуразы (PDS). Ингибирует дыхание растений и фотосинтез, угнетает синтез жиров.
Фенилкарбаматы	Фенмедифам	Бицепс Гарант, КЭ; Бицепс 300, МКЭ	Ингибитор нециклического фотофосфорилирования. Нарушает фотосинтез и обмен белков в чувствительных растениях.
Фенилкарбаматы	Десмедифам	Бицепс Гарант, КЭ; Бицепс 300, МКЭ	Подавляет образование белков и нуклеиновых кислот (прежде всего РНК), нарушая деление клеток.
Пиридины	Клопиралид	Бис 300, ВР	Действие, подобное индолилуксусной кислоте (синтетические ауксины)
Арилоксифеноксипропионовые кислоты (производные)	Флуазифоп-П-бутил	Фюзилад Форте, КЭ	Ингибиторы ацетил-СоА-карбоксилазы (АССазы)

Результаты и обсуждение

Борьба с сорняками является обязательным и ответственным агроприемом в технологии возделывания сахарной свеклы. Особенно значение этого агроприема возросло, когда стали свеклу высевать на конечную густоту. Сахарная свекла в начале вегетации медленно растет и слабо конкурирует с сорняками, которые обгоняют ее в росте. Видовой состав сорняков в сред-

ней полосе России (Липецкая область) очень разнообразен, в свекловичном агроценозе присутствуют до 60 видов сорняков. Для того чтобы правильно подобрать гербицид и решить проблему управления сорным компонентом в посевах этой важной технической культуры, надо проводить экологический мониторинг сорняков. Наблюдения за динамикой численности сорняков по фазам развития сахарной свеклы показали, что их количество возрастает за счет появления новых видов в течение всего периода произрастания культуры.

Перед обработкой гербицидами на контрольном варианте был смешанный тип засоренности, состоящий из однодольных и двудольных сорняков. Наиболее выраженное негативное влияние оказывали щетинники (зеленый и сизый), щирица запрокинутая и марь белая, так как именно они формировали наиболее сильные очаги поражения полей. Их численность достигала до 90 шт/м² с покрытием поверхности посевов от 85 до 95%. Марь белая (*Chenopodium album*) в средней и сильной степени засоренности была на площади 19,3%. Щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus*) в сильной степени распространения была на площади 17,9%, но на 1,4% меньше, чем марь белая. Щетинники (*Setaria* spp.) сильно засоряли поле сахарной свеклы на площади 29,5%.

Другие виды вредоносных сорняков: горчица полевая (*Sinapis arvensis*), подмаренник цепкий (*Galium aparine*), горец почечуйный (*Persicaria maculosa*) имели слабую степень засоренности, хотя и занимали достаточно большую площадь распространения - 27,3; 39,0 и 42,0 % соответственно. Горца почечуйного и горчицы полевой на 1 м² насчитывалось не более 5 шт/м². Осот полевой (*Sonchus arvensis*), который для сахарной свеклы является очень злостным сорняком, встречался на 35% площади опыта и 95% этой площади имела до 5 шт/м² сорняка. Сорняк в большей степени распространялся куртинками.

В период массовых всходов сахарной свеклы было 46,5 шт/м² двудольных и 37,8 шт/м² однодольных сорняков (табл.3). Анализируя таблицу динамики численности сорняков в посевах сахарной свеклы по фазам ее развития, можем сделать несколько выводов. Двудольные виды представлены марью белой, осотом полевым, щирицей запрокинутой, подмаренником цепким, горчицей полевой и горцем почечуйным. Их численность значительно превышает количество однодольных видов. Однодольные виды также присутствуют, однако их общая численность ниже двудольных на всех этапах развития культуры.

Фазы развития сахарной свеклы и динамика сорняков имеют свои особенности. Начальная фаза роста сахарной свеклы характеризуется отно-

сительно низкой численностью сорняков обоих типов. Это связано с тем, что сорные растения ещё недостаточно развиты, чтобы конкурировать с культурными растениями. Из двудольных больше всего было *Amaranthus retroflexus* (18,0 шт/м²) и *Chenopodium album* (12,1 шт/м²). Меньше всего в этот период было *Galium aparine* и *Persicaria maculosa* по 3,7 шт/м².

Таблица 3.

Динамика численности сорняков в посевах сахарной свеклы по фазам ее развития на контрольном варианте, шт/м²

Table 3. Changes in weed abundance in sugar beet crops by growth stage in the control treatment, plants/m²

Вид сорняка	Фаза развития сахарной свеклы				
	Всходы	Смы- кание рядков	Размы- кание рядков	Накопление сахара в кор- неплодах	Уборка
Марь белая (<i>Chenopodium album</i> L.)	12,1	18,1	29,3	34,3	31,3
Осот полевой (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	4,0	5,7	7,3	8,1	8,6
Щирица запрокинутая (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.)	18,0	37,3	30,7	22,3	34,7
Подмаренник цепкий (<i>Galium aparine</i> L.)	3,7	5,0	8,7	10,3	12,3
Горчица полевая (<i>Sinapis arvensis</i> L.)	5,0	9,3	15,7	18,7	18,3
Горец почечуйный (<i>Polygonum persicaria</i> L.)	3,7	7,7	13,7	18,3	18,0
Двудольные, всего	46,5	83,1	105,4	112,0	123,2
Однодольные, всего	37,8	49,7	74,9	88,5	123,0

В северо-западной части Центрального Черноземья фаза смыкания рядков - это время активного роста надземной части у растений сахарной свеклы, но одновременно с этим и увеличивается плотность популяции нежелательной сорной растительности, особенно среди двудольных видов сорняков. В исследованиях количество двудольных сорняков увеличилось на 78,7%, однодольных – на 31,5%.

Анализируя динамику изменения численности сорняков в период смыкания рядков сахарной свеклы отмечаем, что повышение численности сорняков происходило, но менее интенсивно. Двудольные увеличились на 26,8%, но произошло снижение конкретного вида (щирицы запрокинутой) на 17,7%. Рост численности однодольных составил 50,7%. Это объясня-

ется улучшением условий среды обитания для сорной растительности, таким как доступ к свету, воде и питательным веществам.

К фазе накопления сахара в корнеплодах продолжалось дальнейшее увеличение количества сорняков в посевах сахарной свеклы: двудольные увеличились на 6,3%, однодольные – на 18,2%. К уборке урожая на контрольном варианте продолжала нарастать численность сорняков: прирост двудольных составил 10% при одновременном снижении численности мари белой на 3 шт/м², однодольных - 39%. В период накопления сахара в корнеплодах число сорняков в северо-западной части ЦЧР достигает своего пика, что негативно сказывается на качестве и количестве урожая сахарной свеклы. Даже перед уборкой урожая сохраняется высокая плотность сорняков, что требует дополнительного внимания к агротехническим мероприятиям для минимизации потерь урожая.

За весь период вегетации степень засоренности сахарной свеклы варьировала от сильной до слабой и составила 94 шт/м² двудольных сорняков и 74,8 шт/м² однодольных. Однодольные сорняки менее многочисленны, но их влияние на урожай также значимо. Сорняки как постоянные компаньоны сахарной свеклы оказывали негативное влияние на культуру в течение всего периода произрастания. Синхронизация роста и развития свеклы и сорняков диктует необходимость применения эффективных мер борьбы с сорняками, включая механические обработки почвы и использование гербицидов, особенно в критические фазы развития культуры.

Для каждого поля, где произрастает сахарная свекла, используется своя индивидуальная схема защиты от нежелательной сорной растительности. Эта схема в первую очередь основывается на видовом составе сорных растений, их чувствительности к разным препаратам, учитывается показатель биологической эффективности каждого препарата и сочетания этих препаратов, кратность их применения. Каждый вид сорняка обладает уникальными характеристиками роста, развития и устойчивости к химическим веществам. Например, однолетние злаковые сорняки чувствительны к одним гербицидам, многолетники – к другим. Поэтому на первом этапе разработки оптимальной схемы защиты сахарной свеклы включает выявление доминирующих видов сорняков в конкретном регионе или хозяйстве. Биологическая эффективность гербицидов зависит от дозы внесения, срока обработки и погодных условий. Для повышения эффективности рекомендуется применять препараты последовательно или комбинировано. Таблица 4 демонстрирует влияние различных комбинаций гербицидов на контроль доминирующих сорных растений в посевах сахарной свеклы.

Таблица 4.

Биологическая эффективность применения гербицидов против доминирующих видов сорных растений в посевах сахарной свеклы, %

Table 4. Biological efficacy of herbicides against dominant weed species in sugar beet crops, %

Вид сорняка	Вариант опыта				
	Схема №1 (эталон)	Схема №2	Схема №3	Схема №4	НСР ₀₅
Марь белая (<i>Chenopodium album</i> L.)	85,9	87,0	96,4	97,2	2,8
Осот полевой (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	90,3	95,9	94,0	93,8	2,9
Щирица запрокинутая (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.)	94,0	95,9	95,3	95,5	2,3
Подмаренник цепкий (<i>Galium aparine</i> L.)	98,4	99,8	98,0	99,2	1,4
Горчица полевая (<i>Sinapis arvensis</i> L.)	90,0	87,1	92,0	93,9	2,6
Горец почечуйный (<i>Polygonum persicaria</i> L.)	90,1	91,3	95,7	95,1	2,5
Двудольные, всего (<i>Dicotyledons, total</i>)	91,4	92,8	95,2	95,8	2,6
Однодольные, всего (<i>Monocots, total</i>)	95,4	98,0	97,6	98,8	2,3

Однократное применение гербицидов часто недостаточно эффективно, особенно при высоком уровне засоренности полей. Повторные обработки повышают вероятность уничтожения устойчивых видов и обеспечивают длительную защиту культуры. Применение гербицидов должно учитывать экологические требования и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Необходимо выбирать препараты с низкой токсичностью и избегать накопления остатков в почве и продукции. Оптимальная схема предполагает использование двух-трехкратных обработок в течение вегетационного периода. Схема № 2 была не такая эффективная в сравнении схемы № 3 в подавлении мари белой на 9,4 %, горчицы полевой – на 4,9%, горца почечуйного – на 4,4%. Это связано с тем, что в схеме № 3 применяли 3-х компонентный гербицид бетанальной группы Бицепс Гарант, КЭ (этофумизат 110 г/л + фенмедифам 91 г/л + десмедифам 71 г/л) в норме расхода 1,0 л/га. Присутствие в препарате этофумизата, который проникает в растение сорняка не только через листья, но и через корневую систему, обеспечивает усиленное действие гербицида на сорняки. Но

схема № 2 была более эффективной в подавлении осота полевого, щирицы запрокинутой и подмаренника цепкого, что связано с применением в этой схеме клопиралида в виде препарата Бис 300 (0,3 л/га).

Схема № 4 продемонстрировала сопоставимую общую эффективность с защитой по схеме № 3. Однако существуют некоторые нюансы, которые стоит учитывать. Преимущества схемы № 4 – это подавление мари белой (*Chenopodium album*), эффективность которой составила 97,2%, что выше, чем по схеме № 3 на 0,8%. Это очень важно, поскольку марь белая является экономически значимым видом и индикатором правильного выбора гербицида и сроков его применения. Второй сорняк из этой категории – это щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus*), постоянный спутник сахарной свеклы. Его еще в нашем регионе называют подсвекольник. Эффективность на 0,2% выше, хотя разница незначительная. Горчица полевая (*Sinapis arvensis*): эффективность на 1,9% выше, однако эта разница тоже находится в пределах статистической погрешности ($HCP_{05} = 2,6\%$).

К недостаткам схемы № 4 следует отнести, что такие сорняки как осот полевой, горец почечуйный подавляются хуже, чем по схеме № 3 на 0,2 и 0,6% соответственно. Однако указанные недостатки несущественны, так как различия находятся в пределах нормированной статистической погрешности ($HCP_{05} = 2,9-2,6\%$).

Таким образом, можно заключить, что обе схемы защиты растений обеспечивают схожую эффективность, но схема № 4 имеет преимущества в подавлении ключевых видов сорняков, таких как марь белая, щирица запрокинутая и горчица полевая, то есть двудольных сорняков в посевах двудольной культуры.

Высокая защита сахарной свеклы от сорной растительности по схеме № 4 связана с тем, что в этой схеме два раза применяли метамитрон в виде препаратов Метафол, СК (700 г/л метамитрона) и Пилот, ВСК (700 г/л метамитрона) в одинаковой норме расхода – 1,5 л/га. Гербициды на основе метамитрона имеют широкий спектр действия, помимо двудольных сорняков они искореняют злаковые сорняки. Дополнительным преимуществом метамитрона еще является то, что при его применении по послеуборочному способу он очень хорошо переносится молодыми растениями сахарной свеклы, даже при высоких дозах. В то время как основным недостатком применения противодвудольных гербицидов в посевах сахарной свеклы является их фитотоксичность на растения свеклы. Очень низкая фитотоксичность для свеклы, широкий диапазон сроков применения и высокая надежность действия метамитрона способствуют снижению производственного риска при возделывании сахарной свеклы.

На варианте, где применяли эталонную схему защиты сахарной свеклы, сорняков было больше, гербициды показали недостаточно хорошую эффективность относительно других вариантов. На этом варианте в сравнении с самой эффективной схемой № 4 разница в подавлении осота полевого составила 3,5%, горчицы полевой – 3,9%, горца почечуйного – 5,0%. Наибольшее подавление злаковых сорняков было от применения схемы № 4 с метамитроном (98,8%), несколько хуже – в схемах № 2 и № 3 (98,0 и 97,6%), минимальное - в эталоне (схема № 1) – 95,4%.

Таким образом, в связи с синтезом высокоэффективных селективных гербицидов различного спектра действия, в настоящее время можно уничтожить практически всю гамму сорных растений во время вегетации свеклы, а также целенаправленно уничтожить определенные виды сорняков специфическими гербицидами. В современных агротехнологиях сахарной свеклы оптимальным уровнем защиты ее от сорняков, когда не происходит снижение продуктивности, является порог биологической эффективности применяемых гербицидов не ниже 95%, исходя из этого можно заключить, что схемы защиты №3 и № 4 соответствуют этому критерию как в отношении двудольных, так и однодольных сорняков. В этих схемах набор современных высокоэффективных гербицидов при правильном применении позволяет надежно защитить сахарную свеклу от сорняков при любой степени и уровне засоренности.

Схемы № 1 и № 2 для защиты сахарной свеклы от двудольных сорняков не соответствуют требуемому уровню биологической активности гербицидов, они недостаточно эффективны (91,4% и 92,8%) в современных агротехнологиях культуры. Снижение эффективности возможно связано с возникновением резистентности у двудольных сорняков. Но у этих схем защиты высокая эффективность против однодольных сорняков 93,4% (схема № 1) и 98,0% (схема № 2).

Урожайность – это аккумулирующий показатель любого изучаемого агроприема. В наших исследованиях этот показатель зависел от чистоты посевов, то есть от того как изучаемые гербициды справились с сорняками в посевах свеклы. Без использования гербицидов урожайность составляет 55,9 т/га, что является базовым значением для сравнения (табл.5). Применение эталона (схема №1) повышает урожайность до 60,6 т/га, увеличивая показатель на 8,4% по сравнению с контролем. Схемы № 2 и № 3 обеспечивают дальнейшее повышение урожайности до 62,2 т/га (+11,3%) и 62,7 т/га (+12,2%), соответственно. Схема № 4 демонстрирует максимальный эффект, достигая урожайности 67,6 т/га, что соответствует увеличению на +20,9 % по сравнению с контрольным вариантом и +7,0 т/га или +11,6% к эталонному варианту.

Таблица 5.

**Урожайность, сахаристость корнеплодов и валовый выход сахара
в зависимости от разных схем защиты посевов свеклы от сорняков**

Table 5. Yield, sugar content of the roots, and gross sugar yield as a function of different weed control strategies for beet crops

Показатель	Схема защиты сахарной свеклы					НСР ₀₅
	контроль (без гербицидов)	№ 1 (эталон)	№ 2	№ 3	№ 4	
Урожайность, т/га	55,9	60,6	62,2	62,7	67,6	3,9
Сахаристость, %	16,5	17,0	17,1	17,6	16,9	1,2
Выход сахара, т/га	9,22	10,30	10,64	11,04	11,42	0,61

Схемы защиты № 3 и № 4 обеспечили одинаковую защиту сахарной свеклы от сорняков (95,5% и 95,7% соответственно). Однако в варианте № 4 использование препарата Альбит, ТПС (0,3 л/га) значительно повысило урожайность корнеплодов. Это произошло благодаря активизации роста и улучшению корнеплодообразовательных процессов, а также снижению стресса у растений после обработки гербицидами.

Таким образом, применение защитных мер последовательно увеличивает урожайность корнеплодов в разрезе по вариантам опыта от 4,7 до 11,7 т/га (НСР₀₅ - 3,9 т/га) или на 8,4-20,9%.

Конечный продукт производства сахарной свеклы – это белый кристаллический сахар, количество которого зависит от многих параметров, но в первую очередь от сахаристости корнеплодов. Это ключевой показатель для товаропроизводителей культуры [6,8]. Применение гербицидов в разных сочетаниях и кратностях не оказали отрицательного влияния на накопление сахарозы в корнеплодах. В среднем вариация по сахаристости в опыте была от 16,5 до 17,6%. Наилучшая сахаристость корнеплодов была на вариантах, где свеклу защищали по схеме № 3. Превышение этого показателя над лучшим вариантом по урожайности (схема № 4) составило 0,7%. По всей видимости здесь свою роль сыграл эффект разбавления.

Все исследуемые схемы демонстрируют сахаристость, варьирующуюся от 16,5% (контроль) до 17,6% (схема № 3). Несмотря на небольшие различия, наибольший валовый сбор сахара достигается благодаря повышению урожайности, а не исключительно за счет увеличения содержания сахарозы в корнеплодах. Расчетный валовый выход сахара по вариантам составил от 9,22 до 11,42 т/га, максимальным он был от действия схемы № 4, минимальным – в контроле.

Заключение

1. Подавление двудольных сорняков лучше всего было от применения схем защиты № 3 и № 4. Эффективность составила 97,6 и 95,8%. Марь белую в посевах сахарной свеклы лучше всего уничтожали, когда применяли защиту по схеме №3 (96,4%) и схему № 4 (97,2%). Подмаренник цепкий одинаково хорошо подавлялся всеми изучаемыми схемами, вариация эффективности была от 98,0% (схема №3) до 99,2% (схема №4).

2. Уничтожение однодольных сорняков эффективнее было, когда применяли схемы защиты сахарной свеклы №2, №3 и № 4, но защита сахарной свеклы по схеме № 4 способствовала лучшему очищению посевов от однодольных сорняков относительно эталонного варианта схема № 1 на 3,4%.

3. Наибольшего эффекта по урожайности корнеплодов (67,6 т/га) и количества собираемого сахара (11,42 т/га) удается достичь с использованием четвертой схемы (№ 4), что свидетельствует о её преимуществе перед остальными схемами защиты сахарной свеклы. Эффективность каждой схемы оценивается также по общему количеству производимого сахара: контроль – 9,22 т/га, эталонная схема защиты (№ 1) – 10,30 т/га (+11,7% к контролю), схема № 2 – 10,64 т/га (+15,4%), схема №3 – 11,04 т/га (+19,7%), схема № 4 – 11,42 т/га (+23,8%). Наиболее эффективным способом повышения сбора сахара является система защиты сахарной свеклы, построенная по примеру схемы № 4, в которой применяли препараты на основе метамитрона.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Апасов, И. В., Сергеев, Г. Я., Минакова, О. А., Кислинская, Т. М., Стогниенко, О. И., Гулидова, В. А., & Хрюкина, Е. И. (2017). *Сахарная свекла. Современные технологии возделывания. Практическое руководство по выращиванию*. Воронеж. 62 с.
2. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешённых к применению на территории Российской Федерации. Ч. I. Пестициды. Ч. II. Агрохимикаты (официальное издание). Информация приведена по состоянию на 3 июля 2025 г. (2025). Москва. Получено с <http://www.mcx.gov.ru> (дата обращения: 05.07.2025).
3. Гулидова, В. А. (2022). Технологические качества гибридов сахарной свеклы компании Florimond Desprez, выращенных на выщелоченных черноземах в Липецкой области. *Вестник Алтайского государственного аграрного универси-*

- meta*, 4(210), 20–28. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-210-4-20-28>. EDN: <https://elibrary.ru/ESMGIV>
4. Гулидова, В. А., & Захаров, В. Л. (2024). Продуктивность перспективных гибридов сахарной свеклы в условиях Липецкой области. *Вестник Алтайского ГАУ*, 5(235), 18–25. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-235-5-18-25>. EDN: <https://elibrary.ru/XPXQHU>
 5. Гулидова, В. А. (2022). Технологические качества гибридов сахарной свеклы компании Betaseed, выращиваемых в почвенно-климатических условиях типичной лесостепи ЦЧР. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 15(3), 87–96. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_87-96. EDN: <https://elibrary.ru/GIKKON>
 6. Гулидова, В. А. (2023). Качество корнеплодов и выход сахара при возделывании современных гибридов сахарной свеклы компании Sesvanderhave на полях Липецкой области. *Аграрный научный журнал*, (1), 11–16. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i1pp11-16>. EDN: <https://elibrary.ru/CKCEFE>
 7. Гулидова, В. А. (2022). Сравнительная продуктивность и поражаемость корнеплодов корневыми гнилями лучших иностранных гибридов сахарной свеклы в почвенно-климатических условиях Липецкой области. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, 4(60), 77–84. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-4-77-84>. EDN: <https://elibrary.ru/XDBXZW>
 8. Гулидова, В. А. (2022). Продуктивность гибридов Betaseed в условиях Липецкой области. *Вестник КрасГАУ*, 5(182), 43–50. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-43-50>. EDN: <https://elibrary.ru/UODFMR>
 9. Доспехов, Б. А. (2011). *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования): учебник для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений по агрономическим специальностям* (6-е изд., стер., перепеч. с 5-го изд. 1985). Москва: Альянс. 351 с.
 10. Иванцова, Е. А. (2017). Экологические аспекты фитосанитарной оптимизации агроэкосистем. В *Экологические аспекты использования земель в современных экономических формациях: Материалы Международной научно-практической конференции* (с. 54–61). Волгоград. EDN: <https://elibrary.ru/YOMPCI>
 11. Колупаев, М. В., Львов, А. Г., Нестерова, Л. М., Сукачева, М. С., & Тюмаков, А. Ю. (2019). Сравнительная оценка последствий препаратов Горгон, ВРК, Ланселот, ВДГ и Магнум, ВДГ на горохе посевном (*Pisum sativum*) в вегетационном опыте. *Агрохимия*, (5), 48–55. <https://doi.org/10.1134/S0002188119050065>. EDN: <https://elibrary.ru/HIPLAS>
 12. Коржов, С. И., & Трофимова, Т. И. (2016). *Земледелие Центрального Черноземья*. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. 415 с. ISBN: 978-5-7267-0876-8. EDN: <https://elibrary.ru/WNPBWV>

13. Кочетков, П. П. (2017). Комплексное влияние пестицидного загрязнения на состояние окружающей среды. В *Экология, здоровье и образование в XXI веке. Глобальная интеграция современных исследований и технологий: Материалы III Кавказского экологического форума* (с. 170–174). Грозный. EDN: <https://elibrary.ru/ZSZGLT>
14. Мамсилов, Н. И., & Бондарева, Т. Н. (2017). Надежная защита посевов сахарной свеклы от сорняков в предгорной зоне республики Адыгея. *Новые технологии*, (4), 118–125. EDN: <https://elibrary.ru/YMPNPK>
15. Мерзликин, М. А., Минакова, О. А., & Вилков, В. М. (2021). Комплексная защита сахарной свеклы от сорняков, болезней и вредителей в ЦЧР. *Сахар*, (3), 50–56. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-3-50-56>. EDN: <https://elibrary.ru/OCKMZL>
16. *Методические рекомендации по учету и картированию засоренности посевов.* (1987). Днепропетровск. 70 с.
17. Михайликова, В. В., Стребкова, Н. С., & Пустовалова, Е. А. (2019). Применение пестицидов и их действующих веществ в Российской Федерации. В *Инновационные направления в химизации земледелия и сельскохозяйственного производства: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием* (с. 84–88). Белгород. EDN: <https://elibrary.ru/VUOXHN>
18. Природоохранная защита сахарной свеклы от вредителей, болезней и сорняков с помощью химических средств. (n.d.). Получено с <https://studbooks.net/1137386/agropromyshlennost/vvedenie> (дата обращения: 26.10.2025).
19. Путилина, Л. Н., Дворянkin, Е. А., Апасов, И. В., & Смирнов, М. А. (2017). Свеклосахарный комплекс России: состояние и направление развития. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 79(2), 180–190. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-180-190>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJSGID>
20. Санin, С. С. (2016). Проблемы фитосанитарии России на современном этапе. *Защита и карантин растений*, (4), 3–6. EDN: <https://elibrary.ru/VSYWCH>
21. Цыганкова, Е. В. (2017). Фузариозная желтуха – новое экономически значимое заболевание сахарной свеклы. *Международный студенческий научный вестник*, (1), 33. EDN: <https://elibrary.ru/YISYCD>
22. Ченкин, А. Ф., Захаренко, В. А., Белозерова, Г. С., и др. (1994). *Фитосанитарная диагностика*. Москва: Колос. 323 с.

References

1. Apasov, I. V., Sergeev, G. Ya., Minakova, O. A., Kislinskaya, T. M., Stognienko, O. I., Gulidova, V. A., & Khrjukina, E. I. (2017). *Sugar beet: Modern cultivation technologies. A practical guide for growing*. Voronezh. 62 p.

2. State catalog of pesticides and agrochemicals permitted for use in the Russian Federation. Part I: Pesticides. Part II: Agrochemicals (official publication). Data as of July 3, 2025. (2025). Moscow. Retrieved from <http://www.mcx.gov.ru> (accessed July 5, 2025).
3. Gulidova, V. A. (2022). Technological qualities of sugar beet hybrids by Florimond Desprez grown on leached chernozems in the Lipetsk region. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 4(210), 20–28. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-210-4-20-28>. EDN: <https://elibrary.ru/ESMGIV>
4. Gulidova, V. A., & Zakharov, V. L. (2024). Productivity of promising sugar beet hybrids in the Lipetsk region conditions. *Bulletin of the Altai SAU*, 5(235), 18–25. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-235-5-18-25>. EDN: <https://elibrary.ru/XPXQHU>
5. Gulidova, V. A. (2022). Technological qualities of Betaseed sugar beet hybrids grown in the soil and climatic conditions of the typical forest-steppe of the Central Chernozem Region. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*, 15(3), 87–96. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_87-96. EDN: <https://elibrary.ru/GIKKOH>
6. Gulidova, V. A. (2023). Root quality and sugar yield when cultivating modern sugar beet hybrids by Sesvanderhave in the fields of the Lipetsk region. *Agrarian Scientific Journal*, (1), 11–16. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i1pp11-16>. EDN: <https://elibrary.ru/CKCEFE>
7. Gulidova, V. A. (2022). Comparative productivity and susceptibility of roots to root rot in the best foreign sugar beet hybrids under the soil and climatic conditions of the Lipetsk region. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 4(60), 77–84. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-4-77-84>. EDN: <https://elibrary.ru/XDBXZW>
8. Gulidova, V. A. (2022). Productivity of Betaseed hybrids in the conditions of the Lipetsk region. *Bulletin of KrasGAU*, 5(182), 43–50. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-43-50>. EDN: <https://elibrary.ru/UODFMR>
9. Dospekhov, B. A. (2011). *Field experiment methodology (with fundamentals of statistical processing of research results): A textbook for students of higher agricultural educational institutions in agronomic specialties* (6th ed., stereotyped, reprinted from the 5th ed. of 1985). Moscow: Alliance. 351 p.
10. Ivantsova, E. A. (2017). Environmental aspects of phytosanitary optimization of agroecosystems. In *Environmental aspects of land use in modern economic formations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 54–61). Volgograd. EDN: <https://elibrary.ru/YOMPCI>
11. Kolupaev, M. V., Lvov, A. G., Nesterova, L. M., Sukacheva, M. S., & Tyumakov, A. Yu. (2019). Comparative assessment of the after-effects of Gorgon, VRK, Lancelot, VDG, and Magnum, VDG preparations on common pea (*Pisum sativum*) in a pot experiment. *Agrokhimiya*, (5), 48–55. <https://doi.org/10.1134/S0002188119050065>. EDN: <https://elibrary.ru/HIILAS>

12. Korzhov, S. I., & Trofimova, T. I. (2016). *Agriculture of the Central Chernozem Region*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University. 415 p. ISBN: 978-5-7267-0876-8. EDN: <https://elibrary.ru/WNPBWV>
13. Kochetkov, P. P. (2017). Integrated impact of pesticide pollution on the environment. In *Ecology, health, and education in the 21st century. Global integration of modern research and technologies: Proceedings of the III Caucasian Ecological Forum* (pp. 170–174). Grozny. EDN: <https://elibrary.ru/ZSZGLT>
14. Mamsirov, N. I., & Bondareva, T. N. (2017). Reliable protection of sugar beet crops from weeds in the foothill zone of the Republic of Adygea. *New Technologies*, (4), 118–125. EDN: <https://elibrary.ru/YMPNPK>
15. Merzlikin, M. A., Minakova, O. A., & Vilkov, V. M. (2021). Integrated protection of sugar beet from weeds, diseases, and pests in the Central Chernozem Region. *Sugar*, (3), 50–56. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-3-50-56>. EDN: <https://elibrary.ru/OCKMZL>
16. *Guidelines for the accounting and mapping of crop infestation*. (1987). Dnepropetrovsk. 70 p.
17. Mikhailikova, V. V., Strebkova, N. S., & Pustovalova, E. A. (2019). Application of pesticides and their active ingredients in the Russian Federation. In *Innovative directions in the chemicalization of agriculture and agricultural production: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation* (pp. 84–88). Belgorod. EDN: <https://elibrary.ru/VUOXHN>
18. *Environmental protection of sugar beet from pests, diseases, and weeds using chemical agents*. (n.d.). Retrieved from <https://studbooks.net/1137386/agropromyshlennost/vvedenie> (accessed October 26, 2025).
19. Putilina, L. N., Dvoryankin, E. A., Apasov, I. V., & Smirnov, M. A. (2017). The sugar beet and sugar complex of Russia: Current state and development directions. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 79(2), 180–190. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-180-190>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJSGID>
20. Sanin, S. S. (2016). Problems of phytosanitary control in Russia at the present stage. *Plant Protection and Quarantine*, (4), 3–6. EDN: <https://elibrary.ru/VSYWCH>
21. Tsygankova, E. V. (2017). Fusarium yellows – a new economically significant disease of sugar beet. *International Student Scientific Bulletin*, (1), 33. EDN: <https://elibrary.ru/YISYCD>
22. Chenkin, A. F., Zakharenko, V. A., Belozerova, G. S., et al. (1994). *Phytosanitary diagnostics*. Moscow: Kolos. 323 p.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации (проведение эксперимента, интерпретация результатов, подготовка текста статьи).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article (conducting of the experiment, interpretation of the results, and preparation of the text of the paper).

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Гулидова Валентина Андреевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»

ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

*ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
Guli49@yandex.ru*

Щучка Роман Викторович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»

ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

*ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
Romanelez@yandex.ru*

Захаров Вячеслав Леонидович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»

ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

*ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
zaxarov7979@mail.ru*

Кравченко Владимир Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»

ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

*ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
agrosoil@yandex.ru*

Сотников Борис Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»

ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

*ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
agro.elsu@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Valentina A. Gulidova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products

Yelets State University named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation

Guli49@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7585-0956>

Roman V. Shchuchka, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products

Yelets State University named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation

Romanelez@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1011-5413>

Vyacheslav L. Zakharov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products

Yelets State University named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation

zaxarov7979@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4891-658X>

Vladimir A. Kravchenko, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agrotechnology, Storage and Processing of Agricultural Products

Yelets State University named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation

agrosoil@yandex.ru

Boris A. Sotnikov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products

Yelets State University named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation

agro.elsu@mail.ru

Поступила 25.12.2025

После рецензирования 26.02.2026

Принята 16.03.2026

Received 25.12.2025

Revised 26.02.2026

Accepted 16.03.2026

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1515](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1515)

EDN: JGFUJG

УДК 631.95



Оптимизация технологии возделывания сои с использованием инокулянтов и микроудобрений для снижения гербицидной нагрузки

А.Н. Никольский, А.Г. Вишняков, Д.В. Бочкарев, А.В. Бардин*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,
Саранск, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Применение гербицидов является неотъемлемым элементом интенсивных технологий возделывания сои, однако оно может вызывать гербицидный стресс, приводящий к значительному недобору урожая. В связи с этим актуальным является поиск агроприёмов, позволяющих смягчить негативное действие пестицидов и раскрыть продуктивный потенциал культуры. Настоящее исследование направлено на оценку эффективности предпосевной инокуляции и листовой подкормки борными удобрениями для снижения гербицидного стресса и повышения урожайности сои.

Цель – выявить влияние предпосевной инокуляции семян и листовой подкормки борным удобрением на урожайность и качество зерна сои при снижении гербицидной нагрузки на культуру.

Материалы и методы. Исследование проведено методом полевого трёхфакторного опыта в условиях юга Нечернозёмной зоны. В опыте изучалось влияние сорта, инокулянта и листовых обработок борным удобрением на эффективность образования клубеньков, хозяйственную урожайность и качество зерна сои. Исследование проводилось по фону однократного применения гербицида.

Результаты. Установлено существенное увеличение урожайности сои при проведении предпосевной инокуляции семян препаратом Хайкоут Супер Соя и листовой подкормке борным удобрением (2 л/га) в фазу бутонизации. Применение борных удобрений способствовало увеличению количества и массы клубеньков на растениях. Увеличению урожайности во многом способствовало увеличение количества бобов и зёрен с растения при использовании биопрепарата и микроудобрений. Качество зерна в боль-

шей степени зависело от погодных условий, вместе с тем при увеличении урожайности снижения содержания сырого протеина и жира в семенах сои не было установлено.

Заключение. Применение гербицидов является одним из ключевых элементов технологии возделывания сои, который, помимо борьбы с сорняками, может вызывать стресс у растений сои, снижать продуктивность культуры и экологическую стабильность агроэкосистемы. Установлено, что проведение инокуляции препаратом Хайкоут супер соя и листовая подкормка борным удобрением позволяют увеличить урожайность культуры вне зависимости от сорта при фоновом внесении гербицидом на 0,154–0,512 т/га. Увеличение урожайности происходило в первую очередь за счёт увеличения числа бобов и зёрен на растении. При увеличении урожайности содержание сырого протеина и жиров в зерне сои снизилось, однако это снижение статистически недостоверно.

Ключевые слова: соя; гербициды; инокуляция; борные удобрения; урожайность; сырой протеин; сырой жир

Для цитирования. Никольский, А. Н., Вишняков, А. Г., Бочкарев, Д. В., & Бардин, А. В. (2026). Оптимизация технологии возделывания сои с использованием инокулянтов и микроудобрений для снижения гербицидной нагрузки. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 197–213. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1515>

Optimizing soybean production through inoculation and boron foliar feeding in herbicide-stressed environments

A.N. Nikolskii, A.G. Vishnyakov, D.V. Bochkarev, A.V. Bardin

National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

Abstract

Background. The application of herbicides is an integral part of intensive soybean cultivation technologies; however, it can induce herbicide stress, leading to significant yield loss. In this regard, the search for agricultural practices that can mitigate the negative effects of pesticides and unlock the crop's productive potential is highly relevant. This study aims to evaluate the effectiveness of pre-sowing inoculation and foliar boron fertilization in reducing herbicide-induced stress and increasing soybean yield.

Purpose. To determine the impact of pre-sowing seed inoculation and foliar application of boron fertilizer on soybean yield and grain quality under reduced herbicide stress on the crop.

Material and Methods. The study was conducted using a three-factor field experiment method under the conditions of the southern Non-Chernozem Zone. The experi-

ment studied the influence of variety, inoculant, and foliar treatment with boron fertilizers on nodule formation efficiency, economic yield, and soybean grain quality. The research was carried out against the background of single herbicide application.

Results. A significant increase in soybean yields was observed when pre-sowing inoculation of seeds with the product Highcoat Super Soy and foliar feeding with boron fertilizer (2 l/ha) during the budding phase were applied. The use of boron fertilizer contributed to an increase in the number and mass of nodules on plants. The increase in yield was largely due to an increased number of pods and grains per plant when using the bioproduct and micronutrient. Grain quality depended primarily on weather conditions, but despite the increase in yield, no decrease in crude protein or fat content in soybeans was found.

Conclusions. Herbicide application is one of the key elements in soybean cultivation technology, which, besides controlling weeds, can cause stress in soybean plants, reduce crop productivity, and destabilize agroecosystems. It has been established that performing inoculations with the Highcoat super soy product and foliar applications of boron fertilizers can increase crop yields regardless of the variety, with a background application of herbicides by 0.154–0.512 t/ha. The main reason for the increase in yield is the higher number of beans and grains on the plant. Although there was a reduction in crude protein and fat content as the yield increased, this decline was not statistically significant.

Keywords: soy; herbicides; inoculation; boron fertilizers; yield; crude protein; raw fat

For citation. Nikolskii, A. N., Vishnyakov, A. G., Bochkarev, D. V., & Bardin, A. V. (2026). Optimizing soybean production through inoculation and boron foliar feeding in herbicide-stressed environments. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 197–213. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1515>

Введение

К 2050 году население планеты, согласно прогнозам, вырастет на 30%, достигнув примерно 9,2 миллиарда человек [1; 2]. В связи с увеличением численности населения ожидается рост потребности в продуктах питания на 70% — в частности, в мясе, молоке, продовольственном и фуражном зерне [3]. В ряде регионов повышение урожайности сельскохозяйственных культур возможно благодаря улучшению управления водными ресурсами и почвенными условиями, использованию высокоурожайных сортов растений, удобрений и иных агротехнических приёмов. Однако увеличение потенциала урожайности часто сопровождается повышенным риском распространения сорняков, что ведёт к росту абсолютных потерь урожая и уровня ущерба [4-6].

Контроль над сорняками является значимым аспектом сельскохозяйственного производства и может внести существенный вклад в решение задачи обеспечения продовольствием в будущем [7; 8].

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.), будучи одной из важнейших сельскохозяйственных культур XXI века, служит важным источником белка и растительного масла для питания людей и животных. Она содержит около 40–45% протеина и 18–22% жира, богата витаминами, минералами и обладает сбалансированным набором аминокислот. Благодаря этим характеристикам, сою рекомендуют включать в диету с низким содержанием холестерина [9; 10]. Помимо этого, данная культура улучшает плодородие почвы посредством фиксации атмосферного азота [11; 12], а её масло используется в производстве биодизеля [13].

Оптимизация экономических затрат и выбор наиболее эффективных стратегий борьбы с сорняками в течение вегетационного периода играют ключевую роль в достижении максимальной урожайности. Уровень засорённости сои значительно влияет на продуктивность этой культуры, и если его не контролировать, то это приводит к серьёзным потерям урожая [14]. В мировом производстве сои из-за конкуренции сорняков ежегодно теряется почти 37% потенциальной продукции, что значительно превышает потери от патогенов, вирусов и вредителей [15]. В Индии снижение урожайности сои варьирует от 27% до 84% в зависимости от типа почвы, условий вегетации и степени засорения [16]. Pereira et al. [17] установили, что отсутствие контроля за сорняками привело к потере 90% урожая зерна сои в их исследовании. Сорняки не только снижают урожайность сои вследствие конкуренции за питательные вещества, свет и влагу, но и увеличивают потери при механизированной уборке урожая [18]. Как и у всех других мало конкурентоспособных по отношению к сорнякам культур, для достижения экономически оправданной урожайности в посевах сои необходимо бороться с сорняками на ранних стадиях развития культуры [19; 20]. Сегодня производители всё чаще применяют гербициды из-за больших размеров посевных площадей, нехватки рабочей силы и связанных с ней высоких затрат. Преимущества химической борьбы с сорняками перед другими методами включают высокую производительность, биологическую эффективность и доступность селективных препаратов для сои по относительно невысокой цене [16].

Несмотря на то, что применение гербицидов на полях является эффективным средством борьбы с сорняками, оно также может негативно сказываться на культурных растениях, вызывая повреждения, замедление роста и снижение урожайности [21; 22]. Зачастую токсический эффект от применения гербицидов на посевах сои существенно превышает положительный эффект от снижения конкуренции со стороны сорных растений [23]

Наиболее эффективный контроль сорняков на сое возможен при наличии тщательно разработанной программы, включающей все доступные методы (агротехнические, механические, физические, биологические и химические) и их комбинирование в рамках интегрированной системы борьбы [24]. В этой связи актуальны исследования по определению влияния биопрепаратов и микроэлементов на продукционный потенциал растений сои и снижения негативного влияния гербицидов.

Целью исследования было установление влияния предпосевной инокуляции семян и листовой подкормки борным удобрением на урожайность и качество зерна сои при снижении гербитоксической нагрузки на культуру.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились в условиях республики Мордовия которая входит в лесостепную часть Юга Нечерноземной зоны, на территории филиал ФГБУ «Госсорткомиссия» Мордовская ГСИС (г.о. Саранск, с. Макаровка). Климат юга Нечерноземья умеренно континентальный, характеризуется сравнительно жарким летом, морозной зимой с устойчивым снежным покровом.

Погодные условия 2023 года характеризовались избыточным увлажнением на протяжении всего периода вегетации. Количество осадков составило 569. В течение вегетационного сезона 2024 г было два периода минимального количества осадков во время развития растений сои: первый произошел между концом вегетационной стадии и началом цветения, а второй произошел между концом цветения и началом формирования стручков.

Почва опыта – чернозем выщелоченный, среднесуглинистый, типичная для лесостепной зоны. Почва в пахотном слое характеризуется средним содержанием гумуса (5,6–5,8 %), имела высокую степень насыщенности основаниями – до 85 %. По степени кислотности почва характеризуется как слабокислая. Содержание подвижных форм фосфора по Чирикову – среднее, обменного калия – повышенное.

Опыт был заложен по полной схеме методом рендомизированного размещения расщепленных делянок. Опытный участок имел ширину 90 м и длину 80 м. Сорта сои (Фактор А) были случайным образом распределены по трем блокам (повторениям), каждый из которых имел ширину 18 м и длину 100 м. В опыте изучались сорта Аннушка (А0), Билявка (А1) и Памяти Фадеева (А2). На делянках второго порядка высевали семена без инокулянта (В0) и с инокуляцией препаратом Хайкоут Супер соя (В1). Ино-

куляцию проводили за неделю до посева. На делянках третьего порядка изучалось влияние борных удобрений (Фактор С) в норме 2 л/га. Борные удобрения представляли собой раствор борэтиленамина (150 г/л бора) Удобрения были синтезированы сотрудниками кафедры МГУ им Н.П. Огарева. Удобрения вносили в норме 2 л/га в фазу бутонизации при помощи ручного опрыскивателя. Норма расхода рабочего раствора 200 л/га.

Предшественник в опыте – озимая пшеница. После уборки культуры проводили двукратное дискование на глубину 12-15 см. Перед посевом проводили культивацию на глубину 4-6 см. Посев проводили во 2 декаде мая селекционной сеялкой Sampo с шириной междурядий 15 см. В фазу трех настоящих листьев посеvy сои обрабатывались гербицидом Видблoк плюс (37,5 г/л имазетапир + 25 г/л пропаквизафоп) в дозе 2 л/га. Другие удобрения и пестициды кроме запланированных в опыте не вносились.

Отбор растений для определения эффективности инокуляции проводились в первой декаде августа, когда соя достигла стадии налива стручков (ВВСН 75). В каждом блоке случайным образом отбиралось по 10 растений сои для оценки количества и массы клубеньков. Растения выкапывались вместе с комом земли, и видимые клубеньки отделялись от корневой системы вручную. Остальные клубеньки были удалены с корней путём замачивания в воде. Отбор образцов для определения элементов структуры урожайности сои был проведён во второй декаде сентября в фазу полной спелости. В каждом блоке случайным образом были отобраны растения с 0,25 м² для определения количества стручков и зерен на одном растении, массы 1000 семян. Сбор урожая сои для определения хозяйственной урожайности был проведён с помощью селекционного зерноуборочного комбайна «Неге 125 С» поделаяночно в каждом блоке. После сбора урожая семена сои были высушены при температуре 30 °С, и был проведён анализ их питательной ценности. Содержание сырого жира определяли по ГОСТ 29033-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира», сырого протеина по ГОСТ 10846-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка» на приборе «Кельтран» (ООО ВПК «Сибагро-ПРИБОР», Россия).

Дисперсионный анализ влияния вариантов опыта на элементы структуры урожая проведен при помощи пакетов AgroR и ExpDes языка программирования R методом фиксированных эффектов рендомизированного блочного плана (randomized block design) [25]. Анализ урожайности выполнен методом обобщенной линейной модели с равными весами факторов [26].

Обобщенная линейная модель (GLM) для трехфакторного опыта представлена в следующем виде:

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + b_j + c_k + ab_{ij} + ac_{ik} + bc_{jk} + abc_{ijk} \quad (1)$$

где X_{ij} – значение отдельного признака в опыте, μ – общее среднее (базовое) значение признака, α_i – воздействие уровня i фактора A , b_j – воздействие уровня j фактора B , c_k – воздействие уровня k фактора C , ab_{ij} , ac_{ik} , bc_{jk} , abc_{ijk} – дополнительное воздействие комбинации уровней i и j и k взаимодействия факторов AB, AC, BC и ABC [27].

Значимость различий определяли по критерию Тьюки, $p\text{-value} < 0.05$

Результаты исследований

Инокулянты, содержащие эффективные штаммы *Bradyrhizobium* входящие в состав препарата Хайкоут Супер соя, используются для стимуляции образования клубеньков, биологической фиксации азота и повышения урожайности сои. Интродуцированные штаммы ризобий более конкурентоспособны в образовании клубеньков и азотофиксации, чем популяция местных почвенных бактерий. Они эффективно регулируют процесс клубенькования с достаточно высокой скоростью, или сохраняются в почве с течением времени и специфичны для клубеньковых генотипов отдельных видов бобовых [28; 29]. В наших исследованиях на вариантах без инокуляции клубеньков на растениях сои не обнаружено. В тоже время в фазу формирования бобов на эффективность инокуляции Хайкоут Супер соя оказали влияние изучаемые сорта и обработка растений борным удобрением (рисунок 1А).

Установлено что количество клубеньков во все годы исследований на сорте Аннушка было достоверно выше чем на сорте Памяти Фадеева. В тоже время масса клубеньков с одного растения не зависела от сорта. Это говорит перераспределения ассимилянтов в системе «растение-клубеньки», которое регулируется в зависимости от скорости появления новых симбиотических образований. Применение борных удобрений значимо увеличило количество клубеньков только в 2023 г. (в среднем на 1,8 шт./растение). В менее благоприятных условиях вегетации 2024 г. количество клубеньков значимо не изменялось. Масса клубеньков с растения возрастала при листовой обработке бором в независимости от погодных условий. Так в 2023 г. среднее увеличение составило 1,8 г/растение, в 2024 – 0,64 г/растение.

Погодные условия и варианты опыта повлияли на структурные показатели урожайности сои. В годы проведения исследований установлено существенное изменение количество бобов и зерен с растения в зависимости от сорта. Так в 2023 г., в более благоприятных для развития растений условиях, максимальное количество этих элементов было характерно для сорта

Памяти Фадеева, в 2024 г. – для сорта Аннушка. Масса 1000 семян максимальной за все годы исследований установлена для сорта Памяти Фадеева.

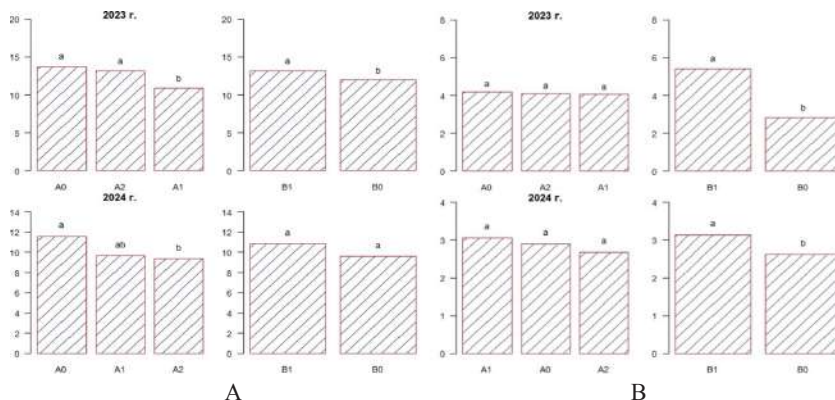


Рис. 1. Влияние сортов, и борного удобрения на количество (А) и массу клубеньков (В) на растениях сои

Fig. 1. Effect of varieties and boron fertilizer on the number (A) and weight (B) of nodules on soybean plants

Применение инокулянта значимо увеличивала основные параметры структуры урожая сои. В 2023 г. в среднем на данном варианте было на 26% больше бобов и 22% семян по сравнению с вариантом без инокуляции. В 2024 году увеличение составило 7 и 11% соответственно. Масса 1000 семян по фактору В существенно различалась только в 2024 г. Применение борных удобрений значимо увеличивало количество бобов во все годы исследований, количество зерен только в 2024 г.

Определение взаимодействия факторов АВ показало, что в 2023 г. достоверное увеличение показателей урожайности было характерно для вариантов Памяти Фадеева×Хайкоут Супер соя, в 2024 году – Аннушка×Хайкоут Супер соя.

Взаимодействие борных удобрений и сорта по годам показало схожую тенденцию. Максимальное количество семян в 2023 г. определено для варианта Памяти Фадеева×Бор (2 л/га), в 2024 г. для варианта Аннушка×Бор (2 л/га). Масса 1000 семян в меньшей степени зависела от взаимодействия факторов, определяясь погодными условиями и особенностями сорта. Также установлены существенные различия при анализе взаимодействия инокулирования и внесения борных удобрений. Так совместное влияние Хайкоут Супер соя × Бор (2 л/га) в 2023 г увеличивало количе-

ство бобов на растении в среднем на 28 % по сравнению с вариантом без удобрений и биопрепаратов, в 2024 г – на 11 %. В отношении количества семян увеличение по годам составило 24 и 18 % соответственно.

Таблица 1.

**Анализ влияния главных эффектов опыта и их взаимодействий
на показатели структуры урожая сои.**

**Table 1. Analysis of the effects of the main experimental treatments
and their interactions on soybean yield components.**

Главные эффекты и их взаимодействия	2023 г			2024 г.		
	Количество бобов, шт./раст.	Количество зерен, шт./раст	Масса 1 000 семян, г	Количество бобов, шт./раст.	Количество зерен, шт./раст	Масса 1 000 семян, г
Фактор А (сорт)						
Аннушка (A_0)	24,7 ^b	35,4 ^b	135,1 ^a	16,1 ^b	31,0 ^b	116,2 ^a
Билявка (A_1)	21,4 ^a	31,5 ^a	145,1 ^b	14,0 ^a	26,7 ^a	129,6 ^b
Памяти Фадеева (A_2)	28,9 ^c	41,9 ^c	150,4 ^b	12,9 ^a	23,6 ^a	132,3 ^b
Фактор В (инокулянт)						
Без инокулянта (B_0)	22,7 ^a	32,7 ^a	141,4	13,8 ^a	25,8 ^a	122,0 ^a
Хайкоут Супер соя (B_1)	27,3 ^b	39,9 ^b	145,7	14,9 ^b	28,4 ^b	130,0 ^b
Фактор С (удобрения)						
Без удобрений (C_0)	22,6 ^a	33,6	132,3	13,0 ^a	24,3 ^a	116,9
Бор (2 л/га) (C_1)	24,7 ^b	35,2	139,7	14,1 ^b	27,1 ^b	121,9
Фактор А × Фактор В						
$A_0 \times B_0$	24,3 ^{bc}	35,5 ^b	132,4 ^a	15,8 ^c	30,6 ^c	112,0 ^a
$A_0 \times B_1$	25,2 ^b	35,2 ^b	137,8 ^{ab}	16,4 ^{bc}	31,5 ^c	120,5 ^{ab}
$A_1 \times B_0$	20,9 ^a	29,9 ^a	143,7 ^{ab}	13,8 ^{ab}	25,4 ^b	125,5 ^b
$A_1 \times B_1$	21,8 ^{ab}	33,1 ^b	146,5 ^{ab}	14,2 ^b	27,9 ^{bc}	133,7 ^c
$A_2 \times B_0$	22,9 ^{ab}	32,5 ^{ab}	148,0 ^{ab}	11,9 ^a	21,4 ^a	128,5 ^b
$A_2 \times B_1$	34,9 ^c	51,2 ^c	152,8 ^b	14,0 ^b	25,9 ^b	136,0 ^c
Фактор А × Фактор С						
$A_0 \times C_0$	23,7 ^{ab}	35,0 ^b	128,2 ^a	15,9 ^{bc}	30,7 ^b	113,8 ^a
$A_0 \times C_1$	25,7 ^{ab}	35,8 ^b	142,1 ^b	16,3 ^{bc}	31,4 ^{bc}	118,7 ^{ab}
$A_1 \times C_0$	20,2 ^a	30,1 ^a	142,1 ^b	13,3 ^{ab}	25,1 ^{ab}	125,8 ^{ab}
$A_1 \times C_1$	22,6 ^{ab}	33,0 ^{ab}	148,1 ^c	14,7 ^b	28,2 ^b	133,3 ^b
$A_2 \times C_0$	27,8 ^{bc}	41,2 ^c	148,7 ^c	12,1 ^a	21,1 ^a	130,5 ^b
$A_2 \times C_1$	30,0 ^c	42,5 ^c	152,1 ^c	13,7 ^{ab}	26,1 ^{ab}	134,0 ^{bc}
Фактор В × Фактор С						
$B_0 \times C_0$	21,0 ^a	31,2 ^a	136,7	13,0 ^a	23,8 ^a	119,3
$B_0 \times C_1$	24,4 ^{ab}	34,2 ^{ab}	146,0	14,7 ^{ab}	27,8 ^b	124,7
$B_1 \times C_0$	26,8 ^b	39,6 ^b	142,6	14,5 ^{ab}	27,5 ^b	127,4
$B_1 \times C_1$	27,8 ^b	40,1 ^b	148,9	15,2 ^b	29,3 ^b	132,7

Трехфакторный анализ (таблица 2) показал, что основные эффекты опыта были значимыми на протяжении исследования.

Таблица 2.

Обобщенная линейная модель влияния сортов, инокулянта и борного удобрения на урожайность сои в 2023-2024 гг. (среднее $\pm$ стандартное отклонение)

Table 2. Generalized linear model of the effects of variety, inoculant, and boron fertilizer on soybean yield in 2023–2024 (mean $\pm$ standard deviation)

Главные эффекты и взаимодействия	2023 г.	2024 г.
Аннушка $\times$ Без инокулянта $\times$ Без удобрения	1,669 $\pm$ 0,129	1,613 $\pm$ 0,066
Биявка	-0,136 $\pm$ 0,182	-0,250 $\pm$ 0,135
Памяти Фадеева	0,229 $\pm$ 0,182	-0,358 $\pm$ 0,135
Хайкоут Супер соя	0,374 $\pm$ 0,182	0,150 $\pm$ 0,135
Бор (2 л/га)	0,357 $\pm$ 0,182	0,188 $\pm$ 0,235
Биявка $\times$ Хайкоут Супер соя	0,221 $\pm$ 0,158	0,207 $\pm$ 0,333
Памяти Фадеева $\times$ Хайкоут Супер соя	-0,016 $\pm$ 0,158	0,143 $\pm$ 0,333
Биявка $\times$ Бор (2 л/га)	0,038 $\pm$ 0,158	0,187 $\pm$ 0,333
Памяти Фадеева $\times$ Бор (2 л/га)	-0,277 $\pm$ 0,158	0,05 $\pm$ 0,333
Хайкоут Супер соя $\times$ Бор (2 л/га)	-0,290 $\pm$ 0,158	0,016 $\pm$ 0,333
Биявка $\times$ Хайкоут Супер соя $\times$ Бор (2 л/га)	-0,183 $\pm$ 0,364	-0,275 $\pm$ 0,471
Памяти Фадеева $\times$ Хайкоут Супер соя $\times$ Бор (2 л/га)	0,256 $\pm$ 0,364	-0,062 $\pm$ 0,471

В то же время влияние сорта различалось в зависимости от условий вегетации. В 2023 г. значимое увеличение урожайности отмечено для сорта Памяти Фадеева. По сравнению с сортом Аннушка увеличение урожайности составило 13 %, Биявка – 15 %. В 2024 г. наиболее продуктивным был сорт Аннушка, прибавка по сравнению с сортом Биявка – 16 %, Памяти Фадеева – 23%. Установлено положительное достоверное влияние применения инокулянта и внесения борного удобрения. Так в 2023 г. использование Хайкоут Супер соя в среднем по сорту Аннушка привело к увеличению урожайности на 0,374 т/га, сорту Биявка – 0,510 т/га, сорта Памяти Фадеева – 0,145 т/га. В 2024 г. инокулянт в меньшей степени повлиял на урожайность культуры по всем изучаемым сортам. Обработка растений борными удобрениями также более эффективной в 2023 г. В менее благоприятном с точки зрения климатических условий 2024 г. применение микроэлемента увеличивало урожайность сорта Аннушка на 0,188 т/га, Биявка на 0,433 т/га, Памяти Фадеева – на 0,538 т/га.

Двусторонние взаимодействия Сорт $\times$ Инокулянт значимыми были лишь для варианта с сортом Биявка. Эффекты 3-стороннего взаимодействия были незначимыми во все годы исследований.

Полученные результаты подтверждают тренды увеличения урожайности сои за счет внедрения новых элементов технологии. Различия урожайности по годам во многом обусловлено условиями вегетационного периода. Большинство исследований подтверждает тенденцию снижения урожайности в условиях недостатка увлажнения в период цветения – формирования стручков [30; 31]. Сорта сои отличаются различной экологической пластичностью, что приводит к резким колебаниям урожайности по годам. Одной из главных задач исследования культуры является определение наиболее устойчивых к климатическим стрессам сортов [32]. *B. Japonicum* используемые в качестве инокулянта сои в значительном количестве экспериментов существенно увеличивало урожайность культуры, особенно на почвах, на которых она ранее не выращивалась [33; 34]. Применение листовых подкормок бором эффективно, в том на почвах, где недостатка в этом элементе не отмечено. Реакция сои на внесение бора чаще всего проявляется в увеличении сохранности цветков тем самым увеличивая количество стручков на растении [35-37].

Содержание сырого протеина в зерне сое изменялось в зависимости от года исследования (рисунок 2А). В среднем содержание в 2023 составило 32 %, в 2024 г. – 29 %.

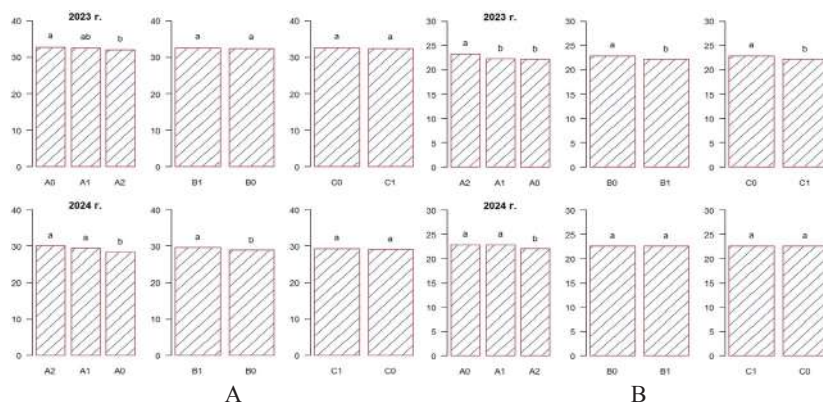


Рис. 2. Влияние сортов, инокулянта и борного удобрения на содержание сырого протеина (А) и сырого жира (В) в зерне сои, %.

Fig. 2. Effect of variety, inoculant, and boron fertilizer on the crude protein (A) and crude fat (B) content in soybeans, %.

Главные эффекты факторов в отдельные годы исследований также значительно влияли на данный показатель. На содержание сырого протеина в изучае-

мых в опыте сортов влияла урожайность культуры. Так в 2024 г. достоверное снижение этого показателя установлено для сорта памяти Фадеева, в 2024 г. для сортов Аннушка и Билявка. Хайкоут Супер соя достоверно увеличивал содержание сырого протеина только в 2024 г., в среднем увеличение составило 1,7 %. Применение бора не оказывало влияния на данный показатель. Содержание сырого жира было стабильным в годы исследований. В среднем по опыту его содержание составило в 2023 г – 23%, в 2024 г – 22 %. Различия по сортам находились в взаимосвязи с содержанием сырого протеина, достоверно увеличиваясь при снижении накопления последнего. Применение инокулянта и борного удобрения значимо снижали содержание сырого жира лишь в 2023 г. – на 1,8 и 1,6 % соответственно.

Заключение

Применение гербицидов в системе возделывания сои играет ключевую роль в борьбе с сорной растительностью, но одновременно может оказывать стрессовое воздействие на растения, приводя к снижению их продуктивности и экологической устойчивости агроценоза. Исследования показали, что использование инокулянта Хайкоут супер соя совместно с листовой подкормкой борными удобрениями способствует значительному повышению урожайности культуры, независимо от сортовых особенностей. Увеличение урожая составляет 0,154–0,512 т/га и достигается преимущественно за счет повышения количества плодов и семян на растении. Несмотря на то, что при повышении урожайности наблюдалось некоторое уменьшение содержания сырого протеина и липидов в семенах сои, данные изменения оказались статистически несущественными.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта проведения научных исследований № 123033000029-7 «Разработка подходов получения отечественных аналогов кормовых добавок и удобрений на основе микроэлементов и совершенствование технологии их применения в животноводстве и растениеводстве».

Список литературы / References

1. Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 243–255. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>. EDN: <https://elibrary.ru/YEWHKY>

2. Firoozzare, A., Boccia, F., Yousefian, N., Ghazanfari, S., & Pakook, S. (2024). Understanding the role of awareness and trust in consumer purchase decisions for healthy food and products. *Food Quality and Preference*, 121, 105275. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105275>. EDN: <https://elibrary.ru/DQKSGN>
3. Viana, C. M., Freire, D., Abrantes, P., Rocha, J., & Pereira, P. (2022). Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 806, 150718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150718>. EDN: <https://elibrary.ru/DGGXWU>
4. Oerke, E. C., & Dehne, H. W. (2004). Safeguarding production-losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection*, 23(4), 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.001>
5. Gharde, Y., Singh, P. K., Dubey, R. P., & Gupta, P. K. (2018). Assessment of yield and economic losses in agriculture due to weeds in India. *Crop Protection*, 107, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.01.007>
6. Scavo, A., & Mauromicale, G. (2020). Integrated weed management in herbaceous field crops. *Agronomy*, 10(4), 466. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040466>. EDN: <https://elibrary.ru/TALJUC>
7. Westwood, J. H., Charudattan, R., Duke, S. O., Fennimore, S. A., Marrone, P., Slaughter, D. C., Swanton, C. J., & Zollinger, R. (2018). Weed management in 2050: Perspectives on the future of weed science. *Weed Science*, 66(3), 275–285. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.78>
8. Xiang, M., Qu, M., Wang, G., Ma, Z., Lu, T., Sun, Y., & Ma, X. (2024). Crop detection technologies, mechanical weeding executive parts and working performance of intelligent mechanical weeding: a review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1361002. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1361002>. EDN: <https://elibrary.ru/MZFRKG>
9. Adamič, S., & Leskovšek, R. (2021). Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth, yield, and nodulation in the early transition period from conventional tillage to conservation and no-tillage systems. *Agronomy*, 11(12), 2477. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122477>. EDN: <https://elibrary.ru/IEVZNP>
10. Kraska, P., Andruszczak, S., Kwiecińska-Poppe, E., & Pałys, E. (2022). Wpływ podpowierzchniowego wnoszenia nawozu mineralnego na plon i jakość nasion soi w warunkach uprawy bezplużnej. *Agronomy Science*, 77(4), 109–131. <https://doi.org/10.3390/agronomy7020042>
11. Zerihun, A., & Haile, D. (2017). The effect of organic and inorganic fertilizers on the yield of two contrasting soybean varieties and residual nutrient effects on a subsequent finger millet crop. *Agronomy*, 7(2), 42. <https://doi.org/10.3390/agronomy7020042>
12. Iannetta, P. P. M., Young, M., Bachinger, J., Bergkvist, G., Doltra, J., Lopez-Bellido, R. J., Monti, M., Pappa, V. A., Reckling, M., Topp, C. F. E., Walker, R. L., Rees, R. M., Watson, C. A., James, E. K., Squire, G. R., & Begg, G. S. (2016). A comparative nitro-

- gen balance and productivity analysis of legume and non-legume supported cropping systems: the potential role of biological nitrogen fixation. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1700. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01700>. EDN: <https://elibrary.ru/XZIHPL>
13. Barreiros, T., Young, A., Cavalcante, R., & Queiroz, E. (2020). Impact of biodiesel production on a soybean biorefinery. *Renewable Energy*, 159, 1066–1083. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.064>. EDN: <https://elibrary.ru/PPTHMV>
 14. Heinrichs, E. A., & Muniappan, R. (2019). Integrated pest management for tropical crops: soyabeans. *CABI Reviews*, 2018, 1–44. <https://doi.org/10.1079/PAVSN-NR201813055>. EDN: <https://elibrary.ru/FBYIUO>
 15. Meseldžija, M., Rajković, M., Dudić, M., Vranešević, M., Bezdan, A., Jurišić, A., & Ljevnaić-Mašić, B. (2020). Economic feasibility of chemical weed control in soybean production in Serbia. *Agronomy*, 10(2), 291. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020291>. EDN: <https://elibrary.ru/ZLIYYL>
 16. Peer, F. A., Hassan, B., Lone, B. A., Qayoom, S., Kumar, R., & Singh, P. K. (2013). Effect of weed control methods on yield and yield attributes of soybean. *African Journal of Agricultural Research*, 8(48), 6135–6141. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1172>
 17. Pereira, F. A. R., Silva, A. A., Ferreira, L. R., & Jakelaitis, A. (2015). Periods of competition between weeds and soybean crop in Cerrado. *African Journal of Agricultural Research*, 10(37), 3644–3649. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9806>
 18. Vivian, R., Reis, A., Kálnay, P. A., Vargas, L., & Echer, F. R. (2013). Weed management in soybean-issues and practices. In *Soybean - Pest Resistance*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/54595>
 19. Datta, A., Ullah, H., Tursun, N., Pornprom, T., Knezevic, S. Z., & Chauhan, B. S. (2017). Managing weeds using crop competition in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Crop Protection*, 95, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.09.005>
 20. Caldas, J. V. S., Silva, A. G. D., Braz, G. B. P., Procópio, S. D. O., Silva, A. A., & Costa, A. G. (2023). Weed competition on soybean varieties from different relative maturity groups. *Agriculture*, 13(3), 725. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030725>. EDN: <https://elibrary.ru/XYDPJS>
 21. Gage, K. L., Krausz, R. F., & Walters, S. A. (2019). Emerging challenges for weed management in herbicide-resistant crops. *Agriculture*, 9(8), 180. <https://doi.org/10.3390/agriculture9080180>
 22. Fartyal, D., Agarwal, A., James, D., Borphukan, B., Ram, B., Sheri, V., Agrawal, P. K., & Achary, V. M. M. (2018). Developing dual herbicide tolerant transgenic rice plants for sustainable weed management. *Scientific Reports*, 8(1), 11598. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29554-9>. EDN: <https://elibrary.ru/APHEAO>
 23. Kelley, K. B., Wax, L. M., Hager, A. G., & Riechers, D. E. (2005). Soybean response to plant growth regulator herbicides is affected by other postemergence herbicides. *Weed Science*, 53(1), 101–112. <https://doi.org/10.1614/WS-04-078R>

24. Morsy, A. S. M., & Tantawy, M. M. (2018). Impact of plant spacing and weed control treatments on yield, quality of soybean (*Glycine Max L.*) and associated weeds characters under Middle Egypt conditions. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 49(1), 27–46. <https://doi.org/10.21608/ajas.2018.8086>
25. Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P., & Nogueira, D. A. (2014). ExpDes: An R package for ANOVA and experimental designs. *Applied Mathematics*, 5(19), 2952–2958. <https://doi.org/10.4236/am.2014.519280>
26. Dunn, P. K., & Smyth, G. K. (2018). *Generalized linear models with examples in R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0118-7>
27. Yee, T. W., & Mitchell, N. D. (1991). Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science*, 2(5), 587–602. <https://doi.org/10.2307/3236170>
28. Laranjo, M., Alexandre, A., & Oliveira, S. (2014). Legume growth-promoting rhizobia: An overview on the Mesorhizobium genus. *Microbiological Research*, 169(1), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.012>. EDN: <https://elibrary.ru/SSNSDJ>
29. Akley, E. K., Rice, C. W., Ahiabor, B. D., & Prasad, P. V. (2023). Bradyrhizobium inoculants impact on promiscuous nodulating soybeans cultivars in Ghana's farming systems. *Agronomy Journal*, 115(3), 1097–1113. <https://doi.org/10.1002/agj2.21273>. EDN: <https://elibrary.ru/DAAWAN>
30. Staniak, M., Szpunar-Krok, E., Wilczewski, E., Kocira, A., & Podleśny, J. (2024). The function of macronutrients in helping soybeans to overcome the negative effects of drought stress. *Agronomy*, 14(8), 1744. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081744>. EDN: <https://elibrary.ru/TKIFOH>
31. Reis, L., Santos e Silva, C. M., Bezerra, B., Mutti, P., Spyrides, M., & Silva, P. (2020). Influence of climate variability on soybean yield in Matopiba, Brazil. *Atmosphere*, 11(10), 1130. <https://doi.org/10.3390/atmos11101130>. EDN: <https://elibrary.ru/VZVRVY>
32. Sobko, O., Stahl, A., Hahn, V., Zikeli, S., Claupein, W., & Gruber, S. (2020). Environmental effects on soybean (*Glycine max (L.) Merr*) production in central and South Germany. *Agronomy*, 10(12), 1847. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121847>. EDN: <https://elibrary.ru/EHVAGH>
33. Galeriani, T. M., Neves, G. O., Santos Ferreira, J. H., Oliveira, R. N., Oliveira, S. L., Calonego, J. C., & Crusciol, C. A. C. (2022). Calcium and boron fertilization improves soybean photosynthetic efficiency and grain yield. *Plants*, 11(21), 2937. <https://doi.org/10.3390/plants11212937>. EDN: <https://elibrary.ru/OINPVA>
34. Libório, I. F., Campos, C. N. S., Cordeiro Santana, D., Oliveira, I. C. D., de Oliveira, J. L., Teixeira, I. R., & Silva, J. A. G. D. (2023). Boron fertilization improves the agronomic performance of soybean genotypes in the Brazilian Cerrado. *Agriculture*, 14(1), 27. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010027>. EDN: <https://elibrary.ru/TJUTHS>
35. Dias da Silva, R. C., Soares da Silva Junior, G., Pelá, A., Quintao Lana, R. M., & Mageste da Silva, J. G. (2020). Doses, methods and times of application of boron in

- soybean under field conditions. *Bioscience Journal*, 36(6). <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n6a2020-48015>. EDN: <https://elibrary.ru/YWAAIR>
36. Savala, C. E. N., Wiredu, A. N., Okoth, J. O., & Kyei-Boahen, S. (2021). Inoculant, nitrogen and phosphorus improves photosynthesis and water-use efficiency in soybean production. *The Journal of Agricultural Science*, 159(5–6), 349–362. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000617>. EDN: <https://elibrary.ru/YCSZSG>
37. Buenor, A. B., Kabiru, M. R., Bechtaoui, N., Jibrin, J. M., Mohammed, A. M., & Dorda, H. (2022). Grain legume yield responses to rhizobia inoculants and phosphorus supplementation under Ghana soils: A meta-synthesis. *Frontiers in Plant Science*, 13, 877433. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.877433>. EDN: <https://elibrary.ru/OKCGYK>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Никольский Александр Николаевич, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник кафедры агрономии и ландшафтной архитектуры Национальный исследовательский Мордовский государственный университет ул. Большевистская, 68, г. Саранск, 430005, Российская Федерация alnik1986@gmail.com

Вишняков Александр Геннадьевич, лаборант-исследователь кафедры агрономии и ландшафтной архитектуры Национальный исследовательский Мордовский государственный университет ул. Большевистская, 68, г. Саранск, 430005, Российская Федерация kafedra_paz@agro.mrsu.ru

Бочкарев Дмитрий Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук профессор кафедры агрономии и ландшафтной архитектуры Национальный исследовательский Мордовский государственный университет ул. Большевистская, 68, г. Саранск, 430005, Российская Федерация bochkarevdy@yandex.ru

Бардин Александр Вадимович, аспирант кафедры агрономии и ландшафтной архитектуры

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
ул. Большевистская, 68, г. Саранск, 430005, Российская Федерация
kafedra_paz@agro.mrsu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr N. Nikolskii, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher at the Department of Agronomy and Landscape Architecture
*National Research Mordovia State University
68, Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005, Russian Federation
alnik1986@gmail.com
SPIN-code: 4627-8884
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3306-7792>*

Aleksandr G. Vishnyakov, Research Assistant at the Department of Agronomy and Landscape Architecture
*National Research Mordovia State University
68, Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005, Russian Federation
kafedra_paz@agro.mrsu.ru
SPIN-code: 8145-4035
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2841-4853>*

Dmitrii V. Bochkarev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Department of Agronomy and Landscape Architecture
*National Research Mordovia State University
68, Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005, Russian Federation
bochkarevdy@yandex.ru
SPIN-code: 2484-0839
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9165-3634>*

Aleksandr V. Bardin, post-graduate student at the Department of Agronomy and Landscape Architecture
*National Research Mordovia State University
68, Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005, Russian Federation
kafedra_paz@agro.mrsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8190-3718>*

Поступила 28.11.2025

После рецензирования 26.02.2026

Принята 16.03.2026

Received 28.11.2025

Revised 26.02.2026

Accepted 16.03.2026

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1598](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1598)

EDN: JJNLGI

УДК 579.2:633.1:633.31:631.8



Активность агрономически ценных эколого-трофических групп почвенной микробиты под воздействием природных и агрогенных факторов

Н.Н. Шулико, А.Ю. Тимохин, А.А. Киселёва,
Е.В. Тукмачева, М.С. Шаповал

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Омский аграрный научный центр», Омск,
Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Исследования проводили на базе длительных (с 1978 г.) стационарных опытов лаборатории полевого кормопроизводства ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» в восьмипольном зернотравяном севообороте с твердой пшеницей, ячменем яровым и люцерной. Влияние минеральных удобрений на состав и количество почвенных микроорганизмов остаётся дискуссионным. Это обуславливает необходимость локальных исследований в различных почвенно-климатических зонах.

Цель – определить изменение микробиологических и агрохимических свойств почвы стационарного опыта при внесении азотных и фосфорных минеральных удобрений, определить урожайность культур, возделываемых в условиях Омского Прииртышья.

Материалы и методы. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: культура севооборота (фактор А) – ячмень (*Hordeum* L.) сорта Омский 100, твёрдая пшеница (*Triticum durum*) сорта Омский лазурит, люцерна (*Medicago sativa*) сортов Алексис и Флора 6; удобрения (фактор В) – N_0P_0 (без удобрений, контроль), N_{60} , P_{60} , $N_{60}P_{60}$. Данная система позволяет смоделировать различные условия азотно-фосфорного питания, по сравнению с контролем (без удобрений). Азотные и фосфорные удобрения вносили в соответствующих вариантах до посева сеялкой СЗ-3,6. Размещение делянок систематическое. Площадь элементарных

делянок 360 м² (18х20). Повторность – трёхкратная. Учет численности микроорганизмов проводили на селективных питательных средах согласно общепринятым методикам. Азот нитратов определяли по Грандваль-Ляжу с дисульфитно-феноловой кислотой. Статистическую обработку полученных результатов осуществляли в программах Microsoft Excel, Statistica 10.0. Долю влияния факторов оценивали при $p \leq 0,05$ согласно дисперсионному анализу.

Результаты. По результатам исследований установлено, что на фоне внесения удобрений под сельскохозяйственные культуры увеличивается численность общей почвенной биоты, в большей степени на твердой пшенице (39% к контролю). Под влиянием азотно-фосфорных удобрений ($N_{60} P_{60}$) в почве под посевом твердой пшеницы отмечен рост бактерий аммонификаторов на 26%, применение P_{60} активировало тестируемую группу на 22% к контролю на люцерне сорта Флора 6. Стимуляция амилалитических микроорганизмов отмечается на фосфорном фоне под ячменем (12%). Максимальные показатели роста изучаемых бактерий зафиксированы при комплексном внесении удобрений под твердую пшеницу и люцерну сорта Флора 6, составляя 59 и 31% соответственно в сравнении с контрольным вариантом. Под воздействием минеральных удобрений наблюдается усиление иммобилизационных процессов, в наибольшей степени под ячменем и пшеницей на фоне N_{60} (коэффициент иммобилизации – 2,1-1,8), у люцерны сорта Алексис при внесении $P_{60(1,3)}$. Коэффициент трансформации органического вещества почвы выше на азотном фоне под посевом ячменя и пшеницы, составляя 84,8-85,1. В течение периода вегетации содержание азота нитратов в почве варьировало от очень низкого до высокого, увеличиваясь при комплексном применении минеральных удобрений на твердой пшенице до 20,2-27,1 мг/кг. Максимальная прибавка урожайности получена при применении фосфорных удобрений, основное внесение P_{60} обеспечивало прибавку 1,30 т/га зерна ячменя и 1,11 т/га зерна твердой пшеницы, тогда как применение подкормок фосфорсодержащим удобрением в период возобновления вегетации люцерны повышало урожайность на 0,29-0,39 т/га сухого вещества или 3,12-3,51 т/га зеленой массы. Между численностью микромицетов и урожайностью ячменя установлена корреляционная зависимость сильной степени ($r=0,77$).

Ключевые слова: почвенная микробиота; минеральные удобрения; питательный режим; трансформация органического вещества почвы; урожайность

Для цитирования. Шулико, Н. Н., Тимохин, А. Ю., Киселёва, А. А., Тукмачева, Е. В., & Шаповал, М. С. (2026). Активность агрономически ценных эколого-трофических групп почвенной микробиоты под воздействием природных и агрогенных факторов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 214–232. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1598>

Activity of agronomically valuable ecological-trophic groups of soil microbiota under the influence of natural and agrogenic factors

N.N. Shuliko, A.Y. Timokhin, A.A. Kiseleva,
E.V. Tukmacheva, M.S. Shapoval

Omsk Agrarian Scientific Center, Omsk, Russian Federation

Abstract

Background. The research was carried out on the basis of long-term (since 1978) stationary experiments of the field feed production laboratory of the Omsk Agricultural Research Center in an eight-field grain and grass crop rotation with durum wheat, spring barley and alfalfa. The effect of mineral fertilizers on the composition and quantity of soil microorganisms remains controversial. This necessitates local research in various soil and climatic zones.

The **purpose** is to determine the change in the microbiological and agrochemical properties of the soil of a stationary experiment with prolonged agrogenic exposure, to determine the yield of crops cultivated in the conditions of the Omsk Irtysh region.

Materials and methods. The experimental scheme involved the study of the following options: crop rotation crop (factor A) – barley (*Hordeum* L.) varieties Omsk 100, durum wheat (*Triticum durum*) varieties Omsk lapis lazuli, alfalfa (*Medicago sativa*) varieties Alexis and Flora 6; fertilizers (factor B) – N_0P_0 (without fertilizers, control), N_{60} , P_{60} , $N_{60}P_{60}$. This system allows you to simulate different conditions of nitrogen-phosphorus nutrition, compared with the control (without fertilizers). Nitrogen and phosphorus fertilizers were applied in the appropriate variants before sowing with a seed drill SZ-3,6. The placement of plots is systematic. The area of the elementary plots is 360 m² (18x20). The repetition is threefold. The number of microorganisms was recorded on selective nutrient media according to generally accepted methods. The nitrogen of the nitrates was determined by Grandvalge with disulfophenolic acid. Statistical processing of the obtained results was carried out in the programs Microsoft Excel, Statistica 10.0. The proportion of influence of factors was estimated at $p < 0.05$ according to the analysis of variance.

Results. The results showed that the application of fertilizers to agricultural crops increases the abundance of total soil biota, especially in durum wheat (39% of the control). Under the influence of nitrogen-phosphorus fertilizers ($N_{60}P_{60}$), a 26% increase in ammonifying bacteria was observed in the soil under durum wheat; the use of P_{60} activated the test group by 22% compared to the control on the Flora 6 alfalfa variety. Stimulation of amylolytic microorganisms was noted against a phosphorus background

under barley (12%). The maximum growth rates of the studied bacteria were recorded with complex application of fertilizers under durum wheat and alfalfa of the Flora 6 variety, amounting to 59 and 31%, respectively, compared to the control variant. Under the influence of mineral fertilizers, an increase in immobilization processes is observed, to the greatest extent under barley and wheat against a background of N_{60} (immobilization coefficient of 2.1-1.8), in alfalfa of the Alexis variety with the application of P_{60} (1.3). The soil organic matter transformation coefficient was higher under nitrogen conditions for barley and wheat, reaching 84.8-85.1. During the growing season, nitrate nitrogen content in the soil varied from very low to high, increasing to 20.2-27.1 mg/kg with the combined use of mineral fertilizers for durum wheat. The maximum increase in yield was obtained with the use of phosphorous fertilizers, the main application of P_{60} provided an increase of 1.30 t/ha of barley grain and 1.11 t/ha of durum wheat grain, while the use of top dressing with phosphorus-containing fertilizer during the resumption of alfalfa vegetation increased yields by 0.29-0.39 t/ha of dry matter or 3.12-3.51 t/ha of green mass. A strong correlation ($r = 0.77$) was established between the number of micromycetes and barley yield.

Keywords: soil microbiota; mineral fertilizers; nutrient regime; soil organic matter transformation; yield

For citation. Shuliko, N. N., Timokhin, A. Y., Kiseleva, A. A., Tukmacheva, E. V., & Shapoval, M. S. (2026). Activity of agronomically valuable ecological-trophic groups of soil microbiota under the influence of natural and agrogenic factors. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 214–232. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1598>

Введение

В условиях интенсификации сельского хозяйства крайне важно рационально использовать, сохранять и улучшать земельные ресурсы. Главным образом это актуально при внедрении таких технологий, как орошение, применение химических средств и удобрений [7; 15].

Почва представляет собой ключевой ресурс для жизнедеятельности микроорганизмов, обеспечивая их энергией и необходимыми веществами. Микробиологические параметры почвы выступают чувствительным индикатором её качества, что делает их незаменимым инструментом для оценки плодородия [14]. В связи с этим изучение микробиоты почвы привлекает всё большее внимание исследователей [6; 8; 9].

Активность почвенных микроорганизмов определяется комплексом внешних факторов, среди которых особое место занимают минеральные удобрения. Научные данные по этому вопросу неоднозначны: ряд исследо-

ваний демонстрирует, что длительное использование удобрений способно существенно повысить численность бактерий, грибов и актиномицетов [20]. Аналогичные закономерности выявлены Ли Куаньином и соавторами: однократное внесение минеральных удобрений приводит к существенному увеличению численности бактерий, грибов и актиномицетов и доминированию бактериального сообщества в структуре почвенного микробиома [17].

Противоположные результаты показывают, что при таком подходе растёт количество бактерий, но снижается численность микроскопических грибов [18]. Некоторые работы вовсе не обнаруживают значимого воздействия удобрений на структуру микробных сообществ [19].

Другими исследованиями установлено, что любые варианты удобрения (в сравнении с контрольным вариантом без внесения удобрений) способствуют росту микробной популяции. Максимально выраженный эффект наблюдался при комбинированном применении навоза, минеральных удобрений и сидерата – в этом случае численность микроорганизмов достоверно превышала контрольные значения [16].

Таким образом, влияние минеральных удобрений на состав и количество почвенных микроорганизмов остаётся дискуссионным. Это обуславливает необходимость локальных исследований в различных почвенно-климатических зонах.

Целью исследований являлось выявление изменения микробиологических и агрохимических свойств почвы стационарного опыта при внесении азотных и фосфорных минеральных удобрений, определить урожайность культур, возделываемых в условиях Омского Прииртышья.

Материалы и методы

Исследования проводили на базе длительного (с 1978 г.) стационарного опыта в восьмипольном севообороте в ФГБНУ «Омский АНЦ» (Омская область, Омский район) в условиях лесостепи Омского Прииртышья в 2024-2025 гг.

Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: культура севооборота (фактор А) – ячмень (*Hordeum* L.) сорта Омский 100, твёрдая пшеница (*Triticum durum*) сорта Омский лазурит, люцерна (*Medicago sativa*) сортов Алексис и Флора 6; удобрения (фактор В) – N_0P_0 (без удобрений, контроль), N_{60} , P_{60} , $N_{60}P_{60}$. Данная система позволяет смоделировать различные условия азотно-фосфорного питания, по сравнению с контролем (без удобрений). Азотные и фосфорные удобрения вносили в соот-

ветствующих вариантах до посева сеялкой СЗ-3,6. Размещение делянок систематическое. Площадь элементарных делянок 360 м² (18х20). Повторность – трёхкратная.

Почва – лугово-черноземная, среднемощная, тяжелосуглинистая с содержанием гумуса в слое 0-0,4 м – 5,9-6,4 %, мощность гумусового горизонта «А» – 0,45 м. Реакция почвенной среды в пахотном слое нейтральная – pH 7,0-7,2. Содержание нитратного азота в слое 0-0,4 м среднее – 9,6-12,2 мг/кг, подвижного фосфора на контроле в слое 0-0,2 м среднее (по Чирикову) – до 100 мг/кг, обменного калия в слое 0-0,2 м очень высокое – более 180 мг/кг почвы. Глубина залегания грунтовых вод – 3,5 м [14].

Учет численности микроорганизмов проводили на селективных питательных средах согласно общепринятым методикам [10]. Для определения влияния минеральных удобрений на структуру микробного сообщества дополнительно были рассчитаны следующие показатели: коэффициент минерализации азота, отражающий соотношение бактерий, минерализующих азот, и бактерий-аммонификаторов, $K_{мин} = [КАА]/[МПА]$; коэффициент иммобилизации азота, отражающий соотношение бактерий-аммонификаторов и бактерий, минерализующих азот $K_{иммоб} = [МПА]/[КАА]$; коэффициент олиготрофности – соотношение микроорганизмов, растущих на голодном и мясо-пептонном агаре $Колиг = [ГА]/[МПА]$. Азот нитратов определяли по Грандваль-Ляжу с дисульфопеноловой кислотой [1].

Статистическую обработку полученных результатов осуществляли в программах Microsoft Excel, Statistica 10.0. Долю влияния факторов оценивали при $p \leq 0,05$ согласно дисперсионному анализу.

Результаты и обсуждение

Почвенная микробиота представляет собой динамичную и разнообразную экосистему, которая участвует в важнейших биогеохимических процессах и играет огромную роль в поддержании биологического равновесия [13].

Биоразнообразие почвенных микроорганизмов в стационарном опыте варьировало в зависимости от метеоусловий, варианта опыта, изучаемой культуры и внесения минеральных удобрений.

Под влиянием азотно-фосфорных удобрений ($N_{60} P_{60}$) в почве под посевом твердой пшеницы отмечается рост бактерий аммонификаторов на 26%, применение P_{60} активировало тестируемую группу на 22% к контролю на люцерне сорта Флора 6. Стимуляция амилалитических микроорганизмов отмечается на фосфорном фоне под ячменем (12%). Максимальные показа-

тели роста изучаемых бактерий зафиксированы при комплексном внесении удобрений под твердую пшеницу и люцерну сорта Флора 6, составляя 59 и 31% соответственно в сравнении с контрольным вариантом (таблица 1).

Таблица 1.

**Численность микроорганизмов лугово-черноземной почвы
под посевом сельскохозяйственных культур, КОЕ/г (n=6)**

**Table 1. Microorganism population in meadow-chernozem soil under agricultural crops,
CFU/g (n=6)**

Вариант	Ячмень				Твердая пшеница				Люцерна				НСР ₀₅ ^{A*} / доля влияния фактора	НСР ₀₅ ^B / доля влияния фактора	НСР ₀₅ ^{AB} / доля влияния фактора
									сорт Алексис		сорт Флора 6				
	Контроль	N ₆₀	P ₆₀	N ₆₀ P ₆₀	Контроль	N ₆₀	P ₆₀	N ₆₀ P ₆₀	Контроль	P ₆₀	Контроль	P ₆₀			
Сапротрофные бактерии на МПА, млн	28,1	27,5	23,9	26,8	24,0	29,9	23,7	30,3	27,2	29,5	26,2	32,1	5,0/ 51,0	3,6/ 8,8	7,1/ 40,5
Амилолитические микроорганизмы на КАА, млн	16,8	13,2	18,9	16,0	16,5	16,2	21,5	26,3	27,9	23,2	24,2	31,8	8,8/ 64,9	6,3/ 16,5	12,5/ 18,7
Олиготрофные микроорганизмы, млн	29,4	24,8	30,5	32,6	24,2	31,8	22,2	37,2	31,5	32,0	30,2	30,1	6,4/ 96,7	4,5/ 0,1	9,1/ 3,2
Микромицеты, тыс.	65,6	64,2	78,9	62,9	33,2	42,5	36,4	30,9	44,6	26,3	44,6	38,2	21,4*/ 86,4	15,1/ 1,1	30,2/ 12,5

Примечание: здесь и далее, N₆₀, P₆₀, N₆₀P₆₀ - вносимые под культуры дозы удобрений; *НСР₀₅ - достоверно при 0,05 уровне значимости; НСР₀₅^A - культура, НСР₀₅^B - удобрение, НСР₀₅^{AB} - взаимодействие факторов.

Олиготрофные почвенные микроорганизмы способствуют разложению органики, что приводит к высвобождению минеральных элементов питания. В наших исследованиях, на фоне внесения минеральных удобрений N₆₀P₆₀ под зерновые культуры, отмечается рост олиготрофов на 11-54% по отношению к неудобренному варианту опыта. Это связано с тем, что удобрения меняют условия обитания микроорганизмов и их сообщество быстро реагирует на изменения в среде обитания.

Отдельные виды грибов обладают способностью к биодegradации остаточных количеств пестицидов и иных ксенобиотиков в почве. Данные микроорганизмы играют существенную роль в процессах иммобилизации и сохранения питательных веществ, предотвращают их потери из ризосферы [12].

В условиях влажного вегетационного периода отмечено активное развитие микромицетов. Численность изучаемой группы возрастает под посевом ячменя на фоне фосфорных удобрений (+20% к контролю) и твердой пшеницы при внесении азотных удобрений (+26% к контролю).

В наибольшей степени в течение вегетационного периода улучшение азотного питания стимулирует рост агрономически ценных микроорганизмов в почве под посевом твердой пшеницы – на 39%, улучшение фосфорного питания у сортов люцерны – на 16% (рисунок 1).

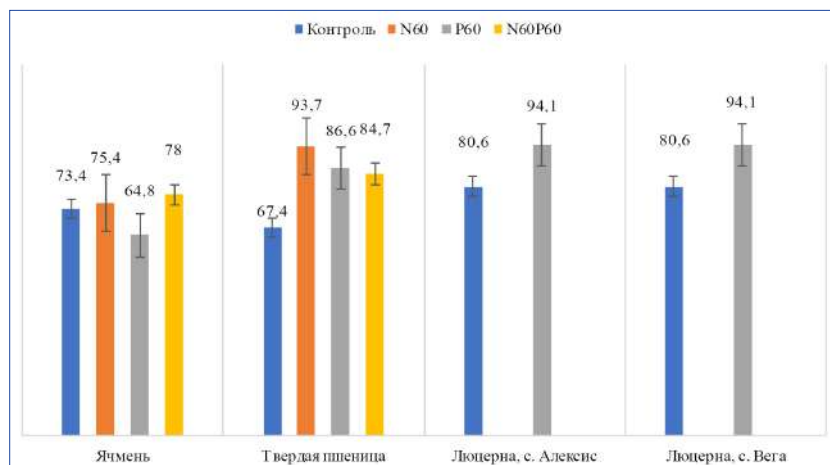


Рис. 1. Общая численность определяемых микроорганизмов в лугово-черноземной почве под посевом сельскохозяйственных культур, млн. КОЕ/г ($HCP_{05}A=8,1^*$, $HCP_{05}B=5,7^*$, $HCP_{05}AB=11,4^*$)

Fig. 1. Total number of identifiable microorganisms in meadow-chernozem soil under agricultural crops, million CFU/g ($NSR_{05}A=8.1^*$, $NSR_{05}B=5.7^*$, $NSR_{05}AB=11.4^*$)

Качественный и количественный состав почвенной биоты является важнейшим фактором, от которого зависит уровень плодородия почвы. Известно, что наряду с минерализацией органических соединений в почве и переводом их в доступные для растений формы, протекает не менее важный процесс – иммобилизация [4; 5].

Установлено, что под воздействием минеральных удобрений происходит усиление иммобилизационных процессов, в наибольшей степени под ячменем и пшеницей на фоне N_{60} (2,1-1,8), у люцерны сорта Алексис при внесении P_{60} (1,3), что обусловлено многочисленностью группы сапротрофов в этих вариантах (таблица 1). Этот процесс важен в плане сохранения

азота от вымывания вниз по почвенному профилю. Стоит отметить, что данная тенденция (преимущество иммобилизационных процессов) согласуется с предыдущими нашими исследованиями [14].

По данным численности бактерий культивируемых на средах КАА и МПА рассчитан коэффициент минерализации. Максимальное обилие амилитических микроорганизмов в почве отмечается лишь в варианте P_{60} сорта Флора 6 (люцерна), что свидетельствует о высокой (>1) степени минерализации азота. На остальных изучаемых вариантах и культурах значения коэффициента минерализации ниже единицы.

Таблица 2.

Интенсивность и направленность процессов в почве под посевом сельскохозяйственных культур в лугово-черноземной почве, $n=6$

Table 2. Intensity and Direction of Soil Processes Under Agricultural Crops in Meadow-Chernozem Soil, $n=6$

Вариант	$K_{имм}$	$K_{мин}$	$K_{олит}$	Пм
Ячмень				
Контроль	1,7	0,6	1,0	75,1
N_{60}	2,1	0,5	0,9	84,8
P_{60}	1,3	0,8	1,3	54,1
$N_{60} P_{60}$	1,7	0,5	1,2	71,7
Твердая пшеница				
Контроль	1,5	0,7	1,0	58,9
N_{60}	1,8	0,5	1,1	85,1
P_{60}	1,1	0,9	0,9	49,8
$N_{60} P_{60}$	1,2	0,9	1,2	65,2
Люцерна сорт Алексис				
Контроль	1,0	1,0	1,2	53,7
P_{60}	1,3	0,8	1,1	67,0
Люцерна сорт Флора 6				
Контроль	1,1	0,9	1,2	54,6
P_{60}	1,0	1,0	0,9	64,5
$HCP_{05} A$ / доля влияния	2,5/56,5	0,4/61,4	0,3/41,7	76,4/47,2
$HCP_{05} B$ / доля влияния	1,8/21,3	0,3/0,7	0,2/8,1	54,1/18,8
$HCP_{05} AB$ / доля влияния	3,6/22,2	0,6/37,9	0,4/50,3	108,1/34,1

Баланс между разложением остатков и микробным синтезом органического вещества почвы изменяется в зависимости от культуры. Микробная трансформация органических остатков в органическое вещество

почвы (о которой судили по коэффициенту $P_m = (M_{ПА} + K_{АА}) * (M_{ПА} / K_{АА})$) максимальная в вариантах применения азотного удобрения на ячмене и твердой пшенице, составляет 84,8 и 85,1 соответственно. Увеличение скорости трансформации связано с активным развитием аммонификаторов и процесса иммобилизации азота. Количественной характеристикой этого процесса является соотношение численности сапротрофных микробов (растущих на мясо-пептонном агаре, МПА) к амилолитическим микроорганизмам (растущим на среде КАА). В вышеупомянутых вариантах соотношение МПА/КАА составило 2,1 и 1,8 соответственно и было максимальным по опыту.

Для комплексной оценки почвенных процессов применяют коэффициент олиготрофности [11]. Наши расчеты показали, что при внесении минеральных удобрений под зерновые культуры микробное население активно разрушает почвенные органические вещества, что подтверждается коэффициентом олиготрофности (1,1-1,3).

Минеральные удобрения оказывают существенное влияние на количество нитратного азота в почве [2]. В течение периода вегетации содержание $N-NO_3$ варьировало от очень низкого (<10) до высокого (>20), согласно шкале обеспеченности почв минеральными формами азота (Г.П. Гамзиков) [3].

Наблюдения за динамикой нитратного азота в почве показали, что в июне содержание $N-NO_3$ в пахотном слое было на уровне низкого в большинстве вариантов опыта. Комплексное внесение минеральных удобрений на твердой пшенице способствовало увеличению азота нитратов в до высокого уровня – 20,2 мг/кг (таблица 3).

В июле и августе, за счет создавшихся благоприятных метеоусловий (достаточное увлажнение и установившаяся тёплая погода) и текущей нитрификации, количество нитратного азота варьировало от среднего до высокого по всем культурам и вариантам опыта, с максимальным значением на азотно-фосфорном фоне твердой пшеницы (27,1 мг/кг).

На урожайность сельскохозяйственных культур влияет комплекс условий: природные факторы, агротехнические приёмы, применение удобрений, а также интенсивность и направленность почвенных процессов. Благодаря деятельности микроорганизмов происходит распад органических соединений, находящихся в почве и вносимых удобрений. В ходе чего элементы питания переходят в доступную для растений форму и положительным образом влияют на урожайность культур.

Изучаемые дозы минеральных удобрений, особенно фосфорсодержащие, обеспечили получение существенной прибавки урожайности куль-

тур. Так, основное внесение фосфора обеспечивало прибавку 1,30 т/га зерна ячменя (66%) и 1,11 т/га зерна (52%) твердой пшеницы (таблица 4).

Таблица 3.

Содержание нитратного азота в почве под посевом с.-х. культур, в зависимости от применения удобрений, мг/кг, слой 0-20 см, (n=6)
Table 3. Nitrate nitrogen content in soil under agricultural crops, depending on fertilizer application, mg/kg, 0–20 cm layer, (n=6)

Вариант	июнь	июль	август
Ячмень			
Контроль	12,1	18,0	25,4
N ₆₀	13,0	21,2	25,6
P ₆₀	10,4	20,7	25,8
N ₆₀ P ₆₀	13,0	21,5	22,4
Твердая пшеница			
Контроль	14,7	19,1	25,9
N ₆₀	18,6	21,4	25,4
P ₆₀	15,7	15,6	23,1
N ₆₀ P ₆₀	20,2	15,5	27,1
Люцерна сорт Алексис			
Контроль	13,2	17,3	25,4
P ₆₀	10,3	20,7	22,1
Люцерна сорт Флора 6			
Контроль	11,4	16,8	24,5
P ₆₀	9,4	22,0	23,5
HCP ₀₅ A / доля влияния	2,8/33,8		
HCP ₀₅ B / доля влияния	2,0/19,0		
HCP ₀₅ AB / доля влияния	4,0/47,2		

Применение азотных удобрений (N₆₀) оказывало менее существенное влияние на продуктивность зерновых культур – прибавки составляли 0,22-0,27 т/га или 10-14% соответственно. Комплексное применение минеральных удобрений (N₆₀P₆₀) увеличивало урожайность ячменя с 1,98 до 3,42 т/га или на 73 %, твердой пшеницы – с 2,15 до 3,54 или на 65 %.

Применение подкормок фосфорсодержащим минеральным удобрением в период возобновления вегетации люцерны обеспечивало увеличение урожайности на 0,29-0,39 т/га сухого вещества или 3,12-3,51 т/га зеленой массы, при более высокой продуктивности и отзывчивости на изучаемый агроприем сорта Алексис.

Таблица 4.

**Урожайность сельскохозяйственных культур в зависимости
от условий минерального питания, (n=4)**

Table 4. Crop Yields as a Function of Nutrient Availability (n=4)

Вариант	ячмень		твердая пшеница		люцерна			
					сорт Алексис		сорт Флора 6	
	т/га	при- бавка	т/га	при- бавка	т/га сухого вещества (зе- леной массы) за два укоса	при- бавка	т/га сухого вещества (зе- леной массы) за два укоса	при- бавка
Контроль	1,98	-	2,15	-	2,58 (23,33)	-	2,42 (21,67)	-
N ₆₀	2,25	+0,27	2,37	+0,22	-	-	-	-
P ₆₀	3,28	+1,30	3,26	+1,11	2,97 (26,84)	+ 0,39 (3,51)	2,71 (24,79)	+ 0,29 (3,12)
N ₆₀ P ₆₀	3,42	+1,44	3,54	+1,39	-	-	-	-
HCP ₀ A=								

Корреляционный анализ микробиологических показателей лугово-черноземной почвы и урожайности ячменя показал, что существует сильная ($r=0,77$) положительная корреляция между численностью почвенных микромицетов и урожайностью, которая описывается прямолинейным уравнением регрессии (рисунок 2).

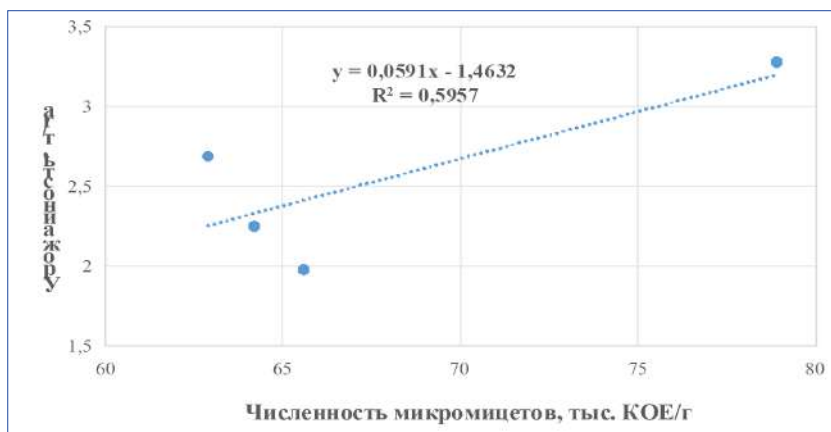


Рис. 2. Зависимость урожайности зерна ярового ячменя (Y, т/га зерна) от численности микромицетов (X, тыс. КОЕ/г), при n=9, (2012-2014 гг.)
Fig. 2. Relationship between spring barley grain yield (Y, metric tons per hectare of grain) and the abundance of microfungi (X, thousand CFU/g), with n=9 (2012–2014)

Заключение

По результатам исследований в длительном стационарном опыте, установлено, что на фоне внесения удобрений под сельскохозяйственные культуры увеличивается численность общей почвенной биоты, в большей степени на твердой пшенице (39% к контролю). Под воздействием минеральных удобрений наблюдается усиление иммобилизационных процессов, наибольшие значения отмечены под ячменем и пшеницей на фоне N_{60} (2,1-1,8), у люцерны сорта Алексис при внесении P_{60} (1,3). Коэффициент трансформации органического вещества почвы был выше на азотном фоне под посевом ячменя и пшеницы, составляя 84,8-85,1. В течение периода вегетации содержание азота нитратов в почве варьировало от очень низкого до высокого, увеличиваясь при комплексном применении минеральных удобрений на твердой пшенице до 20,2-27,1 мг/кг. Максимальная прибавка урожайности получена при применении фосфорных удобрений, основное внесение P_{60} обеспечивало прибавку 1,30 т/га зерна ячменя и 1,11 т/га зерна твердой пшеницы. Продуктивность люцерны также определялась условиями питания фосфором – применение подкормок в период возобновления вегетации люцерны обеспечивало увеличение урожайности на 0,29-0,39 т/га сухого вещества или 3,12-3,51 т/га зеленой массы. Между численностью микромицетов и урожайностью ячменя установлена корреляционная зависимость сильной степени ($r=0,77$).

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Аринушкина, Е. В. (1970). *Руководство по химическому анализу почв*. Москва: МГУ. 325 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01005948187>
2. Гамзиков, Г. П. (2013). *Агрохимия азота в агроценозах*. Новосибирск: РАС-ХН СО. 790 с. EDN: <https://elibrary.ru/UIBXVL>
3. Гамзиков, Г. П. (2015). Прогноз обеспеченности почв азотом и потребности полевых культур в азотных удобрениях. *Инновации и продовольственная безопасность*, 3(9), 11–20. EDN: <https://elibrary.ru/VVCCXF>
4. Еремин, Д. И., & Попова, О. Н. (2016). Бактериальная микрофлора и её роль в почвообразовательном процессе (аналитический обзор). *Вестник ГАУ Северного Зауралья*, 2(33), 12–19. EDN: <https://elibrary.ru/XCCIAT>

5. Зинченко, М. К. (2020). *Трансформация биологических свойств серой лесной почвы агроландшафтов в системе адаптивно-ландшафтного земледелия*. Суздаль-Иваново: ФГБНУ Верхневолжский ФАНЦ. 144 с. ISBN: 978-5-6045431-1-5. EDN: <https://elibrary.ru/LECTBS>
6. Коробова, Л. Н., Риксен, В. С., & Батурина, О. А. (2023). Микробиоценоз солонца как индикатор изменения среды при замене кормовых севооборотов сеяным лугом. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*, 53(8), 5–14. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-8-1>. EDN: <https://elibrary.ru/UYYRTB>
7. Мелихова, Н. П., Зибаров, А. А., & Вронская, Л. В. (2022). Продуктивность и плодородие почвы в орошаемых севооборотах Поволжья. *Орошаемое земледелие*, 1(36), 25–28. <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2022-1-3>. EDN: <https://elibrary.ru/FJGOIJ>
8. Риксен, В. С., Коробова, Л. Н., & Ломова, Т. Г. (2024). Влияние севооборота с донником на биологические и физико-химические свойства подсолонцового горизонта солонца мелкого. *Достижения науки и техники АПК*, 38(1), 4–9. https://doi.org/10.53859/02352451_2024_38_1_4. EDN: <https://elibrary.ru/ZAPCCS>
9. Синеговская, В. Т., & Банецкая, Е. В. (2022). Микробиоценозный состав луговой черноземовидной почвы в посевах сои и пшеницы при длительном внесении удобрений. *Плодородие*, 1, 46–49. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.124.1>. EDN: <https://elibrary.ru/SHUZVA>
10. Теппер, Е. З., & Шильникова, В. К. (2004). *Практикум по микробиологии: учебное пособие для вузов* (под ред. В. К. Шильниковой). Москва: Дрофа. 256 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01002409466>
11. Хасанова, Р. Ф., Суяндукоев, Я. Т., & Семенова, И. Н. (2017). Оценка экологического состояния почв степных агроэкосистем по показателям биологической активности. *Вестник НВГУ*, 1, 103–108. EDN: <https://elibrary.ru/YJTVSN>
12. Шалагинова, Л. И., Федотов, И. А., & Хвоина, Т. Ю. (2006). Влияние минеральных удобрений при орошении на микрофлору и эффективное плодородие черноземов выщелоченных. *Вестник Алтайского ГАУ*, 6(26), 28–31. EDN: <https://elibrary.ru/KUXSRL>
13. Шулико, Н. Н., Корчагина, И. А., Тукмачева, Е. В., Кубасова, Е. В., Киселёва, А. А., Юшкевич, Л. В., Ющенко, Д. Н., & Дидманидзе, О. Н. (2025). Биологическая активность лугово-черноземной почвы под посевом гороха в южной лесостепи Омской области. *Земледелие*, 5, 18–23. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2025-5-18-23>. EDN: <https://elibrary.ru/MISSGZ>
14. Шулико, Н. Н., Тимохин, А. Ю., Хамова, О. Ф., Бойко, В. С., Тукмачева, Е. В., Корчагина, И. А., & Вейнбендер, А. А. (2024). Биологические и агрохими-

- ческие свойства лугово-черноземной почвы Омского Прииртышья в связи с продуктивностью кормовых культур при применении минеральных удобрений. *Сельскохозяйственная биология*, 59(1), 156–173. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.1.156rus>. EDN: <https://elibrary.ru/CTISQB>
15. Юшкевич, Л. В., & Тимохин, А. Ю. (2024). *Управление ресурсами влаги в агроландшафтах Омского Прииртышья*. Омск: Омский АНЦ. 323 с. EDN: <https://elibrary.ru/TTRELA>
16. Li, J., Lin, L., Zhang, F., & Wan, X. (2019). Effect of fertilization mode on the number of microorganisms and enzyme activity in the rhizosphere soil of tea tree. *Research on Soil and Water Conservation*, 26(03), 22–28.
17. Li, K., Wang, Z., Xu, X., & Yang, H. (2019). Effects of different fertilization treatments on soil microbial quantity and enzyme activity in solar greenhouse. *Journal of Northwest Forestry University*, 34(02), 56–61.
18. Nanda, S. K., Da, P. K., & Behera, B. (1998). Effects of continuous manuring on microbial population, ammonification and CO₂ evolution in a rice soil. *Oryza*, 25(4), 413–416.
19. Stark, C. H., Condon, L. M., O’Callaghan, M., Stewart, A., & Hong, J. Di. (2008). Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(6), 1352–1363. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.025>
20. Zou, X., Yi, B., Zhang, Q., & Di, H. (2020). Effects of long-term fertilization on the microbial community structure and nitrogen cycling function of paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 26(12), 2158–2167.

References

1. Arinushkina, E. V. (1970). *Manual on the chemical analysis of soils*. Moscow: MSU. 325 p.
2. Gamzikov, G. P. (2013). *Agrochemistry of nitrogen in agrocenoses*. Novosibirsk: RASKhN SO. 790 p. EDN: <https://elibrary.ru/UIBXVL>
3. Gamzikov, G. P. (2015). Predicting soil nitrogen availability and crop nitrogen requirements. *Innovations and food security*, 3(9), 11–20. EDN: <https://elibrary.ru/VVCCXF>
4. Eremin, D. I., & Popova, O. N. (2016). Bacterial microflora and its role in soil formation: An analytical review. *Bulletin of the State Agrarian University of Northern Trans-Urals*, 2(33), 12–19. EDN: <https://elibrary.ru/XCC1AT>
5. Zinchenko, M. K. (2020). *Transformation of the biological properties of gray forest soil in agrolandscapes within the adaptive landscape farming system*. Suzdal-Ivanovo: FGBNU Verkhnevolzhsky FANC. 144 p. ISBN: 978-5-6045431-1-5. EDN: <https://elibrary.ru/LECTBS>

6. Korobova, L. N., Riksen, V. S., & Baturina, O. A. (2023). Solonetz microbiocenosis as an indicator of environmental change when replacing forage crop rotations with a sown meadow. *Siberian Bulletin of Agricultural Science*, 53(8), 5–14. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-8-1>. EDN: <https://elibrary.ru/UYRYTB>
7. Melikhova, N. P., Zibarov, A. A., & Vronskaya, L. V. (2022). Productivity and soil fertility in irrigated crop rotations in the Volga region. *Irrigated agriculture*, 1(36), 25–28. <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2022-1-3>. EDN: <https://elibrary.ru/FJGOIJ>
8. Riksen, V. S., Korobova, L. N., & Lomova, T. G. (2024). The effect of crop rotation with melilot on the biological and physicochemical properties of the subsolonetzh horizon of shallow solonetz. *Achievements of science and technology in the agro-industrial complex*, 38(1), 4–9. https://doi.org/10.53859/02352451_2024_38_1_4. EDN: <https://elibrary.ru/ZAPCCS>
9. Sinegovskaya, V. T., & Banetskaya, E. V. (2022). Microbial community composition of meadow chernozem-like soil under soybean and wheat crops with long-term fertilizer application. *Fertility*, 1, 46–49. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.124.1>. EDN: <https://elibrary.ru/SHUZVA>
10. Tepper, E. Z., & Shil'nikova, V. K. (2004). *Practical course in microbiology: A textbook for universities* (V. K. Shil'nikova, Ed.). Moscow: Drofa. 256 p. <https://search.rsl.ru/ru/record/01002409466>
11. Khasanova, R. F., Suyundukov, Ya. T., & Semenova, I. N. (2017). Assessment of the ecological state of soils in steppe agroecosystems based on biological activity indicators. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1, 103–108. EDN: <https://elibrary.ru/YJTVSN>
12. Shalaginova, L. I., Fedotov, I. A., & Khvoina, T. Yu. (2006). The effect of mineral fertilizers under irrigation on the microflora and effective fertility of leached chernozems. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 6(26), 28–31. EDN: <https://elibrary.ru/KUXSRL>
13. Shuliko, N. N., Korchagina, I. A., Tukmacheva, E. V., Kubasova, E. V., Kiseleva, A. A., Yushkevich, L. V., Yushchenko, D. N., & Didmanidze, O. N. (2025). Biological activity of meadow-chernozem soil under pea crops in the southern forest-steppe of the Omsk region. *Agriculture*, 5, 18–23. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2025-5-18-23>. EDN: <https://elibrary.ru/MISSGZ>
14. Shuliko, N. N., Timokhin, A. Yu., Khamova, O. F., Boyko, V. S., Tukmacheva, E. V., Korchagina, I. A., & Veinbender, A. A. (2024). Biological and agrochemical properties of meadow-chernozem soil in the Omsk Irtysh region in relation to forage crop productivity under mineral fertilizer application. *Agricultural biology*, 59(1), 156–173. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.1.156rus>. EDN: <https://elibrary.ru/CTISQB>

15. Yushkevich, L. V., & Timokhin, A. Yu. (2024). *Management of moisture resources in agrolandscapes of the Omsk Irtysh region*. Omsk: Omsk ANC. 323 p. EDN: <https://elibrary.ru/TTRELA>
16. Li, J., Lin, L., Zhang, F., & Wan, X. (2019). Effect of fertilization mode on the number of microorganisms and enzyme activity in the rhizosphere soil of tea tree. *Research on Soil and Water Conservation*, 26(03), 22–28.
17. Li, K., Wang, Z., Xu, X., & Yang, H. (2019). Effects of different fertilization treatments on soil microbial quantity and enzyme activity in solar greenhouse. *Journal of Northwest Forestry University*, 34(02), 56–61.
18. Nanda, S. K., Da, P. K., & Behera, B. (1998). Effects of continuous manuring on microbial population, ammonification and CO₂ evolution in a rice soil. *Oryza*, 25(4), 413–416.
19. Stark, C. H., Condon, L. M., O'Callaghan, M., Stewart, A., & Hong, J. Di. (2008). Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(6), 1352–1363. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.025>
20. Zou, X., Yi, B., Zhang, Q., & Di, H. (2020). Effects of long-term fertilization on the microbial community structure and nitrogen cycling function of paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 26(12), 2158–2167.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные об авторах

Шулико Наталья Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая лабораторией микробиологии
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»
пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
shuliko@anc55.ru

Тимохин Артем Юрьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий агротехнологического центра
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»

*пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
timokhin@anc55.ru*

Киселёва Алина Андреевна, младший научный сотрудник лаборатории микробиологии

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»

*пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
veybender@anc55.ru*

Тукмачева Елена Васильевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологии

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»

*пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
tukmacheva@anc55.ru*

Шаповал Максим Сергеевич, младший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»

*пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
shapoval@anc55.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalya N. Shuliko, PhD in Agricultural, Head of Laboratory of Microbiology

Omsk Agrarian Scientific Center

26, Koroleva Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

shuliko@anc55.ru

SPIN-code: 7601-1991

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5641-434X>

ResearcherID: ABF-6522-2021

Artem Yu. Timokhin, PhD in Agricultural, Head of Laboratory of Field Feed Production

Omsk Agrarian Scientific Center

26, Koroleva Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

timokhin@anc55.ru

SPIN-code: 5162-2346

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5120-4068>

ResearcherID: JPL-4190-2023

Scopus Author ID: 57213195613

Alina A. Kiseleva, Junior Researcher of Laboratory of Microbiology

Omsk Agrarian Scientific Center

26, Koroleva Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

veybender@anc55.ru

SPIN-code: 1146-1516

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5089-3703>

Elena V. Tukmacheva, PhD in Biological, Leading Researcher of Laboratory of Microbiology

Omsk Agrarian Scientific Center

26, Koroleva Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

tukmacheva@anc55.ru

SPIN-code: 1881-1679

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-3881>

ResearcherID: AAD-9301-2021

Maxim S. Shapoval, Junior Researcher

Omsk Agrarian Scientific Center

26, Koroleva Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

ms.shapoval1813@mail.ru

SPIN-code: 3687-8121

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8960-0817>

Поступила 20.01.2026

После рецензирования 05.04.2026

Принята 27.04.2026

Received 20.01.2026

Revised 05.04.2026

Accepted 27.04.2026

Селекция, семеноводство и биотехнология / Breeding, Seed Production, and Biotechnology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1818](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1818)EDN: [LJHVCY](https://edn.ru/LJHVCY)

УДК 633.26/29:631.53.01(574.22)



Семеноводство *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori в условиях Акмолинской области Казахстана

Н.В. Малицкая¹, М.А. Кузнецова¹, И.Б. Острецова²,
С.Е. Жумабаева², О.Д. Шойкин³, М.Ж. Аширбеков⁴

¹Северо-Казахстанский университет имени Манаши Козыбаева,

Петропавловск, Республика Казахстан

²Кокшетауский университет им. Шокана Уалиханова,

Кокшетау, Республика Казахстан

³Омский государственный аграрный университет

имени Петра Столыпина, Омск, Российская Федерация

⁴Казахский научно-исследовательский институт земледелия
и растениеводства, Алматы, Республика Казахстан

Аннотация

Обоснование. Многие кормовые интродуцируемые виды, хорошо адаптируются, в изменяющихся природных средах, в том числе и из рода *Aconogonon* L. Вид *Aconogonum* (*Polygonum*) *divaricatum* L. Nakai ex T. Mori успешно был внедрен в кормопроизводство Северного Казахстана, что относим к актуальному направлению.

Цель. Увеличить семенную продуктивность и улучшить семенные показатели плодов *Aconogonum d. (L.)* между разновидностями с разной их формой.

Методы и материалы. К материалу исследования относятся плоды *Aconogonum* (*Polygonum*) *divaricatum* L. Nakai ex T. Mori двух разновидностей: 1. треугольной формы- контроль, размеры: 3*5, масса 1000 плодов составляет 12,2- 13.8 г, урожайность – 0,5 т/га. 2. округлой формы, образовавшиеся методом естественного переопыления плодов сорта Чаглинский. Размеры плодов: 5*5, масса 1000 плодов: 12,2-13.8 г, урожайность плодов равна 0,7 т/га. Методы исследования: учитывали морфологические и продуктивные свойства плодов как их размеры, мм; массу 1000 плодов, гр; урожайность плодов, т/га. Проводили наблюдения за созреванием плодов в динамике, выделением семенных категорий. Учеты в опыте вели по методическим указаниям в полевых опытах с кормовыми культурами (Москва: ВИК, 1983).

Результаты. Созревание плодов в разновидности с плодами округлой формы происходит быстрее, чем в треугольной. Так, в восковой спелости: 45 к 28 штук, в

полной спелости плодов: 72 к 43 штук, в 1,6 раза. В целом, в соцветиях контроля образуется больше плодов – 276 шт., из элементов продуктивности активно развивается образование бутонов – 123 шт., далее идет формирование цветков – 50 шт. У округлой разновидности получили меньшее количество созревших плодов 234 шт., генеративный процесс идет к увеличению от количества бутонов – 27 шт. к количеству сформированных плодов – 58 шт. Сравнительная оценка между разновидностями показала, что больше щуплых плодов образовалось в соцветиях треугольной формы – 7,2% к 3% соцветий округлой формы.

Заключение. Размер, масса и количество плодов в каждом соцветии оказывает прямое влияние на урожайность плодов. У разновидности с плодами округлой формы с такими показателями: 5*5 мм; 14 г, 96,2% урожайность плодов – 0,9т/га получена больше, чем соответственно, 3*5 мм, 11 г, 90,7% у контрольного варианта – 0,7 т/га. Рекомендуется возделывать *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori с округлыми плодами, характеризующийся устойчивой семенной продуктивностью с крупными выполненными плодами для массового семенного размножения с целью производства разных видов кормов.

Ключевые слова: треугольные плоды; округлые плоды; щуплые плоды; выполненные плоды; необразовавшиеся плоды; размеры плодов; масса 1000 плодов; урожайность плодов

Для цитирования. Малицкая, Н. В., Кузнецова, М. А., Острецова, И. Б., Жумабаева, С. Е., Шойкин, О. Д., & Аширбеков, М. Ж. (2026). Семеноводство *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori в условиях Акмолинской области Казахстана. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 233–253. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1818>

Seed production of *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori in the conditions of the Akmola region of Kazakhstan

N.V. Malitskaya¹, M.A. Kuznetsova¹, I.B. Ostretsova²,
S.E. Zhumabaeva², O.D. Shoykin³, M.Zh. Ashirbekov⁴

¹Kozybayev University, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

²Ualikhanov University, Kokshetau, Republic of Kazakhstan

³Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russian Federation

⁴Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing,
Almalybak, Republic of Kazakhstan

Abstract

Background. Many introduced forage species adapt well to changing natural environments, including those from the genus *Aconogonon* L. The species is *Aconogonum*

(*Polygonum*) *divaricatum* L. Nakai ex T. Mori has been successfully introduced into feed production in Northern Kazakhstan, which is an important area.

Purpose. To increase seed productivity and improve seed characteristics of *Aconogonum* d. (L.) fruits between varieties with different shapes.

Methods and materials. The study material includes the fruits of *Aconogonum* (*Polygonum*) *divaricatum* L. Nakai ex T. Mori of two varieties: 1. triangular-shaped fruits - control, dimensions: 3 * 5, the weight of 1000 fruits is 12.2-13.8 g, the yield is 0.5 t / ha. 2. round-shaped fruits formed by the method of natural cross-pollination of the fruits of the Chaglinsky variety. Fruit dimensions: 5 * 5, the weight of 1000 fruits is 12.2-13.8 g. The fruit yield is 0.7 t / ha. Research methods: the morphological and productive properties of fruits were taken into account, such as their size, mm; weight of 1000 fruits, g; fruit yield, t/ha. Observations were made on the dynamics of fruit ripening and the identification of seed categories. The records in the experiment were carried out according to the methodological guidelines for field experiments with forage crops (Moscow: VIK, 1983).

Results. Fruit ripening in the round variety occurs faster than in the triangular variety. At wax ripeness, the ratio is 45 to 28, while at full ripeness, the ratio is 72 to 43, a 1.6-fold increase. Overall, the control variety produces more fruits in its inflorescences - 276. Among the productive elements, bud formation is actively developing - 123 fruits, followed by flower formation - 50 fruits. The round variety produced fewer ripe fruits - 234 fruits and the generative process increases from bud formation (27 fruits) to fully formed fruits (58 fruits). A comparative assessment between the varieties showed that more puny fruits were formed in triangular-shaped inflorescences - 7.2% to 3% in rounded-shaped inflorescences.

Conclusion. The size, weight, and number of fruits in each inflorescence have a direct effect on fruit yield. In a variety with rounded fruits with the following indicators: 5 * 5 mm; 14 g, 96.2%, the fruit yield was 0.9 t/ha, which is higher than in the control variant (respectively, 3*5 mm, 11 g, 90.7%) with the fruit yield of 0.7 t/ha. It is recommended to cultivate *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori with round fruits, characterized by stable seed productivity with large-sized fruits for mass seed propagation in order to produce different types of feed.

Keywords: triangular seeds; round seeds; shrunken fruits; full fruits; unformed fruits; fruit size; weight of 1000 fruits; fruit yield

For citation. Malitskaya, N. V., Kuznetsova, M. A., Ostretsova, I. B., Zhumabaeva, S. E., Shoykin, O. D., & Ashirbekov, M. Zh. (2026). Seed production of *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori in the conditions of the Akmol region of Kazakhstan. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 233–253. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1818>

Введение

Интродуцируемые виды играют важную роль в адаптации растений к зональным условиям. Многолетний стеблестой интенсивного роста дает возможность обеспечить животных качественными кормами [16].

Род *Aconogonon* L. переводится с греческого языка как «polys» (многой) и «gonu» (колено) или многоугольник [29], растения данного рода выделяются узлами на стеблях. В род входят около 200 видов, 40 видов трав используются в естественных условиях на корм животным и птице [24].

Кормовой вид *Aconogonum (Polygonum) divaricatum* L. Nakai ex T. Mori, входящий в род *Aconogonon* L. освоил широкий спектр местообитаний. Естественный ареал вида охватывает Северную часть Восточной Азии, Северную Монголию, южные районы Восточной Сибири [17]. В Европе данный вид стал возделываться с 20 века из-за активного использования на корм с ранней весны до поздней осени [12].

Растение *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori стержнекорневого типа развивается до 120-140 см высотой. Долголетник. Стебли прямостоячие, растопыренно-разветвленные, голые. Листовые пластинки развиваются очередными ланцетными, 4–12 см длиной и 0,4–1,2 см шириной, черешки листьев до 0,5 см длиной [19].

Соцветия пазушные и верхушечные метелочного рыхлого типа состоят из простых или разветвленных дихазий. Двудольный околоцветник имеет форму венчика, состоит из пяти белых лепестков, длиной около 3 мм. Цветки относительно мелкие обоеполые на цветоножках с пряным запахом [21]. В период формирования плода околоцветник удлинняется до 5 мм, нижняя часть его сильно сужена, достигает длины 0,2–0,5 мм [19]. В цветке находится 6-8 тычинок, нити свободные двойные, часто в основании срастаются с трубкой околоцветника, образуя отчетливое кольцо [18]. Пыльники дитековые, геницей состоит из трех плодolistиков [26]. Завязь одногнездная верхняя [22].

Цветки с короткими столбиками имеют крупнее листочки околоплодника и предрасположены к небольшому бесплодию [30], чем цветки с длинными столбиками [27]. Более крупное рыльце может получить больше пыльцевых зёрен [23]. Диаметр пыльцевых зерен равен 32-40 мкм, длина пыльцевой трубки – 135-270 мкм. Пыльца трикольпоратная сложнопоровая, от вытянутой до сфероидальной формы [25].

Жизнеспособность пыльцы составляет 60 - 62%, после 12 часов хранения количество проросших пыльцевых зерен сокращается в 2,5 раза [8]. Для данного вида характерно обильное цветение и плодоношение. Продолжительность цветения одного цветка равна 4-6 дней, всего соцветия –

14-21 день. Длительное цветение влияет на растянутый период созревания семян [10]. *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori – облигатный энтомофил. В цветках гречишных насекомых привлекает нектар, который выделяют нектарники, расположенные у основания тычинок.

Плодообразование объясняется привлечением насекомых-опылителей и может быть недостаточным из-за внешних природных факторов [9].

Плод – орешек 4–6 мм длиной и 2,7–3,3 мм шириной. Поверхность орешка гладкая, светлых оттенков, блестящая. Молодой плод снаружи ограничен хорошо развитым экзокарпием, мезокарпием, образованным несколькими слоями паренхиматозных клеток, и внутренним эндокарпием. Также семенная оболочка включает один – два слоя палисадных клеток [28]. В семени находится хорошо развитый периферический изогнутый зародыш [31].

Формирование плодов начинается с нижней части соцветия и происходит неравномерно, что обусловлено многоярусным расположением генеративных органов. В лесостепной зоне Северного Казахстана плоды достигают восковой спелости, как правило, в конце августа, а в первой декаде сентября формируется полная спелость [10]. Слабая осыпаемость плодов не приводит к

их потерям при раздельной уборке. Производственная проверка показала, что плоды дозревают в валках, не снижая посевных качеств [5]. Коэффициент семенной продуктивности горца забайкальского равен 150%.

Качество плодов оценивается пятым классом развития – более 80%, их выполненность составляет 72,8%, имеются и пустые плоды от 2-х до 10%. Вышеперечисленные качества плодов влияют на семенную продуктивность, которая составляет от 0,3 до 0,7 т/га.

Послеуборочная обработка семян включает отделение вороха от семенной массы в сочетании с калиброванием [14]. Срок хранения семян и плодов равен в среднем 6 месяцам. Лабораторная всхожесть плодов после непродолжительного покоя составляет 50%, жизнеспособность – 52%.

Для выращивания зеленой массы культуры на кормовые цели необходимо заняться ее семеноводством.

Цель исследования – увеличить семенную продуктивность и улучшить семенные показатели плодов *Aconogonum d. (L.) Nakai ex T. Mori* между разновидностями с разной их формой.

Материалы и методы

Научное исследование «Сравнительная семенная продуктивность разновидностей *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori» проводили с

2011 по 2021 годы в условиях умеренно – засушливой степи Акмолинской области, расположенной на границе Западносибирской равнины и Казахского мелкосопочника. Полевой опыт закладывали на почве: чернозем обыкновенный, содержащий 3–4,5% гумуса, 60 мг нитратного азота, 14 мг подвижного фосфора, 338 мг подвижного калия на 100 г почвы, pH составил 7,85.

Опыт закладывали по следующей схеме: 1. плоды треугольной формы – контроль; 2. плоды округлой формы. Варианты в опыте разместили методом рендомизации в трех повторностях. Площадь опытной делянки составила 70м² (длина – 10 м, ширина – 7 м). Ширина неучетных частей была следующей: защитной – 2,1 м, межделяночной – 0,5 м, полос между повторностями – 1 м. Общая площадь опыта составила 5620 м².

Опыт закладывали 3 раза на полевом стационаре Кокшетауского государственного сортоучастка. В каждом заложенном опыте в 2011, 2014 и 2017 гг. изучали семенную продуктивность разновидностей и качество плодов на 5 - й год жизни.

Агротехника в опыте была зональной интенсивного типа. Предшественник – чистый пар. *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori высевали во второй декаде мая с нормой 3,2 кг/га (250 000 всхожих плодов/га). Способ посева широкорядный, расстояние между рядами 45 см, глубина посева 2–4 см.

Объекты исследования. К плодам треугольной формы *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori относится сорт Чаглинский. Оригинатор – РГКП «Кокшетауский государственный университет имени Ш. Уалиханова» МОН РК. Сорт семейства *Polygonaceae*, кормового направления, долголетнего использования. Средняя высота растений составляет 136 см. Зимостойкость, засухоустойчивость равны 5 баллам. Мучнистой росой растения поражаются на 8%. Сорт Чаглинский устойчив к вредителям листы и семян. К недостаткам сорта относятся растянутый период цветения (18-21 день). Вегетационный период во второй год жизни для производства семян составляет 106 суток. Сорт пригоден к механизированной уборке. Параметры плодов: длина 5 мм, ширина 3 мм; масса 1000 плодов – 10,4-11,8 г. Урожайность плодов составляет 0,5т/га. Рекомендуются для возделывания на семенные и кормовые цели в северных и других областях Казахстана [4].

Плоды округлой формы *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori созданы в процессе естественного переопыления растений сорта Чаглинский. Средняя высота растений составляет 114 см. Параметры плодов сле-

дующие: ширина 5мм, длина 5 мм; масса 1000 плодов равна 12,2-13,8 гр. Урожайность плодов составляет 0,7т/га. Вегетационный период во второй год жизни для производства плодов равен 100 суток.

Учеты в процессе научного исследования проводили по методическим указаниям в полевых опытах с кормовыми культурами [13].

1. Продуктивные свойства плодов. Для их определения оценивали верхушечную часть соцветия, отбирая по 3 образца с каждого из 5 растений пятого года жизни. Образцы отбирали в период цветения – плодообразования растений с двух вариантов и двух несмежных повторностей в среднем за 3 года.

Образец верхушечного соцветия *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori, (рисунок 1), представляет собой центральную разветвленную ось длиной более 10см, к ней крепятся основные семенные оси, сверху короткие до 7-10 см, снизу удлинённые до 20-50 см.



Рис. 1. Верхушечное соцветие *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori

Fig. 1. Terminal inflorescence of *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori

Центральная ось в среднем несёт 4-5 узлов, которые состоят из двух-трех осей. Элементы продуктивности соцветий культуры: количество, шт./%: бутонов, цветков, сформированных плодов, созревших плодов в восковой и полной спелостях.

Созревание плодов в динамике, %. Отмечали степень созревания плодов от восковой до полной спелости в календарной последовательности.

Выделение семенных категорий, %: выполненные, шуплые, необразовавшиеся плоды в период их созревания.

Морфологические и продуктивные свойства плодов. Оценивали их размеры, мм: ширину, длину; массу 1000 плодов, г; урожайность плодов, т/га.

Размеры плодов, мм оценивали, отбирая от каждого растения по 30 плодов. Измеряли ширину и длину плодов линейкой, определяя средние размеры.

Масса 1000 плодов, гр. Из верхушечных соцветий отбирали по 100 плодов в двух повторениях, взвешивали их на аналитических весах и определяли средний результат.

Урожайность плодов, т/га. Семенной травостой срезали и обмолачивали сплошную с каждой опытной делянки и с двух несмежных повторностей, затем взвешивали бункерный урожай и учитывали урожайность с 14%-й влажностью и 100% -й чистотой.

2. Экспериментальные данные обработали дисперсионным анализом (HSP_{05}) по Доспехову Б.А. [7], также определили стандартную ошибку средней выборки ($M \pm SEM$).

3. Метеорологические условия: средняя температура воздуха, °C; месячное количество осадков, мм, для расчета гидротермического коэффициента по Селянинову Г.Т. (ГТК) за вегетационный период в условиях Акмолинской области за 2011–2021 годы отбирали на сайте <http://www.pogodaiklimat.ru> [1].

Результаты исследования и их обсуждение

В годы проведения исследования с 2011 по 2021 влияние агроклиматических условий было различным. В сравнении со среднемноголетним показателем за вегетационный период с мая по сентябрь, где средний ГТК составляет 0,25, что характеризует период как сухой, среди лет исследования такими же годами являлись: 2011, 2014, 2016 (0,28); 2012 (0,25); 2015 (0,27) гг. Более сухим периодом характеризовались следующие годы: 2015 (0,14), 2020 (0,11), 2021 (0,15). Умеренно-засушливый период был в годы: 2013 (0,64), 2018 (0,38). Неравномерное распределение осадков и непостоянная температура воздуха повлияли на разный уровень густоты всходов, рост и развитие растений, количество и качество семенных плодов.

В репродуктивный период растения формируют органы плодообразования, зависящие от активности насекомых, также осадков, ветра [9]. Данный процесс длится 5-6 недель [10]. Период цветения является растянутым, так как верхние кисти цветут в течение 25-30 суток, учитывая время цветения каждого цветка в течение 5 суток и их количество [3].

В данный период в соцветиях с округлыми плодами наибольший элемент продуктивности занимают бутоны – 26 штук, затем цветки – 14 и сформированные плоды – 11 штук, таблица 1.

Таблица 1.

**Элементы продуктивности у верхушечных соцветий
с плодами разных форм у *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori, в
среднем за 3 года (2015, 2018, 2021)**

Table 1. Productivity parameters of terminal inflorescences bearing fruits of various shapes in *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori, averaged over 3 years (2015, 2018, 2021)

Элементы продуктивности	Цветение		Созревание плодов	
	Штук	%	штук	%
Бутон	31/26	47,6/50,9	123/27	44,5/11,5
Цветок	18/14	27,6/27,4	50/32	18,1/13,6
Сформированный плод	16/11	24,6/21,5	32/58	11,5/24,7
Плод в фазе восковой спелости	-	-	28/45	10,1/19,2
Плод в фазе полной спелости	-	-	43/72	15,5/30,7
Итого	65/51	100	276/234	100
MSEM	21,6±8,1/ 17,0 ±7,9	33,2±12,5/ 33,2±15,5	55,2±38,8/ 46,8±18,5	19,9±14,0/ 19,9±7,9

Примечание: слева от косой линии: плоды треугольной формы, справа: плоды округлой формы.

Плод – орешек, на 1/3 своей длины выступает из околоплодника [19]. Поверхность плода стекающая, светло-бурая, переливается на свету. Поверхность плода повышает водоотталкивающие свойства, защищает семя от поражения болезнетворными микроорганизмами [20]. В период созревания плодов идет неравномерное их побурение (от 19,2% в восковой спелости до 30,7% в полной).

Уже со второго года жизни максимальное количество завязавшихся плодов составляет 70-85% от общего количества цветков. Выполненных плодов в верхних соцветиях образуется 35-45% от средней продуктивности в умеренно-климатических условиях.

В период созревания плодов идет массовое образование генеративных органов в соцветии: от бутонов 11,5% к цветкам 13,6% и плодам, находящимся в начальной стадии образования – 24,7%.

Сравнительная оценка между разновидностями горца по элементам семенной продуктивности показала, что существенная разница по сформированным плодам в период цветения, % вела к их уменьшению для округлой формы – 21,5 (таблица 1), чем по треугольной форме плодов – 24,6.

Созревание плодов в разновидности с плодами округлой формы происходит быстрее, чем в треугольной. Так, в восковой спелости: 45 к 28 штук, в полной спелости плодов: 72 к 43 штук, в 1,6 раза.

В целом, в соцветиях с плодами треугольной формы образуется больше плодов – 276 шт., из элементов продуктивности активно развивается образование бутонов – 123 шт., далее идет формирование цветков – 50 шт. У округлой разновидности получили меньшее количество созревших плодов 234шт, генеративный процесс идет к увеличению от количества бутонов – 27 шт. к количеству сформированных плодов – 58 шт.

Созревание плодов начинаем отмечать с восковой спелости – 5 августа, постепенно идет накопление плодов 13,6% к 15 августа в соцветиях округлой разновидности, что больше в 1,5 раза, чем в соцветиях с плодами треугольной формы – 12,4%, таблица 2.

Наибольшее количество плодов к 5 сентября достигает полной спелости, более активно процесс проходит у разновидности с плодами округлой формы – 24,2%, что больше в 1,1 раза, чем у разновидности с плодами треугольной формы – 18,4%.

Таблица 2.

Поэтапное созревание плодов *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori пятого года жизни, в среднем за 3 года (2015, 2018, 2021)

Table 2. Stages of fruit ripening in *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori in its fifth year of life, averaged over 3 years (2015, 2018, 2021)

Варианты	Количество созревающих плодов, %							
	восковая спелость				полная спелость			
	5 августа	10 августа	15 августа	20 августа	25 августа	30 августа	5 сентября	10 сентября
1. Плоды треугольной формы - контроль	9,2	11,6	12,4	5,2	10,4	16,2	18,4	16,4
2. Плоды округлой формы	6,6	10,1	13,6	9,0	12,8	17,5	24,2	5,8
MSEM	11,2± 1,8	10,8± 1,0	13,0± 0,8	7,1± 2,6	11,6± 1,6	16,8± 0,9	21,3± 4,1	11,1± 7,4

Семенная продуктивность соцветий горца забайкальского сильно варьирует в зависимости от погодных условий в период опыления [6]. В отдельные годы число выполненных плодов составляет 12-32% от количества цветков и 23-57% от числа завязавшихся плодов. Поэтому урожайность плодов изменяется в пределах 0,1-1,0 т/га [5].

Адаптация культуры к зональным условиям, как лесостепная зона Западной Сибири [2] и сопочно-равнинная степь Северного Казахстана [15] показала незначительное влияние на урожайность плодов по годам, начиная с четвертого года жизни [10].

Сравнительная оценка между разновидностями показала, что больше дефектных плодов находится в соцветиях треугольной формы. Образование щуплых плодов зависит от оплодотворения насекомыми, мухи с опылением не справляются. Щуплых плодов содержится в 12,5 раз меньше, необразовавшихся в 45,3 раза к выполненной фракции плодов треугольной формы – 90,7%, таблица 3.

Таблица 3.

Качество плодов *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori, в среднем за 3 года (2015, 2018, 2021)

Table 3. Fruit quality of *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori, averaged over 3 years (2015, 2018, 2021)

Варианты	Количество плодов, %		
	выполненные	щуплые	необразовавшиеся
1. Плоды треугольной формы – контроль	90,7	7,2	2,0
2. Плоды округлой формы	96,2	3,0	0,7
MSEM	93,4±3,8	5,1±2,9	1,3±0,9

Семенная продуктивность *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori зависит от возраста растений, наибольшей она бывает на четвертый-пятый годы жизни. Вследствие неравномерности созревания плодов в метелке, они отличаются по массе, размерам и даже посевным качествам [11].

У разновидности с плодами треугольной формы отмечены меньшие размеры плодов 3*5 мм, чем у разновидности с плодами округлой формы 5*5, масса плодов также соответствует размерам: 11 к 14 г, таблица 4.

Размеры, масса и количество плодов влияют непосредственно на их урожайность, соответственно, 0,7 и 0,9 т/га. Убирать плоды можно в фазе восковой спелости в конце августа или на 1 неделю позже при достижении ими полной спелости.

Наблюдается прямая зависимость между размерами плодов и их всхожестью. При посеве мелкими плодами всхожесть и сохранность растений снижались. Так, при посеве плодов с массой 7,0 – 8,0 г всхожесть в полевых условиях получили меньше на 15-20%, чем при посеве крупными плодами (масса 1000 плодов 10,0-12,0 г) [3].

Таблица 4.

Семенные показатели плодов *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori, в среднем за 3 года (2015, 2018, 2021)

Table 4. Seed characteristics of *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori fruits, averaged over 3 years (2015, 2018, 2021)

Варианты	Срок спелости	Размеры плодов, мм	Масса 1000 плодов, г	Урожайность плодов, т/га
1. Плоды треугольной формы -контроль	восковая спелость	3*5	11	0,7
2. Плоды округлой формы		5*5	14	0,9
HCP ₀₅ MSEM		4±1,4*5±0,0	0,10	0,006

Заключение

Производство долголетнего стеблестоя с помощью интродуцируемых кормовых видов – возможность стабильного производства кормов для сбалансированного кормления сельскохозяйственных животных.

Хорошо адаптировался к условиям Акмолинской области Северного Казахстана один из интродуцируемых видов рода *Aconogonon* L. – *Aconogonum d. (L.) Nakai ex T. Mori*. Долголетник. Оценка семенной продуктивности и качества плодов с разной формой в период исследования с 2011-2021 гг. повлияла на:

- элементы продуктивности у верхушечных соцветий, наибольшее количество созревших плодов 276 шт. образовалось у плодов треугольной формы;
- более активное созревание плодов в полной спелости отмечено у разновидности с плодами округлой формы – 24,2%;
- образование большего количества щуплых плодов в соцветиях с треугольными орешками – 7,2%;
- семенные показатели плодов как размеры, мм 5*5, масса, г 14, и урожайность, т/га 0,9, были больше у разновидности с плодами округлой формы.

Рекомендуется возделывать *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori с округлыми плодами, характеризующийся устойчивой семенной продуктивностью с крупными выполненными плодами для массового семенного размножения с целью производства разных видов кормов.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Архив погоды. (2024). *Погода и климат*. <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=28879>
2. Бойков, Т. Г. (1993). Новые силосные растения для Забайкалья. В *Материалы восьмого Всесоюзного симпозиума по новым кормовым растениям* (с. 24–26). Сыктывкар.
3. Воронин, А. А., Сафонова, О. Н., & Воронина, В. С. (2014). Горец забайкальский в условиях ботанического сада Воронежского госуниверситета. *Плодоводство и ягодоводство России*, 40(1), 90–92. EDN: <https://elibrary.ru/SXJNZB>
4. Государственный реестр селекционных достижений, рекомендуемых к использованию в Республике Казахстан. (2024). *Әділет: Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан*. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V090005759>
5. Демина, А. Е., & Суслов, П. Е. (1983). Горец забайкальский. *Земледелие*, (7), 40.
6. Демина, А. Е., & Моисеев, К. А. (1976). Повышение продуктивности горца забайкальского. *Земледелие*, (12), 63–64.
7. Доспехов, Б. А. (1985). *Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований*. Агропромиздат. 351 с.
8. Кондратенкова, Т. Д. (1990). Жизнеспособность пыльцы некоторых видов *Polygonum L.* секции *Aconogonon Meissn* в условиях Ленинградской области. *Растительные ресурсы*, 26(4), 530–535.
9. Кондратенкова, Т. Д. (1990). О некоторых аспектах антропоэкологии видов рода *Polygonum L.* из секции *Aconogonon Meissn* в связи с плодоношением. В *Труды третьей конференции молодых ботаников Ленинграда* (№ 2, с. 196–202). Ленинград.
10. Костиков, И. Ф., & Малицкая, Н. В. (2017). Горец забайкальский (*Polygonum divaricatum*). В И. Ф. Костиков (Ред.), *Интродукция новых и малораспространенных культур в Северном Казахстане: в 5 частях* (ч. 3, 180 с.). СКГУ им. М. Козыбаева.
11. Кролевец, Р. Л. (2007). Влияние срока посева на урожайность и качество семян горца забайкальского. *Аграрный вестник Урала*, (3), 38–40. EDN: <https://elibrary.ru/HNMQHX>
12. Лунева, Н. Н. (2020). Пространственная динамика видов сорных растений на территории отдельной агроэкосистемы. В *Сборник материалов XVI Международной научной экологической конференции, посвященной памяти Александра Владимировича Присного «Пространственно-временные аспекты функционирования биосистем»* (с. 217–221). Белгород. EDN: <https://elibrary.ru/FSHLXA>

13. Новоселов, Ю. К., Киреев, В. Н., Кутузов, Г. П., Каравянский, Н. С., Харьков, Г. Д., Кузютин, А. В., ... Кашманова, О. И. (1983). *Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами*. Подразделение оперативной полиграфии ВИК. 197 с. EDN: <https://elibrary.ru/JSXJMI>
14. Романович, В. Ф., & Касач, А. Е. (1986). Особенности эбриогенеза и семенного размножения горцев (*Polygonum coriarium* Grig. В *P.divaricatum* L.). *Известия АН Таджикской ССР*, (2), 55–58.
15. Сагалбеков, У. М., Костиков, И. Ф., & Аленов, Ж. Н. (2003). *Малораспространенные перспективные культуры Северного Казахстана: учебное пособие*. КГУ имени Ш. Уалиханова. 83 с.
16. Степанов, А. Ф. (1996). *Многолетние нетрадиционные кормовые культуры в Западной Сибири: монография*. ОмГАУ. 60 с.
17. Эбель, А. Л. (2006). О распространении *Aconogonon divaricatum* (Polygonaceae) в Западной и Средней Сибири. В *Сборник материалов V международной научно-практической конференции «Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии»* (№ 5, с. 327–328). Барнаул. EDN: <https://elibrary.ru/MFAANF>
18. Юрцева, О. В., & Чуб, В. В. (2005). Структурные типы цветков Polygonaceae и пути их преобразования: данные к построению модели развития цветка. *Бюллетень Московского общества испытателей природы*, 110(6), 27–39. EDN: <https://elibrary.ru/HSWQBZ>
19. *Aconogonon divaricatum* (L.) Nakai ex Mori. (n.d.). In *Plantarium: Plants and lichens of Russia and neighboring countries: open online galleries and plant identification guide*. <https://www.plantarium.ru/lang/en/page/view/item/634.html>
20. Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B., & Koch, K. (2017). Plant surfaces: Structures and functions for biomimetic innovations. *Nano-Micro Letters*, 9(23), 1–40. <https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1>. EDN: <https://elibrary.ru/MISHEA>
21. Brandbyge, J. (1993). Polygonaceae. В К. Kubitzki, J. G. Rohwer, & V. Bittrich (Eds.), *The families and genera of vascular plants: Flowering plants — Dicotyledons. Magnoliid, Hamamelid and Caryophyllid families* (vol. 2, pp. 531–544). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02899-5_63
22. Chen, M. L. (2012). Floral morphology and breeding system in *Polygonum hastato-sagittatum* Mak. (Polygonaceae). *Flora*, 207(5), 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2012.01.012>
23. Faivre, A. E. (2000). Ontogenetic differences in heterostylous plants and implications for development from a herkogamous ancestor. *Evolution*, 54(3), 847–858. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00085.x>
24. Graham, R. A. (1957). A revision of *Oxygonum* (Polygonaceae-Polygoneae). *Kew Bulletin*, 12(1), 145–172. <https://doi.org/10.2307/4109117>

25. Hong, S. P., Oh, I. C., & De Craene, L. R. (2005). Pollen morphology of the genera *Polygonum* s. str. and *Polygonella* (Polygoneae: Polygonaceae). *Plant Systematics and Evolution*, (254), 13–30. <https://doi.org/10.1007/s00606-005-0334-4>. EDN: <https://elibrary.ru/DVOMYJ>
26. Lord, J. M. (2011). Flower and fruit. Morphology, ontogeny, phylogeny, function, ecology. *New Zealand Journal of Botany*, (49), 141–142. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2011.548764>
27. Reddy, N. P., Bahadur, B., & Kumar, P. V. (1977). Heterostyly in *Polygonum chinense* L. *Journal of Genetics*, 63(2), 79. <https://doi.org/10.1007/BF02984278>
28. Roth, I. (1977). *Fruits of angiosperms. Encyclopedia of plant anatomy*. Gebruder Borntraeger.
29. Small, J. K. (1895). *A monograph of the North American species of the genus Polygonum*. New Era Print. 168 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.15494>
30. Stanford, E. E. (1925). The inflorescence and flower-form in *Polygonum*, subgenus *Persicaria*. *Rhodora*, 27(315), 41–47. <https://doi.org/23297758>
31. Wodehouse, R. P. (1931). Pollen grains in the identification and classification of plants vi. Polygonaceae. *American Journal of Botany*, 18(9), 749–764. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1931.tb04946.x>

References

1. Weather Archive. (2024). *Weather and Climate*. Retrieved July 2, 2024, from <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=28879>
2. Boykov, T. G. (1993). New silage plants for Transbaikalia. In *Proceedings of the Eighth All-Union Symposium on New Forage Plants* (pp. 24–26). Syktyvkar.
3. Voronin, A. A., Safonova, O. N., & Voronina, V. S. (2014). Zabaykalian knotweed under conditions of the Botanical Garden of Voronezh State University. *Fruit and Berry Growing in Russia*, 40(1), 90–92. EDN: <https://elibrary.ru/SXJNZB>
4. State Register of Breeding Achievements Recommended for Use in the Republic of Kazakhstan. (2024). *Adilet: Information and Legal System of Regulatory Legal Acts of the Republic of Kazakhstan*. Retrieved July 6, 2024, from <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V090005759>
5. Demina, A. E., & Suslov, P. E. (1983). Zabaykalian knotweed. *Agriculture*, (7), 40.
6. Demina, A. E., & Moiseev, K. A. (1976). Increasing the productivity of Zabaykalian knotweed. *Agriculture*, (12), 63–64.
7. Dospekhov, B. A. (1985). *Field experiment methodology with fundamentals of statistical processing of research results*. Agropromizdat. 351 p.
8. Kondratenkova, T. D. (1990). Pollen viability of some species of *Polygonum* L. section *Aconogonon* Meissn under conditions of the Leningrad Region. *Plant Resources*, 26(4), 530–535.

9. Kondratenkova, T. D. (1990). On some aspects of the anthecology of *Polygonum* L. species from the section *Aconogonon* Meissn in relation to fruiting. In *Proceedings of the Third Conference of Young Botanists of Leningrad* (No. 2, pp. 196–202). Leningrad.
10. Kostikov, I. F., & Malitskaya, N. V. (2017). Zabaykalian knotweed (*Polygonum divaricatum*). In I. F. Kostikov (Ed.), *Introduction of new and underutilized crops in Northern Kazakhstan: in 5 parts* (Part 3, 180 p.). M. Kozybayev North Kazakhstan University.
11. Krolevets, R. L. (2007). Effect of sowing time on the yield and seed quality of Zabaykalian knotweed. *Agrarian Bulletin of the Urals*, (3), 38–40. EDN: <https://elibrary.ru/HNMQHX>
12. Luneva, N. N. (2020). Spatial dynamics of weed species within a single agroecosystem. In *Proceedings of the XVI International Scientific Ecological Conference dedicated to the memory of Alexander Vladimirovich Prisny "Spatiotemporal aspects of biosystem functioning"* (pp. 217–221). Belgorod. EDN: <https://elibrary.ru/FSHLXA>
13. Novoselov, Yu. K., Kireev, V. N., Kutuzov, G. P., Karavyansky, N. S., Kharkov, G. D., Kuzyutin, A. V., ... Kashmanova, O. I. (1983). *Guidelines for conducting field experiments with forage crops*. Operational Printing Division of VIK. 197 p. EDN: <https://elibrary.ru/JSXJMI>
14. Romanovich, V. F., & Kasach, A. E. (1986). Features of embryogenesis and seed reproduction of knotweeds (*Polygonum coriarium* Grig. and *P. divaricatum* L.). *Proceedings of the Academy of Sciences of the Tajik SSR*, (2), 55–58.
15. Sagalbekov, U. M., Kostikov, I. F., & Alenov, Zh. N. (2003). *Underutilized promising crops of Northern Kazakhstan: a study guide*. Sh. Ualikhanov Kokshetau State University. 83 p.
16. Stepanov, A. F. (1996). *Perennial non-traditional forage crops in Western Siberia: a monograph*. Omsk State Agrarian University. 60 p.
17. Ebel, A. L. (2006). On the distribution of *Aconogonon divaricatum* (Polygonaceae) in Western and Central Siberia. In *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Problems of Botany in Southern Siberia and Mongolia"* (No. 5, pp. 327–328). Barnaul. EDN: <https://elibrary.ru/MFAANF>
18. Yurtseva, O. V., & Chub, V. V. (2005). Structural types of *Polygonaceae* flowers and pathways of their transformation: data for constructing a flower development model. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists*, 110(6), 27–39. EDN: <https://elibrary.ru/HSWQBZ>
19. *Aconogonon divaricatum* (L.) Nakai ex Mori. (n.d.). In *Plantarium: Plants and lichens of Russia and neighboring countries: open online galleries and plant identification guide*. Retrieved July 12, 2024, from <https://www.plantarium.ru/lang/en/page/view/item/634.html>

20. Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B., & Koch, K. (2017). Plant surfaces: Structures and functions for biomimetic innovations. *Nano-Micro Letters*, 9(23), 1–40. <https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1>. EDN: <https://elibrary.ru/MISHEA>
21. Brandbyge, J. (1993). Polygonaceae. In K. Kubitzki, J. G. Rohwer, & V. Bittrich (Eds.), *The families and genera of vascular plants: Flowering plants — Dicotyledons. Magnoliid, Hamamelid and Caryophyllid families* (Vol. 2, pp. 531–544). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02899-5_63
22. Chen, M. L. (2012). Floral morphology and breeding system in *Polygonum hastato-sagittatum* Mak. (Polygonaceae). *Flora*, 207(5), 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2012.01.012>
23. Faivre, A. E. (2000). Ontogenetic differences in heterostylous plants and implications for development from a herkogamous ancestor. *Evolution*, 54(3), 847–858. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00085.x>
24. Graham, R. A. (1957). A revision of *Oxygonum* (Polygonaceae-Polygoneae). *Kew Bulletin*, 12(1), 145–172. <https://doi.org/10.2307/4109117>
25. Hong, S. P., Oh, I. C., & De Craene, L. R. (2005). Pollen morphology of the genera *Polygonum* s. str. and *Polygonella* (Polygoneae: Polygonaceae). *Plant Systematics and Evolution*, (254), 13–30. <https://doi.org/10.1007/s00606-005-0334-4>. EDN: <https://elibrary.ru/DVOMYJ>
26. Lord, J. M. (2011). Flower and fruit. Morphology, ontogeny, phylogeny, function, ecology. *New Zealand Journal of Botany*, (49), 141–142. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2011.548764>
27. Reddy, N. P., Bahadur, B., & Kumar, P. V. (1977). Heterostyly in *Polygonum chinense* L. *Journal of Genetics*, 63(2), 79. <https://doi.org/10.1007/BF02984278>
28. Roth, I. (1977). *Fruits of angiosperms. Encyclopedia of plant anatomy*. Gebruder Borntraeger.
29. Small, J. K. (1895). *A monograph of the North American species of the genus Polygonum*. New Era Print. 168 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.15494>
30. Stanford, E. E. (1925). The inflorescence and flower-form in *Polygonum*, subgenus *Persicaria*. *Rhodora*, 27(315), 41–47. <https://doi.org/23297758>
31. Wodehouse, R. P. (1931). Pollen grains in the identification and classification of plants vi. Polygonaceae. *American Journal of Botany*, 18(9), 749–764. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1931.tb04946.x>

ВКЛАД АВТОРОВ

Малицкая Н.В.: Отбор образцов верхушечных частей соцветий по двум разновидностям. Учёт и исследование элементов продуктивности соцветий: количество, (шт./%) бутонов, цветков, сформированных плодов, созревших плодов

в восковой спелости. Контроль над сбором экспериментального материала. Выборка метеорологических условий за 2011–2016 гг.: средняя температура воздуха, °C; месячное количество осадков, мм, для расчета гидротермического коэффициента по Селянину Г.Т. (ГТК) за вегетационный период в условиях Акмолинской области на сайте <http://www.pogodaiklimat.ru>.

Кузнецова М.А.: Учёт и исследование элементов продуктивности соцветий: количество, (шт./%) бутонов, цветков, сформированных плодов, созревших плодов в полной спелости.

Выборка метеорологических условий за 2017–2021 гг.: средняя температура воздуха, °C; месячное количество осадков, мм, для расчета гидротермического коэффициента по Селянину Г.Т. (ГТК) за вегетационный период в условиях Акмолинской области на сайте <http://www.pogodaiklimat.ru>.

Острцова И.Б.: Выделение семенных категорий: выполненные, шуплые, необрадовавшиеся плоды в период их созревания. Отбор метеорологических условий за 2011–2016 гг.: средняя температура воздуха, °C; месячное количество осадков, мм, для расчета гидротермического коэффициента по Селянину Г.Т. (ГТК) за вегетационный период в условиях Акмолинской области на сайте <http://www.pogodaiklimat.ru>.

Жумабаева С.Е.: Обзорная часть материала по отечественной и зарубежной литературе. Сравнительная оценка размеров плодов, мм.

Шойкин О.Д.: Созревание плодов в динамике, (%) отмечал степень созревания плодов от восковой до полной спелости в календарной последовательности. Оформление списка литературы.

Аширбеков М.Ж.: Сравнительная оценка массы 1000 плодов, г; урожайности плодов, т/га. Обработка экспериментальных данных дисперсионным анализом, стандартная ошибка средней выборки.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Natalya V. Malitskaya: Sampling of the apical parts of inflorescences for two varieties. Recording and analysis of inflorescence productivity factors: number (pcs/%) of buds, flowers, formed fruits, and ripened fruits at wax stage. Supervision of experimental material collection.

Meteorological data for 2011–2016 were collected: average air temperature, °C; monthly precipitation, mm, for calculating the hydrothermal coefficient (HTC) according to G.T. Selyaninov for the growing season in the Akmola region, available at <http://www.pogodaiklimat.ru>.

Marina A. Kuznetsova: Recording and study of inflorescence productivity factors: number (pcs/%) of buds, flowers, formed fruits, and fully ripened fruits.

A selection of meteorological conditions for 2017–2021: average air temperature, °C; monthly precipitation, mm for calculating the hydrothermal coefficient (HTC) according to G.T. Selyaninov for the growing season in the Akmola region is available on the website <http://www.pogodaiklimat.ru>.

Idiya B. Ostretsova: Separation of seed categories: full-bodied, shrunken, and unformed fruits during the ripening period. Selection of meteorological conditions for 2011–2016: average air temperature, °C; monthly precipitation, mm for calculating the hydrothermal coefficient according to Selyaninov G.T. (HTC) for the growing season in the Akmola region on the website <http://www.pogodaiklimat.ru>.

Sara E. Zhumabayeva: A review of material from domestic and foreign literature. Comparative assessment of fruit sizes, mm.

Olzhas D. Shoykin: Fruit ripening dynamics (%): The degree of fruit ripening from waxy to full ripeness was measured in calendar sequence. References were compiled.

Mukhtar Zh. Ashirbekov: Comparative evaluation of a batch of 1000 fruits, g; fruit yield, t/ha. Experimental data processing by analysis of variance, standard error of the mean.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Малицкая Наталья Владимировна, к.с.-х.н., ст. преподаватель кафедры Агрономии и лесоводства

Некоммерческое акционерное общество «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»

ул. Александра Пушкина, 86, г. Петропавловск, 150000, Республика Казахстан

natali_gorec@mail.ru

Кузнецова Марина Алексеевна, к.с.-х.н., доцент кафедры Биология

Некоммерческое акционерное общество «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»

ул. Александра Пушкина, 86, г. Петропавловск, 150000, Республика Казахстан

mkuznecova_69@mail.ru

Острецова Идия Булатовна, к.б.н., профессор кафедры Химии и биотехнологии

Некоммерческое акционерное общество «Кокиетауский университет им. Шокана Уалиханова»

ул. Абая, 76, г. Кокиетау, 020000, Республика Казахстан

agrokgu@mail.ru

Жумабаева Сара Еркиновна, к.б.н., ассоциированный профессор кафедры биологии и методики преподавания
Некоммерческое акционерное общество «Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова»
ул. Абая, 76, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан
zhumabaeva@mail.ru

Шойкин Олжас Даулетжанович, к.с.-х.н., доцент кафедры агрохимии и почвоведения
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени Петра Столыпина»
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
od.shoykin@omgau.org

Аширбеков Мухтар Жолдыбаевич, д.с.-х.н., ст. научный сотрудник
Товарищество с ограниченной ответственностью «Казахский научно-исследовательский институт земледелия и растениеводства»
ул. Ерленесова, 1, п. Алматыбак, Алматинская область, 040909, Республика Казахстан
mukhtar_agro@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalya V. Malitskaya, Cand. Sci. (Agric.), Senior Lecturer, Department of Agronomy and Forestry
Kozybayev University
86, Pushkin Str., Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan
natali_gorec@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4382-2357>

Marina A. Kuznetsova, Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Biology
Kozybayev University
86, Pushkin Str., Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan
mkuznecova_69@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1743-182X>

Idiya B. Ostretsova, Cand. Sci. (Biol.), Professor of the Department of Chemistry and Biotechnology

Ualikhanov University

76, Abay Str., Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan

agrokgu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3268-4411>

Sara E. Zhumabayeva, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of Biology and Teaching Methodology Department

Ualikhanov University

76, Abay Str., Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan

zhumabaeva@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1119-3002>

Olzhas D. Shoykin, Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin

1, Institutskaya Ploshchad, Omsk, 644008, Russian Federation

od.shoykin@omgau.org

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8803-2645>

Mukhtar Zh. Ashirbekov, Doc. Sci. (Agric.), Senior Researcher

Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing

1, Erlepesova Str., Almatybak village, Almaty region, 040909, Republic of Kazakhstan

mukhtar_agro@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8843-6516>

Поступила 01.10.2025

После рецензирования 26.02.2026

Принята 02.03.2026

Received 01.10.2025

Revised 26.02.2026

Accepted 02.03.2026

**Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений /
Agricultural Chemistry, Soil Science,
Plant Protection and Quarantine**

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819)EDN: [LVJHXT](https://www.edn.ru/LVJHXT)

УДК 631.8:633.72 (631.415.2+631.415.8)



**Влияние кислотно-основных свойств бурой лесной
кислой почвы на урожайность зеленого чайного листа
(*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) сорта Колхида
в условиях субтропиков России**

А.В. Великий

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр
Российской академии наук», Сочи, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Чай – напиток, объединяющий миллиарды людей. Его мировое производство и потребление продолжает увеличиваться, несмотря на строгие ограничения к условиям к окружающей среды: специфический климат, уровень кислотности почвы и её минеральный состав. Благодаря своей высокой экономической ценности, площадь чайных плантаций в отдельных странах мира быстро расширяется. Установлено, что оптимальный диапазон pH почвы для выращивания растений чая составляет 4,5–6,0.

Однако выращивание чайных растений зачастую сопряжено с дополнительным подкислением почвенного покрова, что является нарастающей проблемой для таких стран, как Япония, Шри-Ланка, Руанда и Китай. С целью увеличения объемов производства чая в сельскохозяйственных угодьях часто применяют большое количество аммиачно-азотных удобрений, что способствует усилению кислотности почвы, особенно в условиях влажного климата. В контексте почвоведения, экологии и агрономии, закисление почвенного покрова представляет собой серьезную проблему для отрасли чаеводства в мировом масштабе.

Впервые в субтропической зоне России были изучены вопросы закисления почв чайных плантаций, в частности определение нижнего предела актуальной кислотности ($pH_{\text{КС}}$), являющегося оптимальным для нормального роста и разви-

тия растений чайных растений, а также выявлены закономерности между другими кислотно-основными свойствами почв и урожайностью зеленого чайного листа. Это позволит быстрее оценивать уровень чаепригодности земель, а также приведет к оптимизации минерального питания чайных плантаций.

Цель исследования. Определение закономерностей между кислотно-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)) в условиях субтропиков РФ.

Материалы и методы. Исследования были проведены в зоне Черноморского побережья Краснодарского края на чайной плантации сорта Колхида. Опыт включает 7 вариантов: контрольный и 6 вариантов с микроэлементами. С целью оценки влияния кислотно-основных свойств на урожайность чайного листа проводились отборы почвенных проб на глубину 0–20 см в осенний период. Лабораторные исследования выполнены по общепринятым методикам: pH_{KCl} – потенциометрически (ионметр pH-121, Россия); алюминий по Соколову; содержание обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+} – трилонометрически.

Результаты. Установлено, что снижение уровня кислотности почвы pH_{KCl} с 2,8 до 3,8 ед. приводит к росту урожайности чайного листа в 6–8 раз с 1400 кг/га до 11498 кг/га. В свою очередь увеличение уровня Al^{3+} в почве с 7,5 до 14,2 ммоль(экв)/100г напротив приводит к снижению урожайности чая в 3,5 раза. При повышении уровня содержания Ca^{2+} в почве с 1,0 до 5,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 3–4 раза, а при повышении уровня содержания Mg^{2+} в почве с 1,0 до 7,0 ммоль(экв)/100г – в 2,1 раза. В ходе детального изучения была получена модель кислотно-основных параметров почвы, что отражает в себе связи актуальной кислотности с другими почвенными характеристиками, в которой отображен механизм получения высоких урожаев чайного листа. Установлено значение в получении высоких урожаев чая около 4200 кг/га таких параметров как $Ca^{2+}+Mg^{2+}/pH_{KCl}$ и Ca^{2+}/Mg^{2+} при уровне 1,44 и 1,36 соответственно, а также выявлено, что при их уровне 1,54–2,15 и 1,33–1,63 соответственно прибавка урожая чая может составить от 1980 до 4120 кг/га.

Заключение. Полученные результаты показывают сложную взаимосвязь между кислотно-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа.

Ключевые слова: кислотность; урожайность; зеленый чайный лист; алюминий; кальций; магний

Для цитирования. Великий, А. В. (2026). Влияние кислотно-основных свойств бурой лесной кислой почвы на урожайность зеленого чайного листа (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) сорта Колхида в условиях субтропиков России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 254-276. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819>

The effect of acid-base properties of brown forest acid soil on the yield of green tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) of the Colchis variety in the subtropical conditions of the Russian Federation

A.V. Velikii

Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russian Federation

Abstract

Background. Tea is a drink that unites billions of people. Its global production and consumption continues to increase, despite strict restrictions on environmental conditions: the specific climate, the level of soil acidity and its mineral composition. Due to its high economic value, the area of tea plantations in some countries of the world is rapidly expanding. It has been established that the optimal pH range of the soil for growing tea plants is 4,5–6,0.

However, the cultivation of tea plants is often associated with additional acidification of the soil cover, which is an increasing problem for countries such as Japan, Sri Lanka, Rwanda and China. In order to increase tea production in agricultural lands, large amounts of ammonia-nitrogen fertilizers are often used, which helps to increase soil acidity, especially in humid climates. In the context of soil science, ecology and agronomy, acidification of the soil cover is a serious problem for the tea industry on a global scale.

For the first time in the subtropical zone of Russia, the issues of acidification of tea plantation soils were studied, in particular, the determination of the lower limit of actual acidity (pH_{KCl}), which is optimal for the normal growth and development of tea plants, and patterns between other acid-base properties of soils and the yield of green tea leaves were identified. This will make it possible to quickly assess the level of tea suitability of the lands, and will also lead to the optimization of the mineral nutrition of tea plantations.

Purpose. Determination of the patterns between the acid-base properties of brown forest acidic soil and the yield of tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)) in the subtropical conditions of the Russian Federation.

Materials and methods. The research was conducted in the area of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory on a Colchis tea plantation. The experience includes 7 options: control and 6 options with trace elements. In order to assess the effect of acid-base properties on the yield of tea leaves, soil samples were taken to a depth of 0-20 cm in the autumn period. Laboratory studies were performed according to generally accepted methods: pH_{KCl} – potentiometrically (ionometer pH-121, Russia); aluminum according to Sokolov; the content of exchange forms of Ca^{2+} and Mg^{2+} – trilometrically.

Results. It was found that a decrease in pH_{KCl} soil acidity from 2,8 to 3,8 units leads to a 6-8-fold increase in tea leaf yield from 1400 kg/ha to 11498 kg/ha. In turn, an increase in the level of Al^{3+} in the soil from 7,5 to 14,2 mmol(eq)/100g, on the contrary, leads to a 3,5-fold decrease in tea yield. With an increase in the level of Ca^{2+} in the soil from 1,0 to 5,0 mmol (eq)/100g, there was a tendency for yield growth by 3-4 times, and with an increase in the level of Mg^{2+} in the soil from 1,0 to 7,0 mmol(eq)/100g – by 2,1 times. In the course of a detailed study, a model of acid-base soil parameters was obtained, which reflects the relationship of current acidity with other soil characteristics, which reflects the mechanism of obtaining high yields of tea leaves. The importance of such parameters as $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{pH}_{\text{KCl}}$ and $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ at the level of 1,44 and 1,36, respectively, in obtaining high tea yields of about 4200 kg/ha was established, and it was also revealed that at their level of 1,54–2.15 and 1,33–1,63, respectively, the increase in tea yield can range from 1980 to 4120 kg/ha.

Conclusion. The results obtained show a complex relationship between the acid-base properties of acidic brown forest soil and the yield of tea leaves.

Keywords: acidity; yield; green tea leaves; aluminum; calcium; magnesium

For citation. Velikii, A. V. (2026). The effect of acid-base properties of brown forest acid soil on the yield of green tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) of the Colchis variety in the subtropical conditions of the Russian Federation. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 254-276. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819>

Введение

Почва является основным элементом сельскохозяйственного производства для обеспечения человечества продуктами питания [12; 20]. В агрохимии и почвоведении одним из важнейших показателей для оценки продуктивной способности почвы является pH почвы [11; 28], оказывающий непосредственное воздействие на развитие растений [11]. Обширные территории, приблизительно 3,9 миллиарда гектаров, характеризуются как кислые почвы, составляя 30% от общей площади суши [35]. При этом повышенная кислотность почвы негативно влияет на рост и развитие сельскохозяйственных культур, так как приводит к повышенным концентрациям токсичного алюминия (Al^{3+}) и марганца (Mn), и к снижению необходимых для растений кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}) и калия (K^{+}) [18].

Использование удобрений для повышения содержания питательных веществ, повысило урожайность сельскохозяйственных культур во всем мире, однако нерациональное управление системами минерального питания привело к значительному подкислению почвы, что негативно сказалось на урожайности, особенно в Китае [16; 43]. На сегодняшний день по

оценкам ученых в результате не правильного применения минеральных удобрений около половины пахотных земель в мире перешли в категорию кислых с $\text{pH} \leq 6,5$ [14]. Снижение pH почвы приводит к недоступности важных для растений элементов, таких как фосфор, калий, кальций и магний, изменяет структуру и функции почвенных микроорганизмов [13; 17], при этом увеличивает доступность токсичных тяжелых металлов (например, кадмия и свинца) и других вредных элементов (например, алюминия и марганца), особенно при уровнях pH ниже 4,5 [31; 38].

В агросистемах с интенсивным земледелием подкисление почв в основном провоцируется не только избыточным внесением удобрений, в особенности азотных [32; 41], но также является результатом удаления продуктов и вымывания N, P, K и Mg из корневой зоны растений [15; 40].

Чай – напиток, объединяющий миллиарды людей. Его мировое производство и потребление продолжает увеличиваться, несмотря на строгие ограничения к условиям к окружающей среды: специфический климат, уровень кислотности почвы и её минеральный состав [2-4; 8; 24; 27; 34]. Благодаря своей высокой экономической ценности, площадь чайных плантаций в отдельных странах мира быстро расширяется [30]. Установлено, что оптимальный диапазон pH почвы для выращивания растений чая составляет 4,5–6,0 [33]. Рост чайных растений постепенно снижается, когда pH почвы превышает 6,5, и они погибают, когда pH превышает 7,0 [29]. При pH ниже 4,0 рост чайных растений также замедляется, что влияет как на качество чайного сырья, так и на его урожайность [29]. При этом в Китае, самом главном производителе чая, средний показатель pH почвы на чайных плантациях составлял 4,68 по всей стране, а диапазон его варьирования был от 3,96 до 5,48 в разных провинциях [39].

Выращивание чайных растений зачастую сопряжено с дополнительным подкислением почвенного покрова, что является нарастающей проблемой для таких стран, как Япония [23], Шри-Ланка, Руанда [22] и Китай [10; 19].

С целью увеличения объемов производства чая в сельскохозяйственных угодьях часто применяют большое количество аммиачно-азотных удобрений [26]. Кроме того, чайные кусты обладают высокой способностью к активному поглощению алюминия (Al) из грунта, концентрируя значительную его часть в листьях [25]. Этот процесс биогеохимической циркуляции Al в системе «чай-почва» способствует усилению кислотности почвы, особенно в условиях влажного климата [37]. В контексте почвоведения, экологии и агрономии, закисление почвенного покрова представляет собой серьезную проблему для отрасли чаеводства в мировом масштабе.

В современном мире для стабильного и устойчивого развития сельскохозяйственного хозяйства и решения задач в рамках продовольственной безопасности в условиях роста населения на планете и возрастания потребностей в пище крайне важно предпринимать меры по снижению кислотности почв [42].

Основным регионом культивирования чая (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) в Российской Федерации является влажная субтропическая зона Черноморского побережья Краснодарского края [2; 3; 8]. Однако в последние годы отмечается ухудшение состояния земель занятых чайными плантациями [3; 7], в частности вызванное сильным подкислением этих почв. Несмотря на то, что чайные растения являются ацидофильными нижний предел актуальной кислотности, являющийся оптимальным для нормального роста и развития растений не установлен. Установление этого параметра, а также выявление закономерностей между другими кислотнo-основными свойствами почв на чайных плантациях поможет более четко определить влияние этих параметров на урожайность зеленого чайного листа. В итоге это позволит быстрее проверять уровень чаепригодности земель, а также приведет к оптимизации минерального питания чайных плантаций.

Целью исследования было определение закономерностей между кислотнo-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)) в условиях субтропиков РФ.

Материалы и методики исследования

Исследования были проведены на Черноморском побережье Краснодарского края на многолетнем опытном участке, который является частью производственной плантации ЗАО «Дагомысчай» (Краснодарский край, г. Сочи, Лазаревский район, поселок Уч-Дере, 43°69'N, 39°64'E) и в 1983 году был засажен интенсивным районированным сортом Колхида. Климат региона - влажный субтропический со среднегодовой температурой в пределах 12,8–16,5 °C, годовое количество осадков 1313–2098 мм. В опыте почвы относились к категории бурых лесных кислых окультуренных почв [5; 36].

Изучение микроэлементов в рамках действующего опыта было начато в 2003 году. Опыт включает 7 вариантов: контрольный и 6 вариантов с микроэлементами, которые вносились в почву в виде чистых солей. Вариант смесь – это совместное внесение сульфата цинка, сульфата магния и борной кислоты, в дозах каждого из вариантов. Схема опыта (в кг д. в. / га): 1) контроль – N240P70K90; 2) сульфат магния (MgSO₄) – Mg60; 3) кристаллическая сера (S1000), оба эти варианта с 2015 года изучаются в

последствия; 4) сульфат цинка (ZnSO_4) – $\text{Zn}_{4,3}$, с 2017 года изучается в последствии в связи с увеличением подвижного цинка в почве в 2–4 раза; 5) борная кислота (H_3BO_3) – B_6 ; 6) смесь $\text{Zn} + \text{B} + \text{Mg}$ (4,3; 6; 60, соответственно); 7) кальцийсодержащий природный материал (40–50 % CaO) вносится в количестве 250 кг/га [3]. Площадь чайных делянок – 10 м^2 , повторность трехкратная. Каждый год эти вещества вносили на едином фоне $\text{N}_{240}\text{P}_{70}\text{K}_{90}$ кг д. в. / га в весенний период с заделкой в верхний слой почвы. Дозы мезо- (Mg , Ca) и микроэлементов (Zn , B) подобраны с учетом результатов, полученных в полевых опытах в условиях Западной Грузии [4; 9]. Исследования проводились на выровненном агрофоне, содержание подвижных форм фосфора и калия согласно грациям обеспеченности почв находилось на высоком уровне. С 2022 г. на всех вариантах изучается эффект последствия от вносимых ранее микроэлементов.

С целью оценки влияния кислотно-основных свойств на урожайность чайного листа проводились отборы почвенных проб на глубину 0–20 см в осенний период. Лабораторные исследования выполнены по общепринятым методикам [1]: pH_{KCl} – потенциметрически (ионметр pH -121, Россия); алюминий по Соколову; содержание обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+} – трилонометрически. Обобщение данных, полученных в период 2010–2023 гг., проведено с помощью Microsoft Excel и методов статистической обработки в программе Statistica 10.

Результаты исследования и обсуждение

Кислотно-основное состояние почв является определяющим показателем её чаепригодности и уровня плодородия применительно к ацидофильной культуре чая [4; 7], поэтому при подборе системы минерального питания важен контроль комплекса этих показателей. Исследования показали, что через 7 лет применения макроудобрений (с 2003 по 2010 гг.), а также макроудобрений в различных сочетаниях с микроэлементами отмечалось существенное подкисление почв на 0,5–1,0 ед. в сравнении с её исходными значениями (pH_{KCl} 3,75±0,14 до закладки опыта) [3], что привело к изучению взаимосвязей кислотно-основных свойств почв и урожайности чайного листа.

В результате исследований было установлено, что наиболее значимыми показателями кислотно-основных свойств бурых лесных почв являются: актуальная кислотность (pH_{KCl}), подвижный алюминий Al^{3+} , сумма поглощенных оснований $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, так как они отражают уровень её плодородия и являются основой критерия чаепригодности почв [3]. В ходе многолетних исследований (2011–2023) эффективности внесения биоген-

ных элементов (S, Mg, Ca, B, Zn) на чайной плантации проводился постоянный мониторинг этих показателей, что позволило собрать достаточный объём данных для анализа влияния каждого из представленных параметров почвы на урожайность чайного листа, и установления суммарных закономерностей взаимодействия всех показателей (рис. 1–3, табл. 1–2.).

Растения чая относятся к ацидофилам, растениям, произрастающим исключительно на почвах с низкими значениями кислотности, однако и у них имеются как оптимальные, так и неблагоприятные, а порой и экстремальные условия для произрастания. В ходе анализа влияния кислотности почвы на урожайность зеленого чайного листа была установлена обратная зависимость между изучаемыми параметрами (рис. 1а). Так при снижении уровня кислотности почвы с 2,8 до 3,8 ед. отмечена явная тенденция к росту урожайности чайного листа в 6–8 раз (рис. 1а).

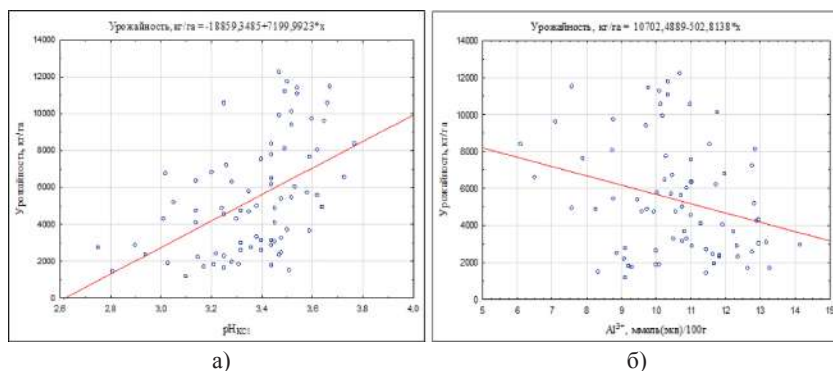


Рис. 1. Урожайность чайного листа в зависимости от уровня pH_{KCl} (а) и подвижного алюминия Al^{3+} (б) в бурой лесной кислой почве в 2012–2023 гг.

Fig. 1. Tea leaf yield as a function of pH_{KCl} (a) and available aluminum (Al^{3+}) (b) in brown forest acidic soil during 2012–2023.

В почвах чайных плантаций содержится повышенное количество подвижного алюминия, что является вторым фактором определяющим уровень её чаепригодности. Однако дополнительное подкисление почвы приводит к росту содержания ионов алюминия, что может быть причиной снижения урожая чайного листа. В ходе анализа многолетних данных была установлена обратная зависимость между содержанием подвижного алюминия Al^{3+} в почве и урожайностью чайного листа. Увеличение уровня Al^{3+} в почве с 7,5 до 14,2 ммоль(экв)/100г приводит к резкому снижению урожайности чая в 3,5 раза (рис. 1б).

Изучение актуальной кислотности (pH_{KCl}) и подвижного алюминия Al^{3+} в почве чайной плантации позволило сгруппировать данные о кислотных свойствах почвы по уровням и выделить ряд закономерностей при формировании урожайности чайного листа (табл. 1).

Для показателя pH_{KCl} было выделено 5 групп с шагом 0,2 ед. от 2,8 до 3,8 ед. (табл. 1). Минимальная урожайность, а также минимальный диапазон и прибавка чайного листа получена в 1ой группе при уровне pH_{KCl} от 2,8 до 3,0 ед., максимальная урожайность получена в 5ой группе при уровне pH_{KCl} от 3,6 до 3,8 ед., прибавка средней урожайности между ними составила 5996 кг/га (табл. 1). В целом в каждой следующей группе прослеживается четкая тенденция роста урожайности чайного листа по сравнению с показателями предыдущей группы. Стоит отметить, что в группах 3–5 при уровне pH_{KCl} от 3,2 до 3,8 ед. для отдельных вариантов максимальная урожайность составила более 10000 кг/га, а для 5 группы минимальная урожайность составила 4926 кг/га (табл. 1). Полученные результаты в целом показывают, что почвы с кислотность ниже 3,0 ед. малопригодны для выращивания чая из-за получения не высоких урожаев чайного листа.

Таблица 1.

Урожайность чайного листа в зависимости от уровней pH_{KCl} и подвижного алюминия Al^{3+} в бурой лесной кислой почве

Table 1. Tea Leaf Yield as a Function of pH_{KCl} Levels and Available Aluminum (Al^{3+}) in Brown Forest Acidic Soil

Показатели урожайности, кг/га	Уровень оценочного показателя				
pH _{KCl} , ед					
уровень pH _{KCl}	2,8-3,0	3,0-3,2	3,2-3,4	3,4-3,6	3,6-3,8
средняя+станд. откл.	2324±657	3826±1999	4202±2258	6183±3314	8320±2258
прибавка	-	1502	377	1980	2137
диапазон	14,00-28,72	11,75-67,18	1638-10577	1487-12238	4926-11498
медиана	2512	4177	4250	5682	8393
Al ³⁺ , ммоль(экв)/100г					
уровень Al ³	6,0-9,0	9,0-12,0	12,0-15,0	-	-
средняя+станд. откл.	6442±2848	5543±3274	3780±1929	-	-
прибавка	-	-899	-1763	-	-
диапазон	1487-11498	1175-12238	1631-8136	-	-
медиана	5987	4982	3060	-	-

Для подвижного алюминия Al^{3+} в ходе анализа было выделено 3 группы с шагом 3,0 ммоль(экв)/100г от 6,0 до 15,0 (табл. 1). Максимальная урожайность чайного листа получена в 1ой группе при содержании подвижного алюминия Al^{3+} от 6,0 до 9,0 ммоль(экв)/100г, минимальная урожайность получена в 3ой группе при содержании подвижного алюминия Al^{3+} от 9,0 до 12,0 ммоль(экв)/100г, снижение урожайности между ними составило -2662 кг/га (табл. 1).

Основные свойства в бурой лесной кислой почве в первую очередь выполняют поглощенные её основания (Ca^{2+} , Mg^{2+}), как сами по себе (рис. 2а и 2б), так и их общая сумма ($Ca^{2+}+Mg^{2+}$) (рис. 3). В ходе анализа была установлена прямая зависимость между содержанием Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве и урожайностью чайного листа. Так при повышении уровня содержания Ca^{2+} в почве с 1,0 до 5,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 3–4 раза (рис. 2а), а при повышении уровня содержания Mg^{2+} в почве с 1,0 до 7,0 ммоль(экв)/100г – 2,1 раза (рис. 2б).

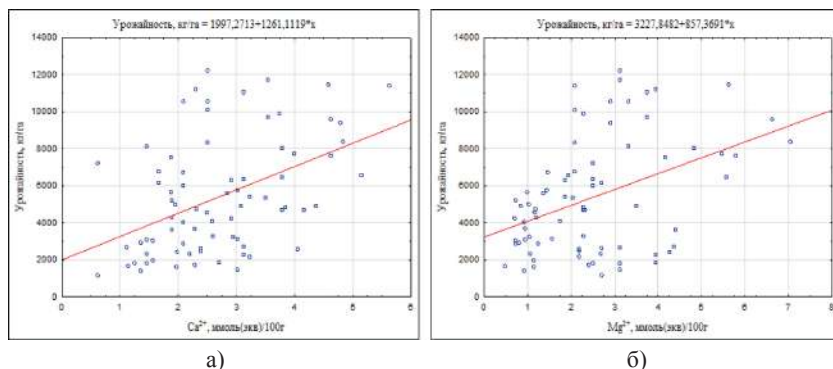


Рис. 2. Урожайность чайного листа в зависимости от уровня Ca^{2+} (а) и Mg^{2+} (б) в бурой лесной кислой почве в 2012–2023 гг.

Fig. 2. Tea leaf yield as a function of Ca^{2+} (a) and Mg^{2+} (b) levels in brown forest acidic soil during 2012–2023.

Однако практически поглощенные основания всегда рассматриваются в виде общей суммы $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, что обусловлено простотой анализа, а также тем фактом, что в течение долгого времени эти биогенные элементы не считались необходимыми для чайного растения ввиду его ацидофильности, что привело к их существенному выщелачиванию из почвенного профиля [5; 21]. Тем не менее, анализ урожайности и суммы оснований показал наличие между ними прямой связи. Так при повышении суммы

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве с 2,0 до 12,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 4,0 раза (рис. 3).

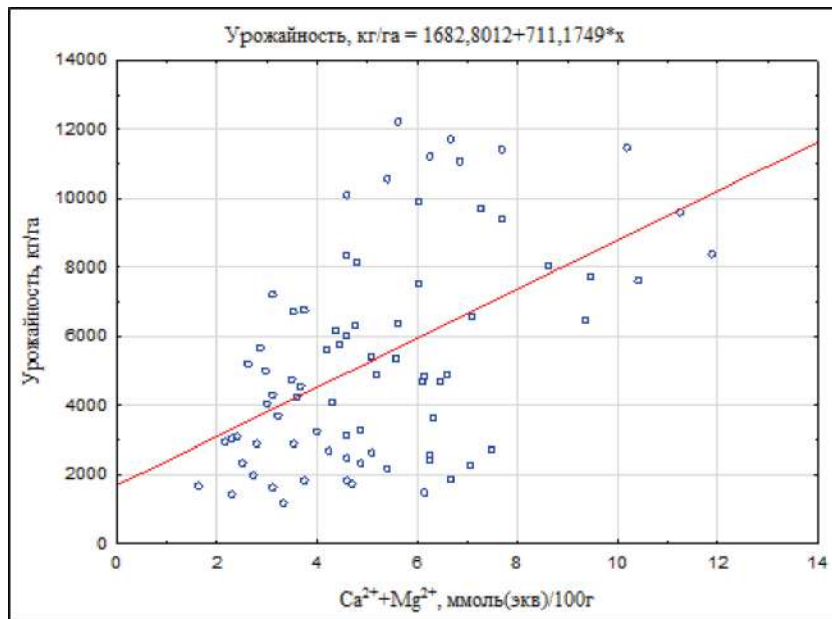


Рис. 3. Урожайность чайного листа в зависимости от суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в бурой лесной кислой почве в 2012–2023 гг.

Fig. 3. Tea leaf yield as a function of the sum of $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in brown forest acidic soil during 2012–2023.

Изучение поглощенных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) в почве чайной плантации позволило сгруппировать данные об основных свойствах почвы по уровням и выделить ряд закономерностей при формировании урожайности чайного листа (табл. 2). Для показателей Ca^{2+} , Mg^{2+} было выделено 3 группы с шагом 2 от 0 до 6 ммоль(экв)/100г (табл. 2). Для обоих параметров минимальная урожайность, а также минимальный диапазон и прибавка чайного листа получена в 1ой группе, максимальная урожайность получена в 3ой группе, а прибавка средней урожайности между 3 и 1 группой составила 3862 кг/га для Ca^{2+} и 2851 кг/га для Mg^{2+} (табл. 2). Можно отметить и тот факт, что в группах 1–2 средняя урожайность чайного листа в зависимости содержания Mg^{2+} в почве несколько выше, чем от содержания Ca^{2+} .

Таблица 2.

**Урожайность в зависимости от уровней Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
в бурой лесной кислой почве**

**Table 2. Yield as a Function of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ Concentrations
in Brown Forest Acidic Soil**

Показатели урожайности, кг/га	Уровень оценочного показателя		
Ca ²⁺ , ммоль(экв)/100г			
уровень pH _{KCl} , ед	0-2,0	2,0-4,0	4,0-6,0
средняя + станд. откл.	3812±2200	5688±3132	7674±2974
прибавка	-	1876	1986
диапазон	1175-7554	1487-12238	2584-11433
медиана	3020	4862	8014
Mg ²⁺ , ммоль(экв)/100г			
уровень Al ³⁺ , ммоль(экв)/100г	0-2,0	2,0-4,0	4,0-8,0
средняя + станд. откл.	4035±1530	5998±3660	6886±2858
прибавка	-	1963	888
диапазон	1400-6718	1175-12238	2422-11498
медиана	4076	5366	7635
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ , ммоль(экв)/100г			
уровень Ca ²⁺ +Mg ²⁺ , ммоль(эк- в)/100г	0-4	4-8	8-14
средняя + станд. откл.	3690±1741	5846±3316	8482±1627
прибавка	-	2156	2636
диапазон	1175-7214	1487-12238	6459-11498
медиана	3261	5366	8035
отношение Ca ²⁺ +Mg ² /pH _{KCl}	0,93	1,67	2,82
отношение Ca ²⁺ /Mg ²⁺	1,80	1,27	0,74

Для показателя $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ также было выделено 3 группы с шагом 4 от 0 до 14 ммоль(экв)/100г (табл. 1). Изучение суммы поглощенных оснований показало наличие тех же закономерностей, что и при изучении каждого катиона в отдельности. Прибавка средней урожайности между 3 и 1 группой составила 4792 кг/га. Также был проведен сравнительный анализ, который позволил выявить соотношение поглощенных катионов друг к другу, а также суммы оснований к кислотности почвы и сопоставить их с урожайностью чайного листа. Так при отношении $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{pH}_{\text{KCl}}=0,93$ и отношении $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}=1,80$ была получена низкая урожайность чайного листа в пределах 3690 кг/га. Оптимальными будут считаться отношение $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{pH}_{\text{KCl}}=1,67$ и отношение $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}=1,27$, при которых средняя

урожайность составит порядка 5846 кг/га, а в благоприятные по метеорологическим условиям годы 12238 кг/га.

Изучение актуальной кислотности (pH_{KCl}) и подвижного алюминия Al^{3+} , поглощенных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$) в почве чайной плантации позволило сгруппировать данные о кислотно-основных свойствах почвы по уровням и выделить ряд закономерностей при формировании урожайности чайного листа (табл. 3). Так как большинство кислотно-основных параметров имеют высокую вариабельность, то группировка данных проводилась по показателю pH_{KCl} , в котором ранее было выделено 5 групп с шагом 0,2 ед. от 2,8 до 3,8 ед. (табл. 3). В результате группировки была получена модель кислотно-основных параметров как механизм обеспечения урожайности чайного листа в бурой лесной кислой почве. Анализ модели показал, что все отмеченные ранее закономерности не только сохраняются, но и связаны друг с другом. Так при снижении актуальной кислотности (pH_{KCl}) отмечено снижение содержания алюминия (Al^{3+}) в почве и повышение суммы катионов кальция и магния ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$), что совместно отразилось и на повышении урожайности чайного листа.

Таблица 3.

Модель кислотно-основных параметров как механизм обеспечения урожайности чайного листа в бурой лесной кислой почве

Table 3. A Model of Acid-Base Parameters as a Mechanism for Ensuring Tea Leaf Yield in Brown Forest Acidic Soil

Параметры урожайности, кг/га	Уровень оценочного показателя				
	pH_{KCl} , ед				
уровень pH_{KCl}	2,8-3,0	3,0-3,2	3,2-3,4	3,4-3,6	3,6-3,8
уровень Al^{3+} , ммоль(экв)/100г	11,44-12,35	9,10-12,96	9,13-13,26	7,89-13,17	6,10-10,74
среднее Al^{3+} , ммоль(экв)/100г	11,89±0,51	11,01±1,43	11,20±1,41	10,55±1,34	8,14±1,58
уровень $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, ммоль(экв)/100г	2,28-4,87	1,62-6,65	2,16-7,49	2,28-10,4	4,2-11,87
среднее $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, ммоль(экв)/100г	3,55±1,21	3,97±1,53	4,72±1,58	5,36±2,01	7,90±2,76
уровень $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{pH}_{\text{KCl}}$	1,24	1,28	1,44	1,54	2,15
уровень $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	1,38	1,5	1,36	1,33	1,63
средняя урожайность, кг/га	2324±657	3826±1999	4202±2258	6183±3314	8320±2258

прибавка урожайности, кг/га	-1878	-376	-	1981	4118
диапазон урожайности, кг/га	1400-2872	1175-6718	1638-10577	1487-12238	4926-11498
медианная урожайность, кг/га	2512	4177	4250	5682	8393

Установлено значение в получении высоких урожаев чая около 4200 кг/га таких параметров как $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{pH}_{\text{KCl}}$ и $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ при уровне 1,44 и 1,36 соответственно, а также выявлено, что при их уровне 1,54–2,15 и 1,33–1,63 соответственно прибавка урожая чая может составить от 1980 до 4120 кг/га.

Заключение

Полученные результаты показывают сложную взаимосвязь между кислотнo-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа. Установлено, что наиболее значимыми показателями кислотных свойств бурых лесных почв являются: актуальная кислотность (pH_{KCl}) и подвижный алюминий Al^{3+} . Так отмечено, что снижение уровня кислотности почвы pH_{KCl} с 2,8 до 3,8 ед. приводит к росту урожайности чайного листа в 6–8 раз с 1400 кг/га до 11498 кг/га. В свою очередь увеличение уровня Al^{3+} в почве с 7,5 до 14,2 ммоль(экв)/100г напротив приводит к резкому снижению урожайности чая в 3,5 раза. Основные свойства в бурой лесной кислой почве в первую очередь выполняют поглощенные её основания (Ca^{2+} , Mg^{2+}), а также их сумма ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$). В ходе анализа было установлено, что при повышении уровня содержания Ca^{2+} в почве с 1,0 до 5,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 3–4 раза, а при повышении уровня содержания Mg^{2+} в почве с 1,0 до 7,0 ммоль(экв)/100г – 2,1 раза. Для каждого параметра бала проведена группировка по уровням, которая продемонстрировала наглядный рост или снижение урожайности при изменении параметров. В ходе детального изучения была получена модель кислотнo-основных параметров почвы, что отражает в себе связи актуальной кислотности с другими почвенными характеристиками, в которой отображен механизм получения высоких урожаев чайного листа. Установлено значение в получении высоких урожаев чая около 4200 кг/га таких параметров как $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{pH}_{\text{KCl}}$ и $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ при уровне 1,44 и 1,36 соответственно, а также выявлено, что при их уровне 1,54–2,15 и 1,33–1,63 соответственно прибавка урожая чая может составить от 1980 до 4120 кг/га.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ ШЦ РАН FGRW-2024-0001, № государственной регистрации 124022000098-6.

Список литературы

1. Агрохимические методы исследования почв. (1975). В А. В. Соколов (Отв. ред.), *Агрохимические методы исследования почв*. Москва: Наука. 759 с.
2. Белоус, О. Г. (2006). *Микроэлементы на чайных плантациях субтропиков России*. Краснодар: КГАУ. 164 с.
3. Великий, А. В. (2022). *Влияние корневого применения биогенных элементов (Mg, Ca, B, Zn) на плодородие бурых лесных кислых почв, урожай и качество зелёного чайного листа в условиях влажных субтропиков России* (Диссертация на соискание степени кандидата сельскохозяйственных наук). Краснодар. 219 с.
4. Дараселия, М. К., Воронцов, В. В., Гвасалия, В. П., & Цанава, В. П. (1989). *Культура чая в СССР*. Тбилиси: Мецниереба. 558 с. ISBN 5-520-00355-6.
5. Классификация и диагностика почв СССР. (1977). В В. В. Егоров, В. М. Фридланд, Е. И. Иванова и др. (Авт.-сост.), *Классификация и диагностика почв СССР*. Москва: Колос. 223 с.
6. Малюкова, Л. С., Притула, З. В., Козлова, Н. В., Великий, А. В., Керимзаде, В. В., & Самарина, Л. С. (2016). О формировании устойчивости у растений чая (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) при недостаточном водообеспечении на фоне корневого внесения кальция в виде природного удобрения. *Сельскохозяйственная биология*, 51(5), 673–679. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.673eng>. EDN: <https://elibrary.ru/WZJQIT>
7. Малюкова, Л. С., Притула, З. В., Козлова, Н. В., & Великий, А. В. (2020). Влияние кальцийсодержащего природного материала на состояние бурых лесных кислых почв и растений чая (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) в субтропиках России. *Агрохимия*, (12), 3–10. <https://doi.org/10.31857/S0002188120120054>. EDN: <https://elibrary.ru/JQYEKP>
8. Рындин, А. В. (2016). *Агроэкологические аспекты садоводства влажных субтропиков России*. Сочи. 260 с. EDN: <https://elibrary.ru/YQQIFF>
9. Шавишвили, Л. М. (1973). *Влияние магния и микроэлементов B, Zn, Co и Mo на некоторые физиолого-биохимические процессы чайного растения* (Автореферат диссертации на соискание степени кандидата наук). Тбилиси. 26 с.
10. Alekseeva, T., Alekseev, A., Xu, R. K., Zhao, A. Z., & Kalinin, P. (2011). Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of

- Alfisols in eastern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(2), 137–148. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9327-5>. EDN: <https://elibrary.ru/OIAZQV>
11. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *Elements of the nature and properties of soils* (13th ed.). Upper Saddle River. pp. 662–710.
 12. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality — A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. EDN: <https://elibrary.ru/YEFIST>
 13. Chen, D., Lan, Z., Bai, X., Grace, J. B., & Bai, Y. (2013). Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 101(5), 1322–1334. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12119>
 14. Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., & Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification — A critical review. *Science of the Total Environment*, 581, 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>
 15. Duan, L., Huang, Y., Hao, J., Xie, S., & Hou, M. (2004). Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification. *Science of the Total Environment*, 330(1–3), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.035>
 16. Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W. T., Vitousek, P. M., & Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
 17. Hao, T., Zhu, Q., Zeng, M., Shen, J., Shi, X., Liu, X., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. *Journal of Environmental Management*, 270, 110888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQRXHT>
 18. Joris, H. A. W., Caires, E. F., Bini, A. R., Scharr, D. A., & Haliski, A. (2013). Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. *Plant and Soil*, 365(1), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1413-2>. EDN: <https://elibrary.ru/HFEOYF>
 19. Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Lu, J. Y. (2000). Soil pHs in the tea gardens in Jiangsu, Zhejiang, and Anhui provinces and changes of soil pH in the past decade. *Chinese Journal of Soil Science*, 31(5), 205–207.
 20. Maharjan, B., Das, S., & Acharya, B. S. (2020). Soil health gap: A concept to establish a benchmark for soil health management. *Global Ecology and Conservation*,

- 23, e01116. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01116>. EDN: <https://elibrary.ru/UNDNIX>
21. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., Velikiy, A. V., Rogozhina, E. V., Kerimzade, V. V., & Samarina, L. S. (2021). Effects of calcium-containing natural fertilizer on *Camellia Sinensis* (L.) Kuntze. *Bangladesh Journal of Botany*, 50(1), 179–187. <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i1.52686>. EDN: <https://elibrary.ru/IJLJRS>
22. Mupenzi, J. P., Li, L., Ge, J., Varennyam, A., Habiyaemye, G., Theoneste, N., & Emmanuel, K. (2011). Assessment of soil degradation and chemical compositions in Rwandan tea-growing areas. *Geoscience Frontiers*, 2(4), 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.003>
23. Oh, K., Kato, T., Li, Z. P., & Li, F. Y. (2006). Environmental Problems From Tea Cultivation in Japan and a Control Measure Using Calcium Cyanamide. *Pedosphere*, 16(6), 770–777. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60113-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60113-6)
24. Pan, Zhu-Cai. (2015). Effect of boron and magnesium fertilization on tea yield, quality and soil fertility of red-soil tea plantations. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 30(9), 877–883.
25. Ruan, J. Y., & Wang, M. H. (2001). Accumulation of fluoride and aluminum related to different varieties of tea plant. *Environmental Geochemistry and Health*, 23(1), 53–63. <https://doi.org/10.1023/A:1011082608631>. EDN: <https://elibrary.ru/AMPIQD>
26. Ruan, J. Y., Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Zhang, F. S. (2004). Effects of litter incorporation and nitrogen fertilization on the contents of extractable aluminum in the rhizosphere soil of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Plant and Soil*, 263(1), 283–296. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047744.44940.96>. EDN: <https://elibrary.ru/VRXGNB>
27. Samarina, L., Malyukova, L., Wang, S., Li, Y., Doroshkov, A., Bobrovskikh, A., et al. (2024). Nitrogen deficiency differentially affects lignin biosynthesis genes and flavanols accumulation in tolerant and susceptible tea genotypes (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze). *Plant Stress*, 14, 100581. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100581>. EDN: <https://elibrary.ru/TRQWKD>
28. Simek, M., & Cooper, J. E. (2002). The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science*, 53(3), 345–354. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00461.x>
29. Su, H. G. (2012). The improvement measures of soil acidification in tea garden in Anxi. *Guangdong Tea Industry*, 1, 31–32.
30. Su, S., Zhou, X., Wan, C., Li, Y., & Kong, W. (2015). Land use changes to cash crop plantations: Crop types, multilevel determinants and policy implications. *Land Use Policy*, 50, 379–389.

31. Sun, X., Li, Z., Wu, L., Christie, P., Luo, Y., & Fornara, D. A. (2019). Root-induced soil acidification and cadmium mobilization in the rhizosphere of *Sedum plumbizincicola*: Evidence from a high-resolution imaging study. *Plant and Soil*, 436(1), 267–282. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w>. EDN: <https://elibrary.ru/GPIAAP>
32. Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
33. USEPA. (2008). *Registering pesticides*. Washington, D.C. pp. 11–26.
34. Velikii, A. V. (2024). The effectiveness of the combined use of zinc, boron, and magnesium on tea plantations in the humid subtropics of Russia. *BIO Web of Conferences*, 139, 04001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413904001>. EDN: <https://elibrary.ru/UROSKH>
35. Von Uexküll, H. R., & Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 171(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>. EDN: <https://elibrary.ru/MROKFZ>
36. Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (World Soil Resources Reports No. 106). FAO. Rome. 181 p.
37. Wang, H., Xu, R. K., Wang, N., & Li, X. H. (2010). Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China. *Pedosphere*, 20(6), 799–806. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60070-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60070-7)
38. Wu, C., Luo, Y., Deng, S., Teng, Y., & Song, J. (2014). Spatial characteristics of cadmium in topsoils in a typical e-waste recycling area in southeast China and its potential threat to shallow groundwater. *Science of the Total Environment*, 472, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.084>
39. Yan, P., Wu, L., Wang, D., Fu, J., Shen, C., Li, X., Zhang, L., Zhang, L., Fan, L., & Wenyan, H. (2020). Soil acidification in Chinese tea plantations. *Science of the Total Environment*, 715, 136963. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136963>. EDN: <https://elibrary.ru/DBUZMF>
40. Yang, X. D., Ni, K., Shi, Y. Z., Yi, X. Y., Zhang, Q. F., Fang, L., & Ruan, J. Y. (2018). Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.004>. EDN: <https://elibrary.ru/YJXFUZ>
41. Zeng, M. F., De Vries, W., Bonten, L. T. C., Zhu, Q. C., Hao, T. X., Liu, X. J., Xu, M. G., Shi, X. J., Zhang, F. S., & Shen, J. B. (2017). Model-based analysis of the long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification. *Environmental Science & Technology*, 51(7), 3843–3851. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05491>

42. Zhang, Q., Zhu, J., Wang, Q., Xu, L., Li, M., Dai, H., Mulder, J., Xi, Y., & He, N. (2022). Soil acidification in China's forests due to atmospheric acid deposition from 1980 to 2050. *Science Bulletin*, 67(9), 914–917. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/AWUIOZ>
43. Zhu, Q., Liu, X., Hao, T., Zeng, M., Shen, J., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Crop-land acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China. *Environmental Pollution*, 256, 113145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113145>. EDN: <https://elibrary.ru/UQWKRC>

References

1. *Agrochemical Methods for Soil Analysis*. (1975). In A. V. Sokolov (Ed.), *Agrochemical Methods for Soil Analysis*. Moscow: Nauka. 759 p.
2. Belous, O. G. (2006). *Microelements in Tea Plantations of the Russian Subtropics*. Krasnodar: KGAU. 164 p.
3. Velikiy, A. V. (2022). *The Effect of Root Application of Biogenic Elements (Mg, Ca, B, Zn) on the Fertility of Acid Brown Forest Soils, Yield, and Quality of Green Tea Leaves in the Humid Subtropical Conditions of Russia* [Doctoral dissertation, Candidate of Agricultural Sciences]. Krasnodar. 219 p.
4. Daraselia, M. K., Vorontsov, V. V., Gvasalia, V. P., & Tsanova, V. P. (1989). *Tea Cultivation in the USSR*. Tbilisi: Metsniereba. 558 p. ISBN 5-520-00355-6.
5. *Classification and Diagnostics of Soils of the USSR*. (1977). In V. V. Egorov, V. M. Fridland, E. I. Ivanova, et al. (Comps.), *Classification and Diagnostics of Soils of the USSR*. Moscow: Kolos. 223 p.
6. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., Velikiy, A. V., Kerimzade, V. V., & Samarina, L. S. (2016). Formation of drought resistance in tea plants (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) under insufficient water supply with root application of calcium as a natural fertilizer. *Agricultural Biology*, 51(5), 673–679. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.673eng>. EDN: <https://elibrary.ru/WZJQIT>
7. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., & Velikiy, A. V. (2020). The effect of a calcium-containing natural material on the state of acid brown forest soils and tea plants (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) in the subtropics of Russia. *Agrochemistry*, (12), 3–10. <https://doi.org/10.31857/S0002188120120054>. EDN: <https://elibrary.ru/JQYEKP>
8. Ryndin, A. V. (2016). *Agroecological Aspects of Horticulture in the Humid Subtropics of Russia*. Sochi. 260 p. EDN: <https://elibrary.ru/YQQIFF>
9. Shavishvili, L. M. (1973). *The Effect of Magnesium and Microelements (B, Zn, Co, and Mo) on Certain Physiological and Biochemical Processes in the Tea Plant* [Abstract of doctoral dissertation, Candidate of Sciences]. Tbilisi. 26 p.

10. Alekseeva, T., Alekseev, A., Xu, R. K., Zhao, A. Z., & Kalinin, P. (2011). Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of Alfisols in eastern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(2), 137–148. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9327-5>. EDN: <https://elibrary.ru/OIAZQV>
11. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *Elements of the nature and properties of soils* (13th ed.). Upper Saddle River. pp. 662–710.
12. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality — A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. EDN: <https://elibrary.ru/YEFIST>
13. Chen, D., Lan, Z., Bai, X., Grace, J. B., & Bai, Y. (2013). Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 101(5), 1322–1334. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12119>
14. Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., & Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification — A critical review. *Science of the Total Environment*, 581, 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>
15. Duan, L., Huang, Y., Hao, J., Xie, S., & Hou, M. (2004). Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification. *Science of the Total Environment*, 330(1–3), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.035>
16. Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W. T., Vitousek, P. M., & Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
17. Hao, T., Zhu, Q., Zeng, M., Shen, J., Shi, X., Liu, X., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. *Journal of Environmental Management*, 270, 110888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQRXHT>
18. Joris, H. A. W., Caires, E. F., Bini, A. R., Scharr, D. A., & Haliski, A. (2013). Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. *Plant and Soil*, 365(1), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1413-2>. EDN: <https://elibrary.ru/HFEOYF>
19. Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Lu, J. Y. (2000). Soil pHs in the tea gardens in Jiangsu, Zhejiang, and Anhui provinces and changes of soil pH in the past decade. *Chinese Journal of Soil Science*, 31(5), 205–207.

20. Maharjan, B., Das, S., & Acharya, B. S. (2020). Soil health gap: A concept to establish a benchmark for soil health management. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01116. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01116>. EDN: <https://elibrary.ru/UNDNIX>
21. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., Velikiy, A. V., Rogozhina, E. V., Kerimzade, V. V., & Samarina, L. S. (2021). Effects of calcium-containing natural fertilizer on *Camellia Sinensis* (L.) Kuntze. *Bangladesh Journal of Botany*, 50(1), 179–187. <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i1.52686>. EDN: <https://elibrary.ru/IJLJRS>
22. Mupenzi, J. P., Li, L., Ge, J., Varenayam, A., Habiyaemye, G., Theoneste, N., & Emmanuel, K. (2011). Assessment of soil degradation and chemical compositions in Rwandan tea-growing areas. *Geoscience Frontiers*, 2(4), 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.003>
23. Oh, K., Kato, T., Li, Z. P., & Li, F. Y. (2006). Environmental Problems From Tea Cultivation in Japan and a Control Measure Using Calcium Cyanamide. *Pedosphere*, 16(6), 770–777. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60113-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60113-6)
24. Pan, Zhu-Cai. (2015). Effect of boron and magnesium fertilization on tea yield, quality and soil fertility of red-soil tea plantations. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 30(9), 877–883.
25. Ruan, J. Y., & Wang, M. H. (2001). Accumulation of fluoride and aluminum related to different varieties of tea plant. *Environmental Geochemistry and Health*, 23(1), 53–63. <https://doi.org/10.1023/A:1011082608631>. EDN: <https://elibrary.ru/AMPIQD>
26. Ruan, J. Y., Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Zhang, F. S. (2004). Effects of litter incorporation and nitrogen fertilization on the contents of extractable aluminum in the rhizosphere soil of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Plant and Soil*, 263(1), 283–296. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047744.44940.96>. EDN: <https://elibrary.ru/VRXGNB>
27. Samarina, L., Malyukova, L., Wang, S., Li, Y., Doroshkov, A., Bobrovskikh, A., et al. (2024). Nitrogen deficiency differentially affects lignin biosynthesis genes and flavanols accumulation in tolerant and susceptible tea genotypes (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze). *Plant Stress*, 14, 100581. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100581>. EDN: <https://elibrary.ru/TRQWKD>
28. Simek, M., & Cooper, J. E. (2002). The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science*, 53(3), 345–354. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00461.x>
29. Su, H. G. (2012). The improvement measures of soil acidification in tea garden in Anxi. *Guangdong Tea Industry*, 1, 31–32.

30. Su, S., Zhou, X., Wan, C., Li, Y., & Kong, W. (2015). Land use changes to cash crop plantations: Crop types, multilevel determinants and policy implications. *Land Use Policy*, 50, 379–389.
31. Sun, X., Li, Z., Wu, L., Christie, P., Luo, Y., & Fornara, D. A. (2019). Root-induced soil acidification and cadmium mobilization in the rhizosphere of *Sedum plumbizincicola*: Evidence from a high-resolution imaging study. *Plant and Soil*, 436(1), 267–282. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w>. EDN: <https://elibrary.ru/GPIAAP>
32. Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
33. USEPA. (2008). *Registering pesticides*. Washington, D.C. pp. 11–26.
34. Velikii, A. V. (2024). The effectiveness of the combined use of zinc, boron, and magnesium on tea plantations in the humid subtropics of Russia. *BIO Web of Conferences*, 139, 04001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413904001>. EDN: <https://elibrary.ru/UROSKH>
35. Von Uexküll, H. R., & Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 171(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>. EDN: <https://elibrary.ru/MROKFZ>
36. Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (World Soil Resources Reports No. 106). FAO. Rome. 181 p.
37. Wang, H., Xu, R. K., Wang, N., & Li, X. H. (2010). Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China. *Pedosphere*, 20(6), 799–806. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60070-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60070-7)
38. Wu, C., Luo, Y., Deng, S., Teng, Y., & Song, J. (2014). Spatial characteristics of cadmium in topsoils in a typical e-waste recycling area in southeast China and its potential threat to shallow groundwater. *Science of the Total Environment*, 472, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.084>
39. Yan, P., Wu, L., Wang, D., Fu, J., Shen, C., Li, X., Zhang, L., Zhang, L., Fan, L., & Wenyan, H. (2020). Soil acidification in Chinese tea plantations. *Science of the Total Environment*, 715, 136963. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136963>. EDN: <https://elibrary.ru/DBUZMF>
40. Yang, X. D., Ni, K., Shi, Y. Z., Yi, X. Y., Zhang, Q. F., Fang, L., & Ruan, J. Y. (2018). Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.004>. EDN: <https://elibrary.ru/YJXFUZ>
41. Zeng, M. F., De Vries, W., Bonten, L. T. C., Zhu, Q. C., Hao, T. X., Liu, X. J., Xu, M. G., Shi, X. J., Zhang, F. S., & Shen, J. B. (2017). Model-based analysis of the

- long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification. *Environmental Science & Technology*, 51(7), 3843–3851. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05491>
42. Zhang, Q., Zhu, J., Wang, Q., Xu, L., Li, M., Dai, H., Mulder, J., Xi, Y., & He, N. (2022). Soil acidification in China's forests due to atmospheric acid deposition from 1980 to 2050. *Science Bulletin*, 67(9), 914–917. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/AWUIOZ>
43. Zhu, Q., Liu, X., Hao, T., Zeng, M., Shen, J., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China. *Environmental Pollution*, 256, 113145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113145>. EDN: <https://elibrary.ru/UQWKRC>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Великий Андрей Васильевич, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук»

ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
kriptooorxon@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Andrey V. Velikii, Candidate of Agricultural Sciences, Research Associate
Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences
2/28, Jan Fabricius Str., Sochi, 354002, Russian Federation
kriptooorxon@mail.ru

Поступила 13.02.2026

После рецензирования 16.03.2026

Принята 01.04.2026

Received 13.02.2026

Revised 16.03.2026

Accepted 01.04.2026

Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры / Horticulture, Vegetable Growing, Viticulture, and Medicinal Crops

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1551](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1551)EDN: [MGRVNO](#)

UDC 634.21



Phenotypic diversity and breeding potential of the ‘*Kharji*’ apricot landrace (*Prunus armeniaca* L.) for sustainable mountain horticulture in Armenia

J.A. Akopian¹, Y.M. Navasardyan¹,
D.M. Anatrov², V.B. Goginyan³, S.A. Mamajanyan⁴, A.V. Rudov¹,
G.M. Zaroyan⁵, G.S. Gabrielyan⁴

¹Armenian National Academy of Sciences, Yerevan, Republic of Armenia

²Mountain Botanical Garden of the Dagestan Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation

³“Armbiotechnology” Scientific and Production Center NAS RA, Yerevan,
Republic of Armenia

⁴National Agrarian University of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

⁵Armenia Tree Project (ATP) Charitable Foundation, Yerevan,
Republic of Armenia

Abstract

Background. The Armenian apricot landrace ‘*Kharji*’ (*Prunus armeniaca* L.) is a valuable genetic resource combining high phenotypic diversity with adaptation to mountainous and arid environments. Despite its agronomic importance, it remains insufficiently studied, limiting its use in breeding programs. In the context of increasing climate variability, the study of adaptive landraces such as ‘*Kharji*’ is essential for conserving biodiversity and developing resilient fruit crops for sustainable mountain horticulture.

Purpose. The aim of this research was to characterize the phenotypic, reproductive, and biochemical diversity of ‘*Kharji*’ and to evaluate its potential for breeding and sustainable mountain horticulture in Armenia.

Materials and methods. Plant material of the ‘*Kharji*’ apricot was collected, and field studies were conducted in various regions of Armenia. Phenotyping was performed

according to UPOV (TG/70/5) descriptors. Pollen fertility and viability were assessed using acetocarmine staining and in vitro germination. Biochemical analysis of fruits included the determination of sugars, organic acids, vitamin C, and antioxidant activity. Statistical analyses were carried out using cluster and multivariate methods (K-means, UPGMA, PCA).

Results. This study presents the first comprehensive characterization of the ‘*Kharji*’ landrace, including seedling morphology, vegetative and reproductive traits, fruit and endocarp characteristics, pollen fertility and viability, and fruit biochemical composition. Seedlings exhibited marked early heterophylly, while mature trees showed high variability in growth habit, leaf and floral traits, with diverse stigma–anther arrangements supporting both self- and cross-pollination under mountain conditions. Pollen fertility ranged from 48.1% to 98.2%, with more than half of the accessions showing very high fertility and viability. Fruit and endocarp traits were highly polymorphic in size, shape, symmetry, surface texture, basal apertures, and keel development. Multivariate analyses identified two main morphotypes – cultivated-type and wild-type, reflecting the semi-wild, transitional nature of the landrace. Comparative analysis suggested a shared Iranian–Caucasian origin with Dagestan populations and regional divergence driven by environmental conditions and cultivation history. Biochemical analyses revealed high metabolic diversity, elevated organic acid content, and strong antioxidant activity, indicating adaptive and nutritionally valuable traits for stress-prone mountain environments.

Conclusion. ‘*Kharji*’ landrace represents a key genetic resource for sustainable mountain horticulture, combining broad phenotypic diversity, high reproductive potential, and adaptive biochemical traits. Its tolerance to climatic stress, late flowering, frost resistance, and stable pollen viability make it particularly valuable for breeding programs aimed at developing resilient cultivars for mountain and arid regions. The results highlight the importance of conserving ‘*Kharji*’ both *in situ* and *ex situ* and provide a scientific basis for its targeted use in breeding and long-term strategies for sustainable development of mountain territories.

Keywords: apricot; ‘*Kharji*’ landrace; phenotypic diversity; breeding potential; fruit biochemical traits; pollen fertility; Armenian cultivars; genetic resource; mountain horticulture

For citation. Akopian, J. A., Navasardyan, Y. M., Anatov, D. M., Goginyan, V. B., Mamajanyan, S. A., Rudov, A. V., Zaroyan, G. M., & Gabrielyan, G. S. (2026). Phenotypic diversity and breeding potential of the ‘*Kharji*’ apricot landrace (*Prunus armeniaca* L.) for sustainable mountain horticulture in Armenia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 277–305. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1551>

Фенотипическое разнообразие и селекционный потенциал местных форм абрикоса ‘Харджи’ (*Prunus armeniaca* L.) для устойчивого горного садоводства в Армении

Ж.А. Акопян¹, Е.М. Навасардян¹,
Д.М. Анатов², В.Б. Гогинян³, С.А. Мамаджанян⁴, А.В. Рудов¹,
Г.М. Зарян⁵, Г.С. Габриелян⁴

¹Национальная Академия Наук Армении, Ереван, Республика Армения

²Горный ботанический сад – обособленное подразделение
Дагестанского федерального исследовательского центра Российской
академии наук, Махачкала, Российская Федерация

³Научно-производственный центр НАН РА «Армбиотехнология», Ереван, Армения

⁴Национальный аграрный университет Армении, Ереван, Республика Армения

⁵Благотворительный фонд «Armenia Tree Project (ATP)»,
Ереван, Республика Армения

Аннотация

Обоснование. Аборигенные формы абрикоса ‘Харджи’ (*Prunus armeniaca* L.) представляют собой ценный генетический ресурс, сочетающий высокое фенотипическое разнообразие с адаптацией к горным и аридным условиям Армении. Несмотря на ресурсное значение, данные формы остаются недостаточно изученными, что ограничивает возможности их использования в селекционных программах. В условиях нарастающей климатической изменчивости изучение адаптивных аборигенных форм, таких как ‘Харджи’, имеет особую актуальность для сохранения биоразнообразия и создания устойчивых плодовых культур в системе горного садоводства.

Цель. Целью настоящего исследования является характеристика фенотипического, репродуктивного и биохимического разнообразия абрикоса ‘Харджи’, а также оценка его потенциала для селекции и устойчивого горного садоводства в Армении.

Материалы и методы. Сбор материала абрикоса ‘Харджи’ и полевые исследования проводили в разных регионах Армении. Фенотипирование выполняли по дескрипторам UPOV (TG/70/5). Фертильность и жизнеспособность пыльцы оценивали ацетокарминовым окрашиванием и методом *in vitro* проращивания. Биохимический анализ плодов включал определение сахаров, органических кислот, витамина С и антиоксидантной активности. Статистическую обработку данных проводили с использованием кластерного и многомерного анализа (K-means, UPGMA, PCA).

Результаты. Впервые проведена комплексная характеристика аборигенно-го абрикоса ‘Харджи’, охватывающая морфологию семян, вегетативные и ге-

неративные органы, признаки плодов и эндокарпия, показатели фертильности и жизнеспособности пыльцы, а также биохимические свойства плодов. У сеянцев выявлена выраженная гетерофилия на ранних этапах онтогенеза. Взрослые деревья характеризовались высокой вариабельностью по габитусу, морфологии листьев и цветков, включая разнообразие взаимного расположения рыльца и тычинок, что обеспечивает как самоопыление, так и перекрёстное опыление в горных условиях. Фертильность пыльцы варьировала от 48.1 до 98.2 %, при этом более половины образцов отличались очень высокими показателями фертильности и жизнеспособности. Плоды и эндокарпии отличались высокой полиморфностью по размерам, форме, симметрии, характеру поверхности, базальным отверстиям и степени развития кия. Многомерный анализ позволил выделить два основных морфотипа – культурного и дикого типов, что подтверждает полудикий и переходный характер аборигенной популяции абрикоса ‘Харджи’. Сравнительный анализ показал общее ирано-кавказское происхождение с популяциями Дагестана при наличии региональной дивергенции, обусловленной природными условиями и историей возделывания. Биохимические исследования выявили высокий уровень метаболического разнообразия, повышенное содержание органических кислот и высокую антиоксидантную активность, указывающие на адаптивную и пищевую ценность форм ‘Харджи’ в стрессовых горных условиях.

Выводы. Абрикос ‘Харджи’ представляет собой ключевой генетический ресурс для устойчивого горного садоводства, сочетающий широкое фенотипическое разнообразие, высокую репродуктивную способность и адаптивные биохимические признаки. Толерантность к климатическим стрессам, позднее цветение, морозоустойчивость и стабильная жизнеспособность пыльцы определяют её высокую ценность для селекционных программ, направленных на создание устойчивых сортов для горных и аридных регионов. Полученные результаты подчёркивают необходимость сохранения разнообразия аборигенных форм ‘Харджи’ в *in situ* и *ex situ* условиях и формируют научную основу для их целенаправленного использования в селекции и долгосрочных стратегиях устойчивого развития горных территорий.

Ключевые слова: абрикос; аборигенные формы ‘Харджи’; фенотипическое разнообразие; селекционный потенциал; биохимические признаки плодов; фертильность пыльцы; армянские сорта; генетический ресурс; горное садоводство

Для цитирования. Акопян, Ж. А., Навасардян, Е. М., Анатов, Д. М., Гогинян, В. Б., Мамаджанян, С. А., Рудов, А. В., Зароян, Г. М., & Габриелян, Г. С. (2026). Фенотипическое разнообразие и селекционный потенциал местных форм абрикоса ‘Харджи’ (*Prunus armeniaca* L.) для устойчивого горного садоводства в Армении. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 277–305. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1551>

Introduction

The Caucasus is recognized as one of the primary centers of origin and diversity of wild and cultivated fruit trees [46]. The apricot *Prunus armeniaca* L. is a fruit tree of high ecological and economic significance, widely cultivated throughout the Caucasus and well adapted to mountain and foothill environments. Natural populations of wild apricot are found in Central Asia, primarily in the Tien Shan Mountains, as well as in several regions of northern China [26; 48]. Cultivated apricot has long expanded beyond its native area and is classified into four eco-geographical groups, with Armenian and Dagestan apricots belonging to the Iranian-Caucasian group [29].

Apricot cultivation in Armenia has ancient roots. Archaeobotanical findings from the Garni Temple and the Shengavit settlement demonstrate apricot cultivation since the Early Bronze Age [6; 39]. Up to 50 local varieties have originated through traditional selection [36]. Apricot cultivation in Armenia extends over a wide range of ecological conditions. Apricot trees grow and bear fruit successfully at elevations of about 600–1800 m above sea level, and in some areas up to 2000 m. This range includes foothill and moderately mountainous areas and indicates the good adaptation of apricot to the diverse mountain soil and climatic conditions of Armenia. Wild-growing forms are distributed at elevations of 800–2100 m a.s.l. across forested and rocky habitats and open woodland ecosystems [20; 25; 41].

Over 90% of Armenia's territory is covered by mountains, with altitudes above 1000 m, including extensive areas above 2000 m, and an average elevation of approximately 1830 m [18]. Agriculture, including fruit cultivation, occurs under complex mountainous conditions, with varied slopes, exposures, and microclimates. Orchards are mainly located on foothill and mountain sites (600–1800 m and higher), often on steep slopes, under semi-arid conditions with limited water and a high risk of spring frosts. These factors determine agronomic practices, cultivar choice, and breeding strategies in line with mountain horticulture principles. In the mountainous and foothill landscapes of Armenia, traditional agriculture included a well-developed system of terraced horticulture and farming; terrace irrigation systems had unique solutions adapted to the local landscape [21; 22]. Terracing, as a traditional land-use method characteristic of many Armenian settlements, developed under the influence of the geographical environment with the aim of protecting sloping agricultural lands from erosion and preserving the interconnection between terrace gardens and the landscapes. International research suggests that terraced agricultural systems continue to play an important role in soil conservation and slope stabilization in mountain-

ous landscapes, indicating their potential relevance under contemporary environmental conditions [40]. In this context, the traditional terraced gardens of Armenia may be considered not only as a component of cultural heritage, but also as a potential model for sustainable management of mountain agricultural landscapes.

Local indigenous fruit crop forms shaped by long-term adaptation to extreme highland conditions play a key role in Armenia's mountain horticulture. A substantial proportion of Armenian apricots belongs to local seedling populations well adapted to mountainous and semi-arid environments. Among this germplasm, the semi-wild landrace '*Kharji*' is of particular interest, with more than 100 documented forms [36]. Indigenous apricot landraces such as '*Kharji*' exhibit traits essential for sustainable mountain horticulture, including ecological plasticity, tolerance to abiotic stresses, stable fruiting under adverse conditions, and reduced sensitivity of flowers to short-term frosts, making them valuable resources for climate-resilient breeding.

'*Kharji*' trees occur in old terrace orchards, abandoned plantations, rural farms, and occasionally naturalized habitats across Armenia's major fruit-growing regions (Ararat, Armavir, Aragatsotn, Kotayk, Vayots Dzor, Syunik) and display intermediate characteristics between wild and cultivated apricots [25; 36]. Although comparable semi-wild forms are known from Central Asia (e.g., '*Khasak*'), they differ genetically and morphologically from '*Kharji*' [9; 30]. Originating from ungrafted seedlings, '*Kharji*' exhibits pronounced phenotypic polymorphism, with nearly every tree representing a distinct form. Its intra-population variability includes tolerance to low temperatures, late flowering, stable fruit quality, natural disease resistance, and high productivity. As Armenia's predominant rootstock, '*Kharji*' imparts vigor and environmental resilience to grafted cultivars. While typically small-fruited, its wide ecological amplitude enhances its breeding value, and high-altitude populations (1400–1700 m a.s.l.), particularly in Vayots Dzor, include large-fruited forms that further expand its potential for cultivar development.

Indigenous apricot landraces represent an important source of phenotypic and genetic diversity, showing wide variation in morphological, pomological, and biochemical traits, and are essential for breeding programs focused on fruit quality, productivity, and stress tolerance [11; 15; 19]. The conservation and study of local apricot germplasm are essential for sustainable horticulture in Armenia, especially in mountainous, environmentally constrained regions. Despite its wide distribution and agronomic importance, the '*Kharji*' landrace is insufficiently characterized, with no comprehensive assessment of its pheno-

typic diversity, reproductive traits, or agronomic potential. Addressing this gap is crucial for conservation, breeding, and understanding its relationship with other indigenous *P. armeniaca* forms.

This study aimed to provide an integrated phenotypic and reproductive characterization of the '*Kharji*' landrace, encompassing vegetative, floral, fruit, and endocarp traits, pollen fertility and viability, and fruit biochemical properties, to evaluate its value as a genetic resource for sustainable mountain horticulture and to establish a baseline for future molecular and breeding research.

Material and methods

Study Sites and Sample Collection. Field investigations of the *P. armeniaca* '*Kharji*' landrace were conducted in the Aragatsotn (1900–2000 m a.s.l.), Armavir (900–1000 m), Kotayk (1600–1700 m), and Vayots Dzor (2000–2100 m) provinces, as well as in Jrvezh Forest Park (1250 m) and the fruit plant collection of the Yerevan Botanical Garden (1200 m) [1]. For comparison, local apricot cultivars from the Echmiadzin Agricultural Scientific Center and farm orchards ('*Abutalibi*' ('*Payvast*'), '*Deghnanush*', '*Deghnanush Late Ripening*', '*Gargar*', '*Karmreni*', '*Ordubadi*', '*Sateni*', '*Shlor-Tsiran*') were included. Seedlings for morphological assessment were grown from seeds collected near Voghchaberd village, Kotayk Province (40°06'26.7"N, 44°39'51.9"E, 1238 m a.s.l.). Herbarium (ERE) specimens of the A. Takhtajan Institute of Botany NAS RA, together with material from the authors' field collections were examined. Published descriptions of wild apricot forms from Dagestan were also incorporated for comparative analysis [2-5].

Phenotyping. Morphological characterization followed UPOV descriptors (TG/70/5) [45] and included tree architecture and leaf, flower, fruit, and stone traits. Measurements were performed in triplicate on five trees per replicate. Phenological observations were conducted during 2022–2025. Stone traits and kernel bitterness were assessed following standard protocols [10, 16], and yield and quantitative traits were analyzed using established methods [28; 33]. Detail morphological studies were made with an MBC-9 stereomicroscope.

Floral Morphology, Pollen Fertility and Viability. Pollen fertility and germination were assessed using friable flower buds. Fertility was determined on acetocarmine-stained slides [38] by counting 100 grains per slide in three replicates, distinguishing fertile (uniformly stained) from sterile (unstained or partially stained) grains. Pollen germination was evaluated in 20% sucrose solution [23] after 24 h incubation on slides placed in Petri dishes with moistened filter paper. The proportion of germinated grains and pollen tube lengths were

measured under a PZO Warszawa microscope at $\times 250$ magnification. Stigma position relative to anthers was recorded on at least 30 flowers per tree, and the style-to-stamen length ratio was calculated to assess potential for self- and cross-pollination. Data were processed using Microsoft Excel.

Statistical Analysis. Qualitative and quantitative stone traits were analyzed using K-means clustering, hierarchical clustering (UPGMA), and PCA in Statistica 13.3, R 4.3.3, and PAST 4.17. The optimal number of clusters was determined via the GAP statistic [43] in R [14]. Arithmetic means and percentage gradations were calculated to minimize standard errors, which ranged from 1.0 to 5.7% and remained below the 5% threshold commonly accepted in agronomy; thus, mean values were considered reliable at the 95% confidence level.

Fruit Biochemical Assessment. A comparative study evaluated the biochemical traits of the 'Kharji' landrace and local apricot cultivars ('Degnanush Late-Ripening', 'Gargar', 'Ordubadi', 'Abutalibi' ('Payvast'), 'Degnanush', 'Shlor-Tsiran'). Assessed parameters included fruit pulp ash, organic acids (oxalic, tartaric, malic, citric, succinic), sugars (fructose, glucose, sucrose), vitamin C, and antioxidant capacity. Analyses were performed using high-performance liquid chromatography and standard physicochemical techniques [19; 27; 42; 44]. Antioxidant activity was determined by titration with potassium permanganate in sulfuric acid at room temperature, providing an integrated measure of biologically active compounds [13].

Results and discussion

Tree habit, leaf, flower phenotypic characteristics by UPOV (TG/70/5).

The 'Kharji' apricot landrace shows marked morphological variability. Trees are medium to large (3.5–10 m), upright to spreading (Note 3), with numerous branches (Note 5) and crowns ranging from rounded or pyramidal to irregular; mature trees often form tent-shaped canopies up to 8 m. Bud support is small to medium (Note 1–2), and flower buds mainly develop on one-year-old shoots (Note 3). Leaves are broadly ovate to ovate-rounded, occasionally cordate or truncate at the base, narrowing at the apex; blades are light green, glabrous or slightly pubescent, thin, shiny, with single- or double-serrate margins. Petioles are medium to long (Note 6), medium in thickness (Note 2), with weak to medium anthocyanin coloration (Note 4). The variability in tree habit, crown architecture, and vegetative traits of the 'Kharji' landrace reflects adaptation to heterogeneous mountain environments, characterized by sharp altitudinal gradients, variable exposure, and limited soil resources. Such plasticity in growth form and canopy structure is particularly advantageous in mountainous land-

scapes, where microclimatic conditions can vary substantially over short distances. '*Kharji*' lowers are mostly solitary, rarely paired, nearly sessile, 25–30 mm in diameter, with cylindrical greenish-red hypanthia and five dark red reflexed sepals. Petals are circular to widely obovate, white or slightly pinkish (Note 1, 3), with 2–3 nectaries per flower (Note 2). Stigmas are positioned above or occasionally below the anthers (Note 3). Detailed traits are summarized in Table 1.

Table 1.

Tree, leaf, petiole, flower traits of '*Kharji*' landrace by UPOV, 2021

TG/70/5 code	Trait	Observation	UPOV state (Notes)
1	Tree habit	Upright to spreading	3
2	Number of branches	Many	5
3	Size of bud support	Small to medium	1–2
4	Distribution of flower buds	Predominantly on one-year-old shoots	3
14	Leaf blade color (upper side)	Light to medium green	2
15	Leaf base shape	Obtuse	2
16	Leaf base angle	Right-angled	2
17	Leaf margin incisions	Serrate or biserrate	3–4
20	Petiole length	Medium to long	6
21	Petiole thickness	Medium	2
22	Petiole upper side anthocyanin coloration	Weak to medium	4
30	Petal color	White or slightly pinkish	1
31	Petal shape	Circular to widely obovate	3
34	Number of nectaries per flower	Two or three	2
28	Flower diameter	Small to medium	2
33	Stigma position relative to anthers	above the anthers or sometimes lower	3

Seedling traits. Seedlings of the '*Kharji*' landrace were monitored to characterize early morphological development (Table 2). Seed germination was observed during the third ten-day period of March. Seedlings possessed fleshy, reddish cotyledons that remained underground or only slightly emerged above the soil surface. The leaves alternate, glandular-finely or unevenly serrated, with petioles shorter than half of the blade length. Pronounced heterophylly was recorded from the 1st to the 8th leaf, after which leaves (from the 9th node onward)

became uniform in shape. Venation loop-shaped, with 3–4 pairs of lateral veins oriented obliquely upward at approximately 45°, slightly reddish in coloration. Stipules linear to narrowly triangular and glandular-ciliate. Seedlings light-green, stems cylindrical, up to 2 mm in diameter at the base, green with a reddish tip. The early manifestation of heterophylly and variation in seedling morphology indicates high developmental plasticity of the ‘*Kharji*’ landrace at juvenile stages.

Table 2.

Leaf Morphology and Morphometric Variation in ‘*Kharji*’ Apricot Seedlings

Leaf no.	Leaf blade Shape	Blade Length × Width (mm)	Petiole length (mm)	Notes
1	Lanceolate	4.5 × 2.5	2.0	Glandular-finely or unevenly serrated
2	Elliptical	6 × 5	2.3	Pointed at tip
3-4	Oval	11–17 × 6–10	4-6	Bluntly rounded tip, basely broadly rhombic
5-7	Oval	18–28 × 10–17	5-7	Slightly narrowed at tip
8	Ovate	32 × 24	7	Narrowed at tip
9+	Widely-ovate	48–52 × 30–38	8–10	Distinctly narrowly elongated at tip, obtuse or truncate at the base

Note: Leaf numbers correspond to sequential nodes during early seedling development. Shape terminology follows standard botanical descriptors.

Flower structural features, pollen fertility and viability. Reproductive traits in apricot are strongly influenced by flower structure, particularly the stigma position relative to the anthers, which affects self-fertility [45]. Wild apricots and varieties of the Central Asian and Iranian-Caucasian groups are generally autosterile, whereas European and North American cultivars are often autofertile [12; 16; 29]. Autosterility is associated with a style length exceeding stamen length, as even a 2–3 mm excess limits pollen deposition on the stigma [12]. In ‘*Kharji*’, flowers exhibited substantial variation in style and stamen length (Table 3). Style length ranged from 7.0 to 16.8 mm, stamen length from 5.4 to 11.8 mm, and the number of stamens per flower from 19.7 to 36. The style-to-stamen length ratio varied from 1.06 to 2.05, indicating prevalent herkogamy. Most samples showed a significant style length excess, while nearly equal style and stamen lengths suggested potential self-fertility in some cases. The observed diversity in floral morphology, including variability in stigma–anther relationships and pollen fertility, suggests that the ‘*Kharji*’ landrace maintains flexible reproductive strategies. In mountain territories, where weather condi-

tions during flowering are often unpredictable, such reproductive variability may increase the probability of successful fertilization across years, thereby contributing to population persistence and long-term stability.

Table 3.

Characteristics of *Prunus armeniaca* 'Kharji' landrace flowers by the quantity of stamens and the ratio of the style and stamen lengths

№	Style length, mm	Stamen length, mm	Quantity of stamens	Length ratio between style and stamens
1	7.0 ± 0.44	6.4 ± 0.22	19.7 ± 1.48	1.09
2	12.5 ± 1.09	11.4 ± 1.03	30.0 ± 0.72	1.10
3	12.0 ± 0.75	11.3 ± 0.15	32.8 ± 0.60	1.06
4	16.0	9.50 ± 0.38	32.4 ± 0.40	1.68
5	15.3 ± 0.38	10.3 ± 0.28	30.0 ± 0.50	1.49
6	12.0	8.3 ± 0.23	34.4 ± 0.80	1.45
7	16.8 ± 0.25	11.8 ± 0.18	31.0 ± 1.09	1.42
8	15.5 ± 1.09	8.5 ± 0.36	36.0	1.82
9	11.0	7.5 ± 0	27.0 ± 1.08	1.33
10	11.0	6.3 ± 0.27	29.0 ± 0.72	1.75
11	12.0	6.6 ± 0.30	33.2 ± 0.90	1.82
12	13.0	7.5 ± 0.54	30.0	1.73
13	10.0	5.4 ± 0.60	31.5 ± 3.5	1.85
14	$11.5 \pm 0,36$	$5.6 \pm 0,24$	$26.3 \pm 2,35$	2.05
15	10.0	$6.8 \pm 0,20$	$22.7 \pm 0,78$	1.47

Pollen fertility and pollen grain size were assessed in 24 samples of the 'Kharji' landrace. Considerable variability in pollen fertility was observed among the samples. Fourteen samples (58.3%) exhibited very high fertility (90.9 ± 1.1 to $98.2 \pm 0.7\%$), four samples ranged from 82.0 ± 2.5 to $87.0 \pm 1.5\%$, three samples from 63.3 ± 5.6 to $76.8 \pm 2.9\%$, and the remaining three samples showed only 48.1 ± 1.9 to $59.3 \pm 3.4\%$ fertile pollen grains. In 14 samples, 0.2–5.2% of pollen grains were partially stained, indicating disturbances during microsporogenesis. Pollen grain diameter also varied among the samples, ranging from 42.4 to 55.8 μm . According to Golubinsky [23], such variation may result from environmental factors (temperature, humidity) or physiological conditions (nutrient availability related to flower position) during pollen development. No correlation between pollen fertility and pollen grain size was detected across the 24 samples ($r = -0.10835$). Hambartsumyan et al. [24] reported that pollen of wild apricot forms exhibits higher fertility and viability compared with lo-

cal cultivated varieties, likely reflecting long-term natural selection under environmental conditions. Comparative assessment of several cultivated varieties in Armenia showed consistently high pollen fertility: 'Gargar' $97.2 \pm 0.8\%$, 'Degnanush' $97.6 \pm 0.6\%$, 'Karmreni' $98.6 \pm 0.6\%$, 'Sateni' $89.1 \pm 3.9\%$, and 'Abutalibi' ('Payvast') $93.2 \pm 2.3\%$, while 'Ordubadi' showed reduced fertility ($49.8 \pm 5.9\%$). The non-selected 'Kharji' landrace fell within the high-fertility range of 'Gargar', 'Karmreni', and 'Abutalibi'. Thus, high-fertility forms and, less frequently, low-fertility forms are found in both the 'Kharji' landrace and among cultivated varieties, which is consistent with the findings of Nebish et al. [37]. The presence of highly fertile pollen in a majority of 'Kharji' samples, comparable to or exceeding that of several cultivated varieties, is particularly important for mountain horticulture, where pollination success is frequently constrained by low temperatures and short flowering periods.

The pollen grains of three 'Kharji' landrace samples were evaluated for in vitro germination and pollen tube growth. Two samples with 95.6% and 94.6% fertility germinated at 81.5% and 80.0%, respectively, and had a long pollen tubes (1450–1750 μm). In contrast, one sample with the 48.1%-fertile pollen grains showed low germination (16.0%), and shorter pollen tubes (175–1050 μm). Similar relationships between pollen fertility and germination have been reported in works on apricot and peach [31; 32].

Fruit and endocarp phenotypic characteristics. Analysis of fruit traits revealed substantial phenotypic diversity within the 'Kharji' landrace. Skin color ranged from white and greenish to golden, orange, and red, with variation in pulp firmness and pigmentation. Flesh was typically firm, fibrous, light- to dark-orange, sweet with slight bitterness, while kernel taste varied from sweet to bitter. According to UPOV descriptors (TG/70/5) [45], fruits were predominantly circular (note 4), slightly asymmetric (note 2), with a strong suture (note 4), rounded apex (note 2), and weakly depressed pistil end (note 3). Fruit and stone traits are shown in Figure 1.

The fruit ripening period of the 'Kharji' landrace mainly extends from mid-June to late July, although some clones mature as late as September. Fruits are small, with total weight (fruit plus stone) ranging from 6.89 to 16.84 g, stones from 1.24 to 1.81 g, and pulp from 5.65 to 15.34 g, considerably lower than most cultivated varieties. Such reduced fruit size and pulp mass are typical of apricots adapted to mountain and semi-arid environments, where resource allocation favors survival and reproductive assurance over large fruits. The extended ripening in some clones may provide an adaptive advantage by spreading reproductive risk under variable mountain climatic conditions.

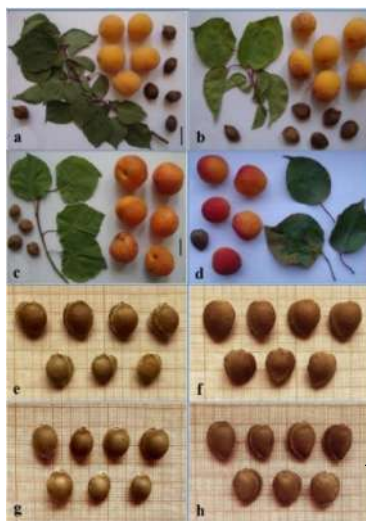


Fig. 1. '*Kharji*' apricot leaves, fruits, stones, collected from Kotayk (a, b, e, f) and Vayots Dzor (c, d, g, h) provinces of Armenia (scale bar 10 mm)

Apricot varieties can be identified by their endocarp characteristics, which, in combination with other morphological traits, can be used to address questions of varietal origin and classification [9]. Given the importance of endocarp traits for apricot identification, the present study focuses on the endocarp characteristics of the Armenian apricot landrace '*Kharji*' (Table 4).

Within the Caucasus region, Dagestan represents another major center of apricot cultivation and diversity, where both cultivated and wild populations persist under arid environmental conditions [7; 8; 34]. At present, cultivated apricot orchards in Dagestan occupy approximately 4470 hectares [17]. Wild populations are primarily distributed along river valleys at elevations of 350–1500 m a.s.l., and in some locations extend up to 1900 m on limestone slopes. In addition, local cultivation practices preserve apricot varieties that are genetically closely related to wild forms [10].

In order to place the endocarp characteristics of the Armenian apricot landrace '*Kharji*' in a broader regional context, Table 4 also presents comparative data on natural apricot populations in Dagestan.

Statistical analyses confirmed data reliability, with relative errors ranging from 1.0% to 5.7%, within acceptable limits for agronomic studies and providing 95% confidence.

Table 4.

Comparative quantitative and qualitative traits of endocarp, leaf, and yield in the Armenian apricot landrace 'Kharji' and wild apricot populations from Dagestan

The traits of the endocarp	Gradation	Statistical significances (Mean or group % for quality traits ± SE or Sp)	
		Armenia	Dagestan
Quantitative			
Yield (n=30)			(n=60) (Anatov, 2024a)
General, kg per tree	Commercial yield	20.9±0.6	59.7±12,14
Leaf (number of samples 88)			(n=120) (Anatov et al., 2018)
Lenght, cm	From min to max (1.1-8.5)	4.8±0.2	5.9±0.05
Width, cm	From min to max (1.0-9.0)	4.1±0.2	5.0±0.05
Surface, cm²	From min to max (1.0-56.5)	15.4±1.0	21.3±0.40
Petiole length, cm	From min to max (1.0 - 4.5)	2.3±0.1	2.7±0.03
Stone (n=101)			(n=90) (Anatov, 2024b)
Lenght, mm	From min to max (10.0-24.0)	19.7±0.2	18.6±0.30
Width, mm	From min to max (10.0-22.0)	15.9±0.2	14.7±0.22
Thickness, mm	From min to max (5.0-14.0)	10.1±0.2	10.1±0.12
Volume, mm³	From min to max (502.1-3012.5)	1661.5±55.4	1492.0±61.0
Qualitative (n=101)			p±Sp (n=328) (Anatov, 2019)
Size, %	Very small	9.9±3.0	36.9±2.7
	Small	52.5±5.0	38.1±2.7
	Medium	34.7±4.7	21.0±2.2
	Large	3.0±1.7	4.0±1.1
Shape, %	Round	36.6±4.8	29.0±2.5
	Ellipsoidal	28.7±4.5	14.0±1.9
	Egg-shaped	33.7±4.7	38.1±2.7
	Oblong	1.0±1.0	11.9±1.8
	Semi-heart-shaped	NA	4.9±1.2
	Teardrop-shaped	NA	2.1±0.8

Symmetry, %	Symmetric	92.1±2.7	45.1±2,8
	Asymmetric	7.9±2.7	54.9±2,8
Base shape, %	Narrowed	43.6±4.9	50.9±2.8
	Wide	56.4±4.9	49.1±2.8
Base hole shape, %	Horizontal	80.2±4.0	36.9±2.7
	Beveled	6.9±2.5	48.8±2.8
	Funnel-shaped	13.9±3.4	14.3±1.9
Top shape, %	Sharp	16.8±3.7	38.1±2.7
	Round with small pointed	80.2±4.0	NA
	Blunt	3.0±1.7	61.9±2.7
Character of the keel, %	Uniform	82.2±3.8	33.5±2.6
	Medium	5.9±2.4	12.2±1.8
	Shifted to the base	9.9±3.0	24.4±2.4
	Shifted to the top	2.0±1.4	29.9±2.5
Keel height, %	Small	4.0±1.9	25.9±2,4
	Medium	74.3±4.4	37.5±2,7
	Large	21.8±4.1	36.6±2,7
Keel shape, %	Sharp	100.0	86.9±1,9
	Blunt	NA	13.1±1.9
Keel surface, %	Smooth	97.0±1.7	NA
	Serrated	3.0±1.7	NA
Side ribs, %	Sulcate	NA	25.9±2.4
	Not developed	9.9±3.0	29.0±2,5
	Poorly developed	21.8±4.1	29.2±2.5
	Highly developed	68.3±4.6	15.9±2.0
Side ribs type, %	Sharp	79.2±4.0	NA
	Blunt	10.9±3.1	NA
	Striated	NA	NA
	Flat	9.9±3.0	NA
Dorsal seam, %	Closed along the entire length	5.0±2.2	19.5±2,2
	Closed in the middle part	3.0±1.7	NA
	Interrupted	33.7±4.7	45.7±2,8
	Open at the base	46.5±5.0	3.0±0,9
	Open at the top	7.9±2.7	25.9±2,4
	Open along the entire length	7.9±2.7	5.8±1,3
Coloring, %	Light brown	85.1±3.5	48.8±2,8
	Dark brown	15.8±3.6	51.2±2,8

Surface, %	Flat	66.3±4.7	13.7±1,9
	Slightly rough	NA	NA
	Very rough	NA	NA
	Slightly wrinkled	12.9±3.3	50.3±2,8
	Heavily wrinkled	NA	33.8±2,6
	Finely pitted-tubercular	19.8±4.0	2.1±0,8
	Coarse pitted-tubercular	NA	NA
Weight, %	Very light (< 1.1g)	NA	23.0±2,3
	Light (1.1 - 2.0 g)	53.5±5.0	71.7±2,5
	Medium (2.1 - 3.0g)	40.6±4.9	5.2±1,2
	Heavy (3.1- 4.0g)	5.9±2.4	0.1±0,5
	Very heavy (> 4g)	NA	NA

Note: NA – not available values

Stones of the ‘*Kharji*’ apricot exhibited pronounced intra-landrace variability. Mean dimensions were 19.7 ± 0.2 mm in length, 15.9 ± 0.2 mm in width, 10.1 ± 0.2 mm in thickness, with an average volume of 1661.5 ± 55.4 mm³. Medium-sized stones predominated ($34.7 \pm 4.7\%$), with small ($52.5 \pm 5.0\%$) and very small ($9.9 \pm 3.0\%$) stones also common. Stone shapes were round ($36.6 \pm 4.8\%$) and ovoid ($33.7 \pm 4.7\%$) mainly, followed by ellipsoidal ($28.7 \pm 4.5\%$); oblong stones were rare ($1.0 \pm 1.0\%$). Most stones were symmetrical ($92.1 \pm 2.7\%$), with wide ($56.4 \pm 4.9\%$) or narrow bases ($43.6 \pm 4.9\%$), horizontal basal holes ($80.2 \pm 4.0\%$), and rounded apices with a small point ($80.2 \pm 4.0\%$). All stones had a sharp keel, evenly positioned in $82.2 \pm 3.8\%$, with medium height prevailing ($74.3 \pm 4.4\%$).

Surfaces were mostly flat ($66.3 \pm 4.7\%$), while $19.8 \pm 4.0\%$ were fine pitted-tubercular; dorsal sutures were open at the base ($46.5 \pm 5.0\%$) or interrupted ($33.7 \pm 4.7\%$). Stone color was predominantly light brown ($85.1 \pm 3.5\%$). Weight distribution favored light ($53.5 \pm 5.0\%$) and medium stones ($40.6 \pm 4.9\%$), with heavy stones (3.1–4.0 g) rare ($5.9 \pm 2.4\%$). Qualitative analysis of 82 samples, each with a unique combination of traits, indicated two optimal clusters according to the GAP statistic, visualized by PCA (Figure 2).

The first two PCA axes explained 30.4% of total variance, reflecting high phenotypic diversity. Cluster 1 (70 samples) included two groups: Cl.1.1 (24 samples) with symmetrical, elliptical stones, narrow base, dorsal suture open at the base, medium-height keel, smooth surface, showing affinity to Armenian ‘*Yerevani*’ (‘*Shalakh*’); Cl.1.2 (30 samples) with predominantly rounded, medium-sized stones, wide base, and poorly developed or absent lateral ribs. Cluster 2 (12 samples) comprised small, ovoid stones with sharp apex, well-developed

keel, intermittent dorsal suture, slightly wrinkled surface, and a distinctive funnel-shaped basal aperture, indicating a relatively “wild” morphotype. The coexistence of cultivated-like and wild-type stones confirms ‘Kharji’ as a semi-wild landrace, typical of mountain regions where gradual domestication and traditional cultivation maintain high genetic and phenotypic diversity.

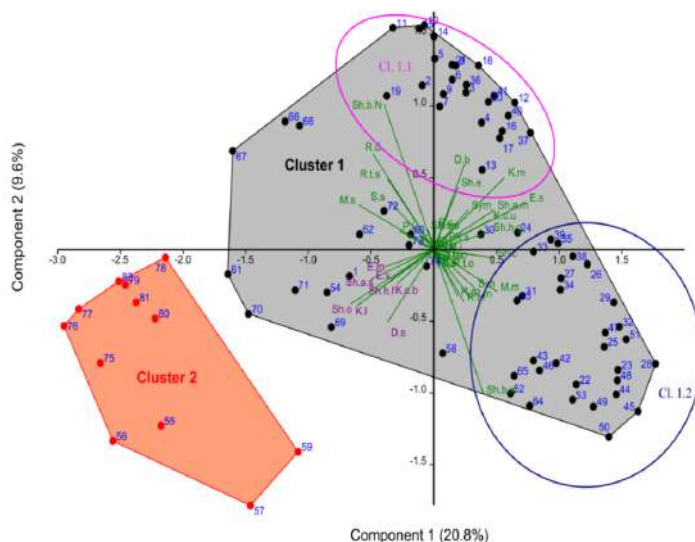


Fig. 2. Principal component analysis (PCA) of qualitative traits of the *Prunus armeniaca* ‘Kharji’ landrace endocarp

Note: S.v – Size Very Small; S.s – Size Small; S.m – Size Medium; S.l – Size Large; Sh.c – Shape Round; Sh.e – Shape Elliptical; Sh.o – Shape ovate; Sh.l – Oblong shape; Sym – Symmetrical (presence of symmetry); Sh.a.s – Acute apex shape; Sh.a.m – Rounded apex shape with a small point; Sh.a.o – Blunt apex shape; Sh.b.N – Narrowly rounded base shape; Sh.b.w – Widely rounded base shape; Sh.h.g – Base opening shape Horizontal; Sh.h.s – Base opening shape Beveled; Sh.h.f – Base opening shape Funnel-shaped; K.s – Small keel height; K.m – Medium keel height; K.l – Large keel height; K.c.u – Uniform keel character; K.c.m – Median keel character; K.c.b – Keel character Shifted toward the base; K.c.a – Keel character Shifted toward the apex; SK.s – Surface of keel Smooth; R.n – Lateral ribs Not developed; R.m – Lateral ribs Weakly developed; R.d – Lateral ribs Strongly developed; R.t.s – Type of lateral ribs Sharp; R.t.o – Type of lateral ribs Obtuse; R.t.f – Type of lateral ribs Smooth; D.c – Dorsal suture Closed along entire length; D.m – Dorsal suture Closed in middle part; D.s – Dorsal suture Interrupted; D.b – Dorsal suture Open at base; D.a – Dorsal suture Open at apex; D.o – Dorsal suture Open along entire length; E.s – Surface Smooth; E.m – Surface Slightly wrinkled; E.v – Surface Strongly wrinkled; P.l – Color of bone Light brown; M.s – Small Mass; M.m – Medium Mass; M.l – Large Mass.

Comparison of the '*Kharji*' landrace with natural apricot populations from Dagestan revealed both shared and region-specific traits (Table 4). Tree productivity was higher in Dagestan (59.7 kg) than in Armenia (20.9 kg). Leaves were larger in Dagestan, but rounded leaf forms were similar in both regions (85%), reflecting their Iranian–Caucasian origin. Stones were slightly larger in Armenia, with fewer very small and small stones (62.9% vs. 75% in Dagestan), while round and ovoid forms predominated in both regions. Symmetrical stones were more frequent in Armenia, whereas symmetry and asymmetry were equally common in Dagestan. Basal apertures differed, with horizontal bases prevailing in Armenia and beveled bases in Dagestan. Overall, these patterns reflect shared origin alongside region-specific influences of cultivation history, population age, and environmental conditions.

Fruit Biochemical Evaluation. From a technological perspective, fruits of the apricot landrace '*Kharji*' are well suited for fresh consumption, processing, canning, and drying. Notably, '*Kharji*' has previously been used in the production of the canned apricot product "Nectar", which incorporates both juice and pulp, and is characterized by a distinct aroma and elevated levels of vitamins [35].

The fruits of the '*Kharji*' landrace were characterized by relatively low mass: the average fruit weight with stone ranged from 6.89 g to 16.84 g, while the stone mass varied from 1.24 g to 1.81 g. The average pulp mass ranged between 5.65 and 15.34 g, which is considerably lower than that of most cultivated varieties.

The comparative biochemical profiling of the landrace '*Kharji*' and local cultivated apricot varieties reveals pronounced metabolic differences that reflect both genetic differentiation and domestication-driven trait selection (Table 5). '*Kharji*' samples demonstrated markedly higher variability across all organic acids. Citric acid ranged from 2.400 to 9.999 mg/ml and malic acid from 1.880 to 10.800 mg/ml, substantially exceeding the values in cultivated varieties, where malic acid remained below 0.022 mg/ml and citric acid did not exceed 0.011 mg/ml.

Tartaric acid levels were also higher and more variable in the unselected '*Kharji*' genotypes (2.340–3.200 mg/ml) compared with the cultivated varieties (0.001–0.004 mg/ml). Succinic acid, absent in all cultivated varieties, appeared only in one '*Kharji*' sample (2.694 mg/ml), indicating the presence of genotype-specific metabolic pathways within non-selected populations. Such unique metabolic signatures may reflect evolutionary diversification in local germplasm, potentially contributing to stress tolerance and ecological fitness in mountain environments. Carbohydrate profiles further underscored the differentiation between landrace form and cultivated varieties. '*Kharji*' showed greater variation in fructose (0.778–1.905% w/v) and glucose (1.186–3.262% w/v), although sucrose content remained moderate

(7.655–14.342% w/v). In contrast, cultivated varieties accumulated substantially higher sucrose concentrations, most notably in ‘*Ordubadi*’ (19.721% w/v) and ‘*Degnanush*’ (11.750% w/v), reflecting selection toward sweeter, more palatable fruits. Only the cultivar ‘*Shlor-Tsiran*’ lacked detectable sucrose.

Table 5.

Fruit Biochemical Traits of the ‘*Kharji*’ Landrace and Local Apricot Cultivars

Apricot samples	Oxalic acid mg/ml	Tartaric acid mg/ml	Malic acid mg/ml	Citric acid mg/ml	Succinic acid mg/ml	Fructose % w/v	Glucose % w/v	Sucrose % w/v	Vitamin C % w/v	Antioxidant activity mg/g
1. ‘ <i>Khardji</i> ’	Nd	2.490	1.880	2.400	Nd	0.778	1.186	7.655	0.0054	2,45
2. ‘ <i>Khardji</i> ’	0.130	3.200	5.997	9.999	Nd	1.689	2.534	8.742	0.0046	8,75
3. ‘ <i>Khardji</i> ’	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	1.905	3.262	14.342	0.0054	3,50
4. ‘ <i>Khardji</i> ’	0.360	2.340	10.800	9.350	2.694	1.799	2.965	11.556	0.0090	17,5
5. ‘ <i>Degnanush Late Ripening</i> ’	Nd	Nd	0.015	0.0004	0.008	0.640	2.085	7.638	0.0022	3,89
6. ‘ <i>Gargar</i> ’	Nd	0.004	0.022	0.002	0.001	1.766	2.966	10.587	0.0125	8,75
7. ‘ <i>Ordubadi</i> ’	Nd	0.003	0.007	0.006	Nd	1.661	2.623	19.721	0.0145	12,92
8. ‘ <i>Abutalibi</i> ’	Nd	0.0014	0.013	0.002	Nd	0.374	1.720	5.952	0.0079	4,375
9. ‘ <i>Degnanush</i> ’	Nd	0.002	0.003	0.006	Nd	0.797	1.526	11.750	0.0052	4,308
10. ‘ <i>Shlor-Tsiran</i> ’	Nd	0.001	0.010	0.011	0.005	1.935	3.368	Nd	0.0182	4,615

Note: Samples 1–2: Kotayk province; 3–4: Vayots Dzor province; 5–10: Armavir province, RA. Nd – not detected.

Vitamin C levels were generally low in ‘*Kharji*’ landrace (0.0046–0.0090% w/v), while cultivated varieties exhibited greater variability and in some cases higher content, with ‘*Shlor-Tsiran*’ showing the maximum value (0.0182% w/v). Antioxidant activity distinguished several landrace genotypes: values ranged from 2.45 to 17.5 mg/g, with the highest activity in the ‘*Kharji*’ sample from Vayots Dzor (village Khndzorut). Cultivated varieties displayed moderate activity (3.89–12.92 mg/g), with ‘*Ordubadi*’ achieving the upper range. Comparable results were obtained in wild apricot populations of Jammu and Kashmir, where wild accessions demonstrated significantly higher phenolic content and antioxidant potential than cultivated varieties [47], reinforcing the general trend observed in ‘*Khardji*’ landrace. Ash content in ‘*Khardji*’ fruits was low (0.039–0.11 g), with the highest value observed in samples from Vayots Dzor (village Zaritap). Cultivated varieties showed consistently higher mineraliza-

tion (0.132–0.26 g), reaching a maximum in ‘*Abutalibi*’ (‘*Payvast*’) (0.26 g). Cultivated genotypes were markedly more mineral-rich than the more variable, low-ash ‘*Kharji*’ samples. Overall, the dataset highlights that ‘*Kharji*’ landrace apricots retain high metabolic diversity and elevated organic acid and antioxidant levels, whereas cultivated varieties exhibit reduced acidity, increased sugar accumulation, and in some cases enhanced vitamin C content. The elevated levels of organic acids and antioxidant activity detected in ‘*Kharji*’ fruits may be associated with enhanced tolerance to abiotic stress factors prevalent in mountain environments, such as high solar radiation, temperature fluctuations, and water deficit. From a sustainable development perspective, these biochemical traits increase the functional and nutritional value of ‘*Kharji*’ fruits and support their potential use in niche and value-added products from mountain regions.

Terrace Horticulture and *Ex Situ* Collections in the Conservation of the ‘*Kharji*’ Landrace. The last century has seen a major abandonment of traditional horticultural practices, such as terrace gardening, in Armenia and the whole Caucasus. Lowland melioration practices and the larger switch from dry fruit-oriented apricot cultivation to intensive fresh fruit-oriented large-scale apricot horticulture have moved many heirloom apricot varieties and old local landraces to the borders of oblivion and disappearance. The ‘*Kharji*’ landrace, nevertheless, has been still conserved as a valuable rootstock source for grafting and fruit utilization. Recent challenges related to climate change, scarcity of water resources, and the intensification and expansion of agriculture beyond the lowlands have reawakened interest in previous horticultural practices, such as mountain terrace gardening, in combination with modern technology as a perspective approach for sustainable land use and recultivation of once abandoned and widely distributed dry slope areas in the lower and middle mountain belts of Armenia, as well as for the diversification of apricot production. This new reality highly urges the conservation of once-abandoned heirloom varieties and old landraces, such as ‘*Kharji*’, both in situ (natural habitats, traditional and terrace orchards) and ex situ (botanical gardens and gene banks), as such landraces are critical not only for biodiversity preservation but also for maintaining cultural and agricultural heritage in mountain regions. Conservation and sustainable utilization of this germplasm will support resilient horticultural systems adapted to local conditions and contribute to long-term strategies for the sustainable development of mountain agricultural landscapes.

The *ex situ* collection of the ‘*Kharji*’ apricot at the Yerevan Botanical Garden was studied alongside in situ observations from natural populations and traditional orchards. Established progressively since 2013, it comprises plant materi-

al derived from seeds and transplanted seedlings collected across the landrace's natural habitats and traditional cultivation areas. The collection enables long-term monitoring of key agronomic and adaptive traits. Each accession was registered with standard passport descriptors, including collection site, year, geographic coordinates, elevation, and propagation method, ensuring traceability. At the time of evaluation, the collection included fruiting trees as well as individuals at various vegetative stages. The presence of accessions at different developmental stages allows long-term assessment of phenology, reproductive stability, and trait expression under uniform conditions. The living collection also serves as a source of pollen and donor material for cuttings, suitable for grafting and propagation. Complementing the living collection, seeds have been deposited in the Seed Bank of the Department of the Flora of Armenia Genetic Resources Conservation, Institute of Botany, NAS RA with complete passport data. Together, living collections and seed banking offer complementary conservation strategies, ensuring long-term security and accessibility of authentic '*Kharji*' genetic resources for research and horticultural improvement.

Conclusion

This study provides a comprehensive phenotypic characterization of the '*Kharji*' landrace of Armenia, including traits of seedlings, vegetative organs, flowers, fruits, endocarp structure, pollen fertility and viability, and fruit biochemical composition.

'*Kharji*' exhibits high phenotypic variability in vegetative and reproductive traits, indicating intraspecific diversity and adaptability to diverse mountain conditions. Variation in floral structure and pollen characteristics suggests potential for both self- and cross-fertility, enhancing reproductive resilience. Fruit and endocarp morphology revealed two main morphotypes, one resembling cultivated Armenian varieties and another with wild-type features, highlighting the landrace's transitional nature. Comparisons with natural apricot populations of Dagestan suggest a shared Iranian–Caucasian origin, while region-specific differences reflect local adaptation, cultivation history, and population age.

'*Kharji*'s adaptability to high-altitude and dry conditions, combined with late flowering, temperature tolerance, frost and drought resistance, pest and disease resistance, and high pollen viability, make it a promising resource for developing stress-tolerant cultivars with extended fruiting periods and improved quality. Fruits biochemical profiling showed elevated organic acids and antioxidant activity, indicating stress-tolerant and nutritionally valuable traits. Conservation strategies should include ex situ collections in botanical gardens and gene

banks to safeguard genetic resources and ensure accessibility for research and breeding. Terrace orchards in mountainous regions further support conservation by maintaining traditional cultivation practices and favorable growing conditions, enabling the survival and fruit production of 'Kharji' in highland areas.

Future work should include molecular characterization to clarify genetic structure and evolutionary relationships within the *P. armeniaca* complex, expanding geographical sampling to further assess adaptability and resilience. Long term breeding programs incorporating local landraces like 'Kharji' are essential to ensure the conservation and effective use of these valuable genetic resources in the face of global environmental change and for the sustainable development of mountain agricultural systems.

Description of the application of the generative model. While translating the article from Russian to English, we used OpenAI (2023). ChatGPT (March 14 version) [Large language model]. <https://chat.openai.com/chat>) to correct spelling errors and improve the style of the article in English. After using this service, we reviewed and edited the content as necessary and assume full responsibility for the content of the published article.

Conflict of interest information. The authors declare that they do not have conflict of interest.

Sponsorship information. The work was founded by the Science Committee of the Ministry of Education, Science, Culture and Sports of the Republic of Armenia within the project 21T-1F132 and by the Russian Science Foundation and the Government of the Republic of Dagestan within the project 25-16-20125 for which we express our gratitude.

References

1. Akopian, J. A. (2015). Wild growing fruit plants in the Yerevan Botanical Garden "Flora and Vegetation of Armenia" Plot Collection. In *Botanical science in the modern world: Proceedings of International Conference* (pp. 396–402). Yerevan.
2. Anatov, D. M. (2019). Phenetic analysis of natural apricot populations in the Mountainous Dagestan for endocarp (stone) features. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, 180(1), 89–94. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-89-94>. EDN: <https://elibrary.ru/OHITUM>
3. Anatov, D. M. (2024a). Assessment of the resource potential of apricot in natural populations of Dagestan. *Bulletin of the DSCRAS*, 92, 26–32.
4. Anatov, D. M. (2024b). Variability of fruit morphological traits of natural *Prunus armeniaca* cenopopulations along an altitudinal gradient (Dagestan). *Botanical Journal of the North Caucasus*, 2, 15–24. https://doi.org/10.33580/24092444_2024_2_15.

5. Anatov, D. M., Osmanov, R. M., & Asadulaev, Z. M. (2018). Variability of morphological traits of *Prunus armeniaca* leaf in natural populations of Mountainous Dagestan. In *Proceedings of XIV Congress of the Russian Botanical Society* (Vol. 3, pp. 134–136).
6. Arakelyan, B. N. (1951). *Garni I: Rezul'taty raskopok 1949–1950 gg. [Garni I: Results of excavations in 1949–1950]*. Izdatel'stvo AN Armjanskoj SSR.
7. Asadulaev, Z. M., Anatov, D. M., & Gaziev, M. A. (2014). Genetic resources of *Prunus armeniaca* L. natural populations in Mountainous Dagestan. *Acta Horticulturae*, 1032, 183–190. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1032.24>. EDN: <https://elibrary.ru/SKULAP>
8. Asadulaev, Z. M., & Anatov, D. M. (2019). Spatial structure of *Prunus armeniaca* L. populations in the arid woodlands of Mountainous Dagestan. *Arid Ecosystems*, 9(2), 104–110. <https://doi.org/10.1134/S2079096119020021>. EDN: <https://elibrary.ru/VNUOMK>
9. Avdeev, V. I. (2012). *Abrykosa Evrazii: evolyutsiya, genofond, introduktsiya, selektsiya*. OSAU Publishing.
10. Avdeev, V. I. (2016). Materials on the wild apricot of Central Dagestan. *Bulletin of the OSAU*, 1(17), 94–106. EDN: <https://elibrary.ru/VPUERH>
11. Basile, B., Mataffo, A., Forlani, M., & Corrado, G. (2022). Diversity in morphometric, pomological, and fruit-quality traits of apricot (*Prunus armeniaca*) traditional varieties. *Diversity*, 14(8), 608. <https://doi.org/10.3390/d14080608>. EDN: <https://elibrary.ru/ZFONQU>
12. Burgos, L., Alburquerque, N., & Egea, N. (2004). Flower biology in apricot and its implication for breeding. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2(2), 227–241. <https://doi.org/10.5424/sjar/2004022-77>
13. Butkeviciute, A., Abukauskas, V., Janulis, V., & Kviklys, D. (2022). Phenolic content and antioxidant activity in apples of the ‘Galaval’ cultivar grown on 17 different rootstocks. *Antioxidants*, 11(2), 266. <https://doi.org/10.3390/antiox11020266>. EDN: <https://elibrary.ru/YXUVNW>
14. Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>
15. Corrado, G., Forlani, M., Rao, R., & Basile, B. (2021). Diversity and relationships among neglected apricot (*Prunus armeniaca* L.) landraces. *Plants*, 10(7), 1341. <https://doi.org/10.3390/plants10071341>. EDN: <https://elibrary.ru/DZBUBW>
16. Dilanyan, G. Kh. (1958). Abrikos [Apricot]. In *Plody Armenii. Kostočkovye* (Vol. 1). State Publishing House of Armenia.
17. Federal State Statistical Service. (2018). *Results of the All-Russian Agricultural Census of 2016: Areas of agricultural crops and perennial plantings*. IIC “Statistics of Russia”.

18. First National Communication of the Republic of Armenia to the UNFCCC. (1998). Ministry of Nature Protection of the Republic of Armenia.
19. Fratianni, F., D'acierno, A., Albanese, D., Di Matteo, M., Coppola, R., & Nazzaro, F. (2022). Biochemical characterization of traditional varieties of apricots (*Prunus armeniaca* L.). *Foods*, 11, 100–112. <https://doi.org/10.3390/foods11010100>. EDN: <https://elibrary.ru/PNGIPA>
20. Gabrielian, E., & Zohary, D. (2004). Wild relatives of food crops native to Armenia and Nakhichevan. *Flora Mediterranea*, 14, 5–80.
21. Gabrielyan, R. (2024). Irrigation systems of terraces in Armenian culture. In *The Culture of Water Use in Armenia* (pp. 222–230). AICA-Armenia. <https://doi.org/10.70459/cm/2024.001.222>
22. Gabrielyan, R., & Ananyan, A. (2025). Mapping of terraced gardens through geographic information system. *History and Culture*, 1(1), 235–246. <https://doi.org/10.46991/hc.2025.si1.235>
23. Golubinskij, I. N. (1974). *Biologija prorastanija pyl'cy [Biology of pollen germination]*. Naukova dumka.
24. Hambartzumyan, A. M. (1976). Sterility of pollen of Armenian, Central Asian and European varieties of apricot. *Biological Journal of Armenia*, 29(3), 78–81.
25. Hambartzumyan, A. M., Harutunyan, M. I., & Hambartzumyan, M. N. (1977). Wild forms of apricot in Armenia. *Biological Journal of Armenia*, 30(12), 3–8.
26. Hu, X., Zheng, P., Ni, B., Miao, X., Zhao, Z., & Li, M. (2019). Population genetic diversity and structure analysis of wild apricot (*Prunus armeniaca* L.) in the Tien-Shan Mountains of China. *Pakistan Journal of Botany*, 51(1), 15–22.
27. Kafaletou, M., Kalantzis, I., Karantzi, A., Christopoulos, M. V., & Tsantili, E. (2019). Phytochemical characterization in traditional and modern apricot (*Prunus armeniaca* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 253, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.032>
28. Khachatryan, A. R. (2002). *Agronomic Research Methods: Educational Manual*. Asoghik.
29. Kostina, K. F. (1936). *Abrikos [Apricot]*. VASKHNIL Publishing.
30. Kostina, K. F. (1969). Selection use of apricot varietal funds. *Proceedings of Nikitsky Botanical Garden*, 40, 170–189.
31. Kudrenko, I. K., Grinenko, N. S., & Moroz, P. A. (2005). Study of quality of pollen of apricot (*Armeniaca vulgaris* L.) and peach (*Persica vulgaris* Mill.) by introduction in Ukrainian Forest Steppe. *Plant Introduction*, 1, 77–80. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2586174>
32. Lachkar, A., Chaar, H., & Mars, M. (2014). Reproductive behavior of Tunisian apricot cultivars as related to floral morphometric characteristics and pollen quality. *In-*

- ternational Journal of Fruit Science*, 14(2), 188–204. <https://doi.org/10.1080/15538362.2013.818389>
33. Mamajanyan, S. A. (2018). *Methodology of Agronomic Research*. Armenian National Agrarian University.
 34. Mehlenbacher, S. A., Cociu, V., & Hough, L. F. (1991). Apricots (*Prunus*). *Acta Horticulturae*, 290, 65–110. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1991.290.3>
 35. Meliksetyan, F. Z. (1970). Apricot nectars from fruits of ungrafted ‘Kharji’ trees. In *Proceedings of the scientific conference on apricot* (pp. 449–451). Ayastan.
 36. Morikyan, E. S. (1988). *Armenian apricots*. Ayastan Publishing House.
 37. Nebish, A. A., Santrosyan, G. S., & Aroutiounian, R. M. (2018). Reproductive biology of Armenian apricot cultivars. *Acta Horticulturae*, 1214, 95–102. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1214.16>. EDN: <https://elibrary.ru/RIEGBA>
 38. Pausheva, Z. P. (1988). *Praktikum po tsitologii rastenii [Plant Cytology Practical Training]*. Agropromizdat.
 39. Sardaryan, S. H. (1967). *Nakhnadaryan hasarakutyuny Hayastanum [Primitive Society in Armenia]*. Mitk Publishing House.
 40. Shi, Y., Wei, W., Wang, W., Tarolli, P., & Chen, L. (2025). Food provision responses to changes in mountainous terraced and sloping cropland. *Geography and Sustainability*, 6(4), 100302. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2025.100302>. EDN: <https://elibrary.ru/MBJHYZ>
 41. Stepanyan, N. P., & Stepanyan, H. A. (2011). New location of the wild growing apricot (*Armeniaca vulgaris* Lam.) in Armenia. *Takhtajania*, 190–191.
 42. Su, C., Zheng, X., Zhang, D., Chen, Y., Xiao, J., He, Y., He, J., Wang, B., & Shi, X. (2020). Investigation of sugars, organic acids, phenolic compounds and aroma fingerprint of small white apricots. *Journal of Food Science*, 85, 4300–4311. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15523>. EDN: <https://elibrary.ru/IIOIDW>
 43. Tibshirani, R., Walther, G., & Hastie, T. (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 63(2), 411–423. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293>
 44. Tsaturyan, A. (2021). *Theoretical and Applied Basics of High-Performance Liquid Chromatography*. YSU Publishing House. <https://doi.org/10.46991/YSUPH/9785808424906>
 45. UPOV (TG/70/5, proj.1). (2021). *Guidelines for the Conduct of Tests for Distinctness, Uniformity and Stability*. International Union for the Protection of New Varieties of Plants.
 46. Vavilov, N. I. (1931). Wild progenitors of the fruit trees of Turkistan and the Caucasus. In *Proceeding of IX International Horticultural Congress* (pp. 217–286). London.
 47. Zargar, S. A., Wani, A. A., Saggoo, M. I. S., Kumar, N., Mir, J. I., Jan, S., & Dabbou, S. (2023). Chemical quality attributes, phenolic compounds, and antioxidant prop-

- erties of wild and cultivated apricot accessions. *Erwerbs-Obstbau*, 65, 2325–2336. <https://doi.org/10.1007/s10341-023-00937-1>. EDN: <https://elibrary.ru/LNJDKB>
48. Zurov, D. E., Molnar, T. J., Eisenman, S. W., Ford, T. M., Mavlyanova, R. F., Capik, J. M., Funk, C. R., & Goffreda, J. C. (2013). Genetic resources of apricots (*Prunus armeniaca* L.) in Central Asia. *HortScience*, 48(6), 681–691. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.6.681>. EDN: <https://elibrary.ru/XMHBLZ>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

- Janna A. Akopian:** fieldwork, conceptualization, phenotypification, manuscript contribution and edition.
- Yevgenia M. Navasardyan:** pollen study, phenotypification, conceptualization, manuscript contribution.
- Dzhalaludin M. Anatov:** conceptualization, phenotypification, statistical analysis, manuscript contribution.
- Vigen B. Goginyan:** fruit biochemical analysis, conceptualization, manuscript contribution.
- Sasun A. Mamajanyan:** statistical analysis, phenotypification, manuscript contribution.
- Alexander V. Rudov:** conceptualization, phenotypification, manuscript contribution and edition, fieldwork. Alexander Rudov in addition to co-authoring the article, coordinates correspondence with the editors of the journal.
- Gevorg M. Zaroyan:** fieldwork.
- Gayane S. Gabrielyan:** phenotypification, conceptualization, fieldwork, manuscript contribution.

ВКЛАД АВТОРОВ

- Акопян Ж.А.:** полевые исследования, разработка концепции, фенотипизация, подготовка и редактирование рукописи.
- Навасардян Е.М.:** изучение пыльцы, фенотипизация, разработка концепции, подготовка рукописи.
- Анатов Д.М.:** разработка концепции, фенотипизация, статистический анализ, подготовка рукописи.
- Гогинян В.Б.:** биохимический анализ плодов, разработка концепции, подготовка рукописи.
- Мамаджanyн С.А.:** статистический анализ, фенотипизация, подготовка рукописи.
- Рудов А.В.:** разработка концепции, фенотипизация, подготовка и редактирование рукописи, полевые исследования. Александр Рудов, помимо соавторства статьи, координирует переписку с редакторами журнала.
- Зароян Г.М.:** полевые исследования.
- Габриелян Г.С.:** фенотипизация, разработка концепции, полевые исследования, подготовка рукописи.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Janna A. Akopian, Doctor of Biological Sciences, Leading researcher of the Plant Introduction Department, A. Takhtajan Institute of Botany
Armenian National Academy of Sciences
1, Acharyan Str., Yerevan, 0063, Republic of Armenia
akopian_janna@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1935-8075>

Yevgenia M. Navasardyan, Candidate of Biological Sciences, Researcher of the Department of the Flora of Armenia Genetic Resources Conservation, A. Takhtajan Institute of Botany
Armenian National Academy of Sciences
1, Acharyan Str., Yerevan, 0063, Republic of Armenia
y_navasardyan@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4749-0839>

Dzhalaludin M. Anotov, Candidate of Biological Sciences, Senior Research of the Laboratory of Introduction and Wood Plant Genetic Resources
Mountain Botanical Garden of the Dagestan Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
45, M. Gadzhiev Str., Makhachkala, Republic Dagestan, 367000, Russian Federation
djalal@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6725-4086>

Vigen B. Goginyan, Candidate of Biological Sciences, Deputy Director, Head of Laboratory of Energy Alternative Sources
"Armbiotechnology" Scientific and Production Center NAS RA
14, Gyurjyan Str., Yerevan, 0056, Republic of Armenia
goginyan@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7697-6515>

Sasun A. Mamajanyan, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair of Crop Cultivation and Soil Science
National Agrarian University of Armenia
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
s.mamajanyan@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4691-6995>

Alexander V. Rudov, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Department of the Flora of Armenia Genetic Resources Conservation, A. Takhtajan Institute of Botany

Armenian National Academy of Sciences

1, Acharyan Str., Yerevan, 0063, Republic of Armenia

vatyalaikal@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8501-8826>

Gevorg M. Zaroyan, nursery manager

Armenia Tree Project (ATP) Charitable Foundation

57/5, Arshakunyats Ave., Yerevan, 0026, Republic of Armenia

zaroyan-gev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7764-7488>

Gayane S. Gabrielyan, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair of Horticulture and Plant Protection

National Agrarian University of Armenia

74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia

gaygabrielyan1978@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4691-6995>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Акопян Жанна Андраниковна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Отдела интродукции растений Института ботаники им. А. Тахтаджяна

Национальная Академия Наук Армении

ул. Ачаряна, 1, г. Ереван, 0063, Республика Армения

akopian_janna@inbox.ru

Навасардян Евгения Михайловна, кандидат биологических наук, научный сотрудник Отдела сохранения генетических ресурсов флоры Армении Института ботаники им. А. Тахтаджяна

Национальная Академия Наук Армении

ул. Ачаряна, 1, г. Ереван, 0063, Республика Армения

y_navasardyan@mail.ru

Анатов Джалалудин Магомедович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории интродукции и генетических ресурсов древесных растений

*Горный ботанический сад – обособленное подразделение Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук
ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Российская Федерация
djalal@list.ru*

Гогинян Виген Борисович, кандидат биологических наук, заместитель директора, заведующий Лабораторией альтернативных источников энергии
*Научно-производственный центр НАН РА «Армбиотехнология»
ул. Горджяна, 14, г. Ереван, 0056, Армения
goginyan@mail.ru*

Мамаджаниян Сасун Аршалуйсович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра растениеводства и почвоведения
*Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
s.matajanyan@gmail.com*

Рудов Александр Вахтангович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Отдела сохранения генетических ресурсов флоры Армении, Институт ботаники им. А. Тахтаджана
*Национальная Академия Наук Армении
ул. Ачаряна, 1, г. Ереван, 0063, Республика Армения
vatyalaikal@gmail.com*

Зароян Геворг Мартикович, руководитель питомника
*Благотворительный фонд «Armenia Tree Project (АТР)»
пр. Аршакуняц, 57/5, г. Ереван, 0026, Республика Армения
zaroyan-gev@mail.ru*

Габриелян Гаяне Сардаровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра садо-плодоводства и защиты растений
*Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
gaygabrielyan1978@gmail.com*

Поступила 29.12.2025

После рецензирования 01.04.2026

Принята 21.04.2026

Received 29.12.2025

Revised 01.04.2026

Accepted 21.04.2026

**Лесоведение, лесоводство,
лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение,
лесная пирология и таксация /
Forest Science, Silviculture, Forest Cultivation,
Agroforestry, Greening, Forest Pyrology,
and Forest Inventory**

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1821](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1821)EDN: [NNRIVK](https://www.edn.ru/NNRIVK)

UDC 630.332



**Results of simulation modeling and optimization
of design parameters of forest rake**

**A.A. Platonov, D.Yu. Druchinin, M.A. Gnusov,
A.V. Shkolnykh, M.A. Popov**

*Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Background. Forest rakes for collecting or raking logging residues are widely used in forestry operations worldwide. The authors' review highlighted the relevance of research aimed at optimizing the design parameters of forest rakes.

The **purpose** is to improve the design elements of forest rakes to increase the efficiency of their use and the quality of work performed.

Materials and methods. The study object was a forest rake with a broken profile of the working elements (teeth). The subject of the study was a mathematical model of the formation of a logging residue pile using a forest rake, taking into account the characteristics of the forest rake and the raked biomass. To identify the optimal design characteristics of a forest rake, a calculation scheme was developed for the formation of a drag pile of logging residue using a forest rake.

Results. Mathematical modeling of the aforementioned drag pile allowed us to identify expressions for determining the optimal height, length, and tilt angles of the upper and lower parts of forest rake teeth. It was established that for the most probable range of internal friction angle variation of 44...46° and expected logging residue lengths of 0.7...1.2 m, the optimal height of a forest rake varies within the range of 840...1800 mm. For lower tooth inclination angles of 32...40°, the optimal length of the upper tooth of a forest rake varies within the range of 840...1100 mm. For upper tooth inclination angles

of 5...11°, the optimal length of the lower tooth of a forest rake varies within the range of 620...790 mm. The need for continued research into the design parameters of forest rakes in the direction of their multifactor optimization to substantiate the optimal performance of forest rakes is substantiated.

Keywords: logging residues; raking; forest rakes; dependence; simulation modeling; optimal characteristics

For citation. Platonov, A. A., Druchinin, D. Yu., Gnusov, M. A., Shkolnykh, A. V., & Popov, M. A. (2026). Results of simulation modeling and optimization of design parameters of forest rake. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 306–322. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1821>

Результаты имитационного моделирования и оптимизации конструктивных параметров лесных граблей

А.А. Платонов, Д.Ю. Дручинин, М.А. Гнусов,
А.В. Школьных, М.А. Попов

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. В мировой практике выполнения лесохозяйственных работ широко распространены лесные грабли, осуществляющие сбор или сгребание порубочных остатков. Выполненный авторами статьи обзор позволил выявить актуальность проведения исследований, направленных на оптимизацию конструктивных параметров лесных граблей.

Цель – совершенствование конструктивных элементов лесных граблей для повышения эффективности их применения и качества выполняемых работ.

Материалы и методы. Объект исследования представлял собой лесные грабли с ломаным профилем рабочих элементов (зубьев). Предмет исследования представлял собой математическую модель формирования посредством лесных граблей объема вороха порубочных остатков с учётом характеристик лесных граблей и сгребаемой биомассы. Для выявления оптимальных конструктивных характеристик лесных граблей была составлена расчётная схема формируемого при помощи лесных граблей вороха волочения порубочных остатков.

Результаты. Математическое моделирование указанного вороха волочения позволило выявить выражения для определения оптимальных величин высоты, длин и углов наклона верхней и нижней частей зуба лесных граблей. Установлено, что для наиболее вероятного диапазона изменения угла внутреннего трения 44...46° и ожидаемых размеров длины порубочных остатков 0,7...1,2 м оптимальная ве-

личина высоты лесных граблей варьируется в диапазоне 840...1800 мм. При величинах углов наклона нижней части зуба 32...40° оптимальная величина длины верхней части зуба лесных граблей варьируется в диапазоне 840...1100 мм. При величинах углов наклона верхней части зуба 5...11° оптимальная величина длины нижней части зуба лесных граблей варьируется в диапазоне 620...790 мм. Обоснована необходимость продолжения исследований конструктивных параметров лесных граблей в направлении их многофакторной оптимизации для обоснования оптимальной производительности работы лесных граблей.

Ключевые слова: порубочные остатки; сгребание; лесные грабли; зависимость; имитационное моделирование; оптимальные характеристики

Для цитирования. Платонов, А. А., Дручинин, Д. Ю., Гнусов, М. А., Школьных, А. В., & Попов, М. А. (2026). Результаты имитационного моделирования и оптимизации конструктивных параметров лесных граблей. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 306–322. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1821>

Introduction

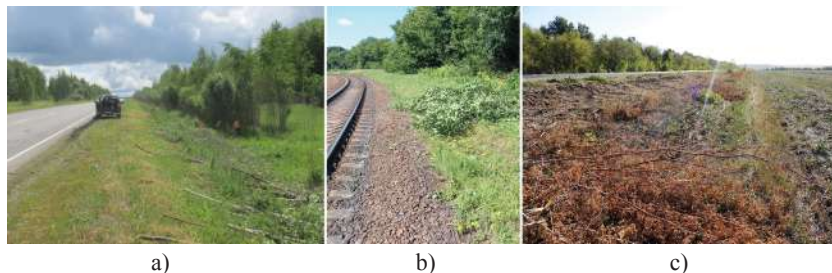
In today's world, the growing process of “greening” production is becoming increasingly important in addressing the challenges of sustainable use of natural resources, particularly in waste management. Incorporating some of the inevitably generated waste into new production as secondary materials is a key environmental and economic objective for many enterprises, including those in the forestry sector.

One of the types of waste that represents the most important link in the environmental safety of modern forestry production is wood waste, in particular logging residues.

The established practice of Russian and global logging and forestry enterprises in the overwhelming majority of cases provides for the inevitable formation of so-called «logging residues», while the method of their formation (cutting of growing vegetation, uprooting or tearing out) is not taken into account to indicate the very fact of their occurrence. The logging residues that remain in the forest (or at the site of forestry work) often include the crown and/or root parts of harvested trees, unwanted tree and shrub vegetation (including small-sized undergrowth), fragments of trunks, branches and twigs, etc. (Fig. 1).

As a completely free raw material resource, logging residues (raked logging residues: RLR) can be used to achieve lean production goals such as «minimizing costs» for their formation and the possibility of reuse. However, one of the challenges in ensuring the «reuse» of logging residues is the need to ensure

their efficient collection or raking for delivery to the processing site for chips [10] or loading onto vehicles for removal.



a) Cheboksary-Surskoye highway, 2019; b) Lebedi–Saraevka railway section, 2021;
c) Nizhnaya Veduga–Terbuny highway, 2024.

Fig. 1. Formed logging residues

The research of the authors of the article [2] of the world practice of forestry work revealed the widespread use of forest rakes for collecting (Grab Buckets For Excavators; Fig. 2, a) or raking (Digga Stick Rake-2130; Fig. 2, b) logging residues, while in Russia these technological operations have not yet found wide application.



Fig. 2. Collection and raking of logging residues with a forest rake

An analysis of the content of global (including Russian) publications devoted to the issue of collecting or raking logging residues has revealed such areas of research as improving existing methods and technologies used for collecting logging waste [12], including substantiating the possibility of applying the concept of «lean production» in logging operations from the point of view of all stages of logging production (logging operations, timber transportation, logging operations, forest restoration operations) [3]; justification of the feasibility of minimizing the

time of collection of the forming biomass between the cycles of its cutting and subsequent processing, especially in continuous technological cycle systems (D. Bergström [7]), ensuring an increase in tractor productivity (N. Kaakkurivaara, A.R. Proto et al. [11; 13; 16]); optimization of the distances of movement of logging residues across the cutting area (M. Aalto, T. Yoshimura, S.A. Borz et al. [5; 8; 17]) taking into account the efficiency of previous and subsequent processes of work on vegetation [15]. The issues of damage to thinned stands remaining after the removal of woody biomass using various mechanization tools were considered in the works of M.-J. Cho, E. Lee et al. [9; 14], the condition of the vegetation cover on strip roads of clearcuts covered with logging residues was assessed in the works of N.I. Tsarev, A.S. Ilintsev et al. [1; 4].

The representative review carried out made it possible to establish that at present, world scientific thought in the field of knowledge under consideration is directed towards improving technologies for collecting waste from logging production, including to increase the productivity of tractors and multifunctional machines, and also to reduce the environmental damage caused to nature during the operation of technical equipment that collects or rakes logging residues. However, only a few studies note the need for a thorough study (including simulation modeling methods) of the technical means that deliver the biomass obtained after cutting by dragging to the place of its further transportation by motor vehicles. In particular, S. Ackerman et al. [6] found results indicating a discrepancy between the volume of standing timber, the volume of cut woody vegetation, and the volume of timber delivered to the roadside. Noting the inevitable losses during the dragging of woody biomass, the authors of the study draw attention to the advisability of modeling the performance of biomass raking equipment using data on their optimal characteristics. In this regard, it is important to conduct research on the issue of identifying the optimal design parameters of forest rakes.

The aim of the study is to improve the design elements of forest rakes to increase the efficiency of their use and the quality of work performed.

This objective is achieved by developing an appropriate mathematical model that takes into account the design parameters of forest rakes and the characteristics of the raked logging residues, as well as by performing simulation modeling that allows identifying the optimal design characteristics of forest rakes.

Materials and methods

The study, which is theoretical and based on the synthesis of a number of mathematical expressions with their subsequent numerical solution, was carried out using universal methods of analytical mechanics. The object of the study

was a forest rake with a broken profile of the working elements (teeth), common in Russia and Belarus, attached to the front or rear hitch of a tractor (for example, type Belarus-82.1; Fig. 3).

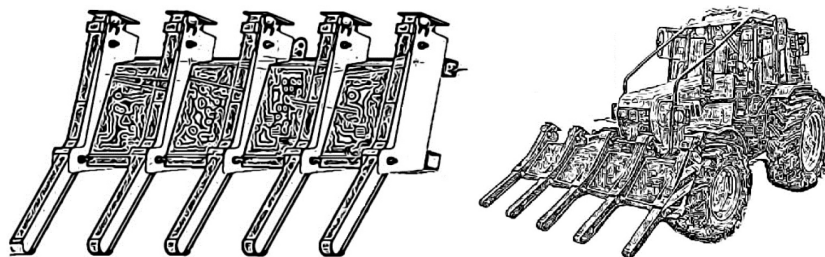


Fig. 3. Models of forest rakes and a tractor with a rake

The subject of the study was a mathematical model of the formation of a pile of logging residues using forest rakes, taking into account the characteristics of the forest rakes and the raked biomass.

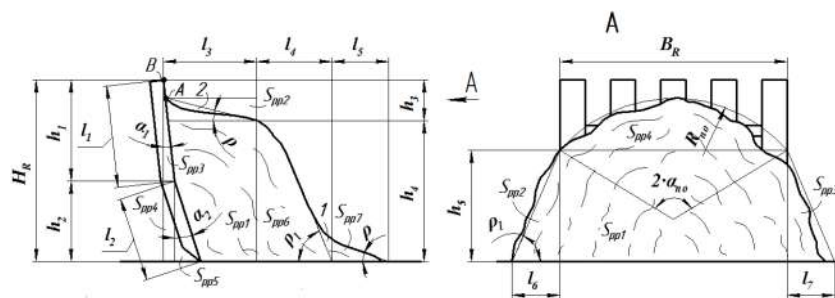


Fig. 4. Calculation scheme for the volume of logging residues generated using a forest rake

To identify the optimal design characteristics of forest rakes, a calculation scheme was drawn up for the formation of a heap of logging residues by means of a forest rake (Fig. 4), the mass, density and volume of which are determined by a combination of the design parameters of the technical means under consideration, in particular, B_R and H_R are the width and height of the forest rake, respectively, m; l_1 and l_2 – the lengths of the upper and lower parts of the forest rake tooth, m; α_1 and α_2 – angles of inclination of the upper and lower parts of the forest rake tooth, degrees. Other key parameters for the interaction of broken-profile forest rakes with logging residues were: ρ – angle of internal friction of freshly cut

wood (logging residues) at rest, deg.; ρ_1 – critical angle of collapse of freshly cut wood (logging residues), deg.; h_3 – the distance from the upper extreme point of the working surface of a forest rake to the point where freshly cut wood (logging residues) begins to fall, m; l_6 (l_7) – width of the raked shaft of logging residues, m. In addition, the volume of the drag pile is influenced by the largest size of the raked logging residues l_{RLR} (m; namely, the length or span of branches at their most distant points from the trunk/trunks of raked logging residues), number of working elements (teeth) Z , width of working elements (teeth) B_z (m).

Results and discussion

Mathematical modeling of a heap of logging residues formed by means of a forest rake allowed us to identify an expression for determining the area S_{pp} (m²) of the longitudinal section of the volume of the said heap:

$$\begin{aligned}
 S_{pp} &= S_{pp1} - S_{pp2} - S_{pp3} - S_{pp4} - S_{pp5} + S_{pp6} = \\
 &= \frac{H_R \cdot h_3}{tg \rho} - \frac{h_3^2}{2 \cdot tg \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1 - \\
 &\quad - \frac{l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot l_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - h_3)^2}{2 \cdot tg \rho_1} = \\
 &= \frac{H_R \cdot h_3}{tg \rho} - \frac{h_3^2}{2 \cdot tg \rho} - \frac{l_1^2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1}{2} - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 - \\
 &\quad - \frac{l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2}{2} + \frac{(H_R - h_3)^2}{2 \cdot tg \rho_1}
 \end{aligned} \tag{1}$$

The established expression (1) is a function of the longitudinal cross-sectional area of logging residues (moving along the cleared surface and interacting with it) depending on the design parameters of the forest rake (namely – H_R , l_1 , l_2 , α_1 and α_2) and taking into account the angles of internal friction ρ and collapse ρ_1 of freshly cut (cut down, torn out with the root system, etc.) vegetation (logging residues).

To identify the optimal values of the design parameters of forest rakes (namely: height H_{Ropt} , length l_{1opt} and l_{2opt} upper and lower parts of the tooth, angles α_{1opt} and α_{2opt} inclination of the upper and lower parts of the tooth) let us differentiate the right-hand side of equation (1) accordingly with respect to H_R (l_1 , l_2 , α_1 and α_2) and obtain the corresponding expressions, including the values of the angles of internal friction ρ and collapse ρ_1 of logging residues:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{R\ opt} = h_3 \cdot \left| 1 - \frac{\operatorname{tg} \rho_1}{\operatorname{tg} \rho} \right|; l_{1\ opt} = \frac{l_2 \cdot \cos \alpha_2}{\cos \alpha_1}; l_{2\ opt} = \frac{l_1 \cdot \sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \\ \alpha_{1\ opt} = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{l_2^2 + 4 \cdot l_1^2 + l_2^2 \cdot \cos(2 \cdot \alpha_2)} - 2 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2}{4 \cdot l_1} \right) \\ \alpha_{2\ opt} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{4 \cdot l_2^2 + l_1^2 - l_1^2 \cdot \cos(2 \cdot \alpha_1)} - 2 \cdot l_1 \cdot \sin \alpha_1}{4 \cdot l_2} \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

The design parameters of forest rakes have the greatest impact on their operating efficiency and the overall quality of logging residue removal from the cleared area. Taking this into account, the change in the parameters of the forest rake, the parameters of logging residues, the working conditions and operation of the base vehicle during simulation modeling was carried out within the following limits: $Z = 4 \dots 20$; $B_z = 65 \dots 85$ mm with discreteness 5 mm; $B_R = 2 \dots 2,5$ m with discreteness 0,1 m; $H_R = 1,1 \dots 1,8$ m with discreteness 0,1 m; $l_1 = 0,8 \dots 1,2$ m with discreteness 0,05 m; $l_2 = 0,5 \dots 0,9$ m with discreteness 0,1 m; $\alpha_1 = 2 \dots 25^\circ$ with discreteness 1° ; $\alpha_2 = 25 \dots 50^\circ$ with discreteness 1° ; $\rho = 30 \dots 50^\circ$ with discreteness 1° ; $\rho_1 = 55 \dots 75^\circ$ with discreteness 1° ; $l_{RLR} = 0,5 \dots 1,25$ m with discreteness 0,15 m.

The results of simulation modeling of the optimal values $H_{R\ opt}$ (mm) of the height of forest rakes made it possible to establish (Fig. 5), that in the studied range of changes in the angles ρ of internal friction, a 2.5-fold reduction in the length of logging residues leads to a 185% reduction in the optimal height of forest rakes, moreover, within the same angle ρ value, such a reduction reaches 250%. For the most probable range of change in the angle of internal friction $\rho = 44 \dots 46^\circ$ and the expected length of logging residues $l_{RLR} = 0.7 \dots 1.2$ m, the optimal height of the forest rake varies in the range $H_{R\ opt} = 840 \dots 1800$ mm.

The results of simulation modeling of the optimal values $l_{1\ opt}$ (mm) of the length of the upper part of the tooth of a forest rake made it possible to establish (Fig. 6), that in the studied range of angle α_2 changes, a reduction in the length l_2 of the lower part of the forest rake tooth by 1.4 times leads to a decrease in the optimal length $l_{1\ opt}$ by 1.1...1.2 times. In both the region of large and small values of angles α_2 , when changing the length of the lower part of the tooth, the optimal values of the length of the upper part of the tooth of a forest rake differ

moderately ($\Delta l_{opt} = 21...24\%$), as do the optimal values of the heights of forest rakes ($\Delta H_{Ropt} = 28...30\%$). For angles α_2 of $32...40^\circ$, the optimal length l_{opt} of the upper part of the forest rake tooth varies in the range of $840...1100$ mm.

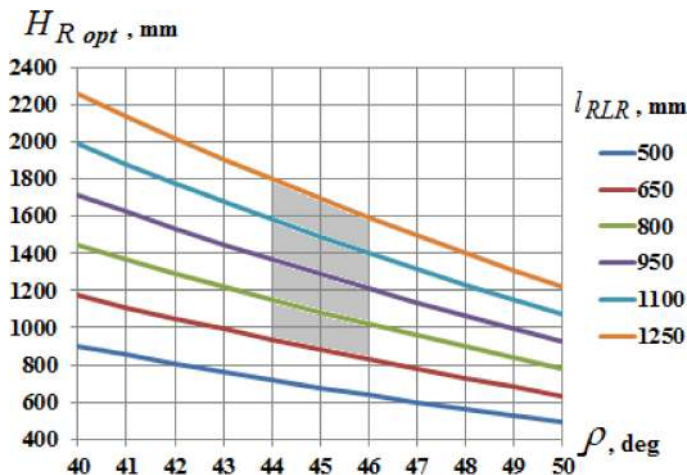


Fig. 5. Results of simulation modeling of optimal values of forest rake height depending on the angle of internal friction and the length of logging residues

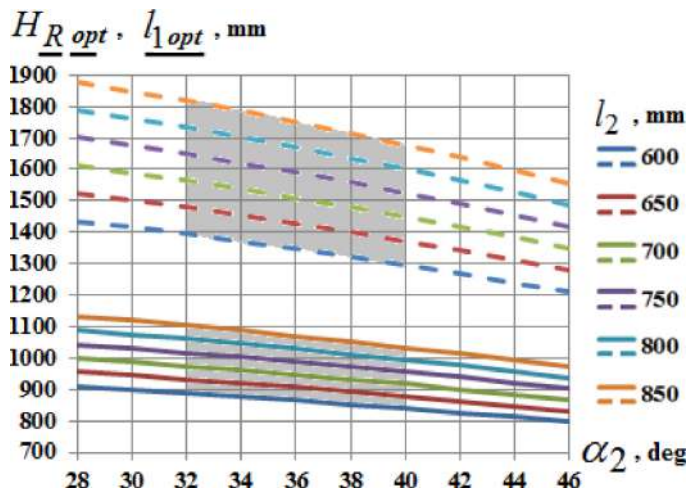


Fig. 6. Results of simulation modeling of optimal values of the length l_{1opt} of the upper part of the tooth and the height H_{Ropt} of the forest rake depending on the angle α_2 of inclination and the length l_2 of the lower part of the tooth

The results of simulation modeling of the optimal values (mm) of the length of the lower part of the tooth of a forest rake made it possible to establish (Fig. 7), that in the studied range of angle α_1 changes, a reduction in the length l_1 of the upper part of the forest rake tooth by 1.2 times leads to an increase in the optimal length l_{2opt} by 1.6...1.7 times. In the region of small angle values $\alpha_1 = 2...4^\circ$, when changing the length of the upper part of the tooth, the optimal values of the length of the lower part of the tooth of a forest rake differ insignificantly ($\Delta l_{2opt} = 2.5...3.5\%$), while for large angle values $\alpha_1 = 18...20^\circ$ the differences in the studied length reach $\Delta l_{2opt} = 11\%$ or more. For angles α_1 of $5...11^\circ$, the optimal length l_{2opt} of the lower part of the forest rake tooth varies in the range of 620...790 mm.

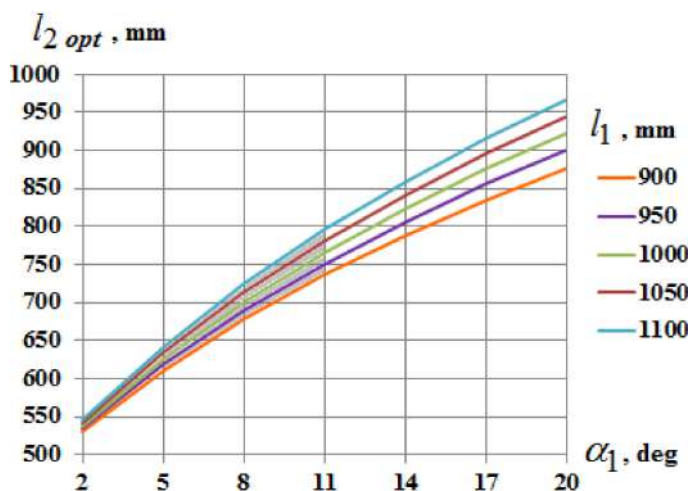


Fig. 7. Results of simulation modeling of optimal values of the length l_{2opt} of the lower part of the tooth of a forest rake depending on the angle α_1 of inclination and the length l_1 of the upper part of the tooth

The design, manufacture and practical application of forest rakes based on the identified optimal values of their design parameters will make it possible to solve a whole range of forestry problems by aggregating the technical means in question on tractors of varying power. At the same time, it should be noted that it is necessary to continue research in the direction of multi-factor optimization of the design parameters of forest rakes in order to ensure the possibility of visualization and description of the indicators of the influence of the design parameters of forest rakes on the efficiency (in particular, productivity) of their work.

Conclusion

1. It has been established that despite the widespread use of forest rakes in global forestry practice, there are no studies devoted to determining the optimal characteristics of technical means for collecting and raking logging residues.

2. It is shown that for the most probable range of change in the angle of internal friction of logging residues of $44...46^\circ$ and the expected dimensions of their length of $0.7...1.2$ m, the optimal value of the height of a forest rake varies in the range $H_{\text{Ropt}} = 840...1800$ mm. With the inclination angles of the lower part of the tooth of $32...40^\circ$, the optimal length of the upper part of the forest rake tooth varies in the range $l_{\text{1opt}} = 840...1100$ mm. With the angles of inclination of the upper part of the tooth of $5...11^\circ$, the optimal length of the lower part of the tooth of a forest rake varies in the range $l_{\text{2opt}} = 620...790$ mm.

3. The necessity of continuing the research of design parameters of forest rakes in the direction of their multifactor optimization to substantiate the optimal performance of forest rakes is substantiated.

Sponsorship information. The study was supported by grant № 25-19-00876 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-19-00876>.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при поддержке гранта № 25-19-00876 Российского научного фонда, <https://rscf.ru/project/25-19-00876>.

References

1. Ilintsev, A. S., Nakvasina, E. N., & Högbom, L. (2021). Methods for protecting forest soils during logging operations (review). *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, 5(383), 92–116. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-92-116>. EDN: <https://elibrary.ru/TVHEDO>
2. Platonov, A. A. (2023). Forest rakes: Purpose, scope of application, classification. *Lesnoy Vestnik (Forestry Bulletin)*, (27), 6–15. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-6-139-150>. EDN: <https://elibrary.ru/PJFUHM>
3. Trushevsky, P. V., Kunitskaya, O. A., Dolzhikov, I. S., et al. (2023). Analysis of technical and technological solutions for clearing cutting areas from logging residues. *Resources and Technology*, (4), 89–138. <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.7283>. EDN: <https://elibrary.ru/DGVGRF>
4. Tsarev, N. I., & Nakvasina, E. N. (2025). State of vegetation and soil on skid trails of clearcuts covered with logging residues in the northern forest region of the Arkhangelsk Oblast. *Vestnik of the Buryat State Agricultural Academy named after V. R. Filippov*, (2), 128–137. <https://doi.org/10.34655/bgsha.2025.79.2.015>. EDN: <https://elibrary.ru/MIKYFS>

5. Aalto, M., Gyawali, A., & Ranta, T. (2022). Boom-corridor thinning removal portion estimation with agent-based simulation. *Biomass and Bioenergy*, (160), 106418. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106418>. EDN: <https://elibrary.ru/GRLDIB>
6. Ackerman, S., McDermid, H., & Ackerman, P. (2021). The effectiveness of a small-scale combination harvester/forwarder in industrial plantation first thinning operations. *International Journal of Forest Engineering*, (33), 1–10. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1978798>. EDN: <https://elibrary.ru/UNKHAC>
7. Bergström, D. (2019). Cost analysis of innovative biomass harvesting systems for young dense thinnings. *Croatian Journal of Forest Engineering*, (40), 221–230. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2019.552>
8. Borz, S. A., Maris, A.-C., & Kaakkurivaara, N. (2023). Performance of skidding operations in low-access and low-intensity timber removals: A simulation of productivity and fuel consumption in mature forests. *Forests*, (14), 265. <https://doi.org/10.3390/f14020265>. EDN: <https://elibrary.ru/JGUJUG>
9. Cho, M.-J., Choi, Y., Oh, J.-H., et al. (2022). Comparison of harvesting productivity, cost, and residual stand damages between single-tree selection thinning and mechanized line thinning using a small-scale grapple-saw. *Forest Science and Technology*, (18), 1–11. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2069871>. EDN: <https://elibrary.ru/ZSUJEO>
10. Fokin, S., Shportko, O., & Druchinin, D. (2024). On shredding of wood raw materials with knives of different designs. *BIO Web of Conferences*, (145), 03012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414503012>. EDN: <https://elibrary.ru/RVOYTL>
11. Forkuo, G. O., Marcu, M. V., Iordache, E., et al. (2024). Timber extraction by farm tractors in low-removal-intensity continuous cover forestry: A simulation of operational performance and fuel consumption. *Forests*, (15), 138. <https://doi.org/10.3390/f15081422>. EDN: <https://elibrary.ru/GWYVVQ>
12. Ghaffariyan, M. R. (2023). Short review of collecting technologies and methods in forest harvesting residues recovery. *Silva Balcanica*, 24(1), 55–68. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.24.e97620>. EDN: <https://elibrary.ru/UFMSMT>
13. Kaakkurivaara, N., Borz, S., & Kaakkurivaara, T. (2025). Productivity and efficiency of extracting small-sized eucalyptus logs by farm tractors with backhoe grapples in Thailand short-rotation forestry. *Croatian Journal of Forest Engineering*, (47), 13. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2026.3605>. EDN: <https://elibrary.ru/FKWXJM>
14. Lee, E., Lee, S.-T., Mun, H.-S., et al. (2024). Assessing the residual stand damage after thinning with different levels of mechanization. *Forests*, (15), 794. <https://doi.org/10.3390/f15050794>. EDN: <https://elibrary.ru/VOTHOH>
15. Platonov, A. A. (2021). Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation. *Lesnoy Vestnik (Forestry Bulletin)*, 25(1), 115–122. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-115-122>. EDN: <https://elibrary.ru/FMPPNC>

16. Proto, A. R., Bernardini, V., Cataldo, M., et al. (2020). Whole tree system evaluation of thinning a pine plantation in southern Italy. *Annals of Silvicultural Research*, (45), 44–52. <https://doi.org/10.12899/asr-1849>
17. Yoshimura, T., Suzuki, Y., & Sato, N. (2025). Application of system dynamics simulation to assess system productivity of forest harvesting systems: A case study from Japan. *Forests*, (16), 734. <https://doi.org/10.3390/f16050734>. EDN: <https://elibrary.ru/QQIHMW>

Список литературы

1. Ильинцев, А. С., Наквасина, Е. Н., & Högbom, L. (2021). Способы защиты лесных почв в ходе лесозаготовительных работ (обзор). *Известия вузов. Лесной журнал*, 5(383), 92–116. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-92-116>. EDN: <https://elibrary.ru/TVHEDO>
2. Платонов, А. А. (2023). Грабли лесные: назначение, область применения, классификация. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*, (27), 6–15. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-6-139-150>. EDN: <https://elibrary.ru/PJFUHM>
3. Трушевский, П. В., Куницкая, О. А., Должиков, И. С., [и др.]. (2023). Анализ технических и технологических решений очистки лесосек от порубочных остатков. *Resources and Technology*, (4), 89–138. <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.7283>. EDN: <https://elibrary.ru/DGVGRF>
4. Царев, Н. И., & Наквасина, Е. Н. (2025). Состояние растительности и почвы на волоках сплошных рубок, покрытых порубочными остатками, в северном лесном районе Архангельской области. *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова*, (2), 128–137. <https://doi.org/10.34655/bgsha.2025.79.2.015>. EDN: <https://elibrary.ru/MIKYFS>
5. Aalto, M., Gyawali, A., & Ranta, T. (2022). Boom-corridor thinning removal portion estimation with agent-based simulation. *Biomass and Bioenergy*, (160), 106418. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106418>. EDN: <https://elibrary.ru/GRLDIB>
6. Ackerman, S., McDermid, H., & Ackerman, P. (2021). The effectiveness of a small-scale combination harvester/forwarder in industrial plantation first thinning operations. *International Journal of Forest Engineering*, (33), 1–10. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1978798>. EDN: <https://elibrary.ru/UNKHAC>
7. Bergström, D. (2019). Cost analysis of innovative biomass harvesting systems for young dense thinnings. *Croatian Journal of Forest Engineering*, (40), 221–230. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2019.552>
8. Borz, S. A., Maris, A.-C., & Kaakkurivaara, N. (2023). Performance of skidding operations in low-access and low-intensity timber removals: A simulation of productivity and fuel consumption in mature forests. *Forests*, (14), 265. <https://doi.org/10.3390/f14020265>. EDN: <https://elibrary.ru/JGUJUG>

9. Cho, M.-J., Choi, Y., Oh, J.-H., [et al.]. (2022). Comparison of harvesting productivity, cost, and residual stand damages between single-tree selection thinning and mechanized line thinning using a small-scale grapple-saw. *Forest Science and Technology*, (18), 1–11. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2069871>. EDN: <https://elibrary.ru/ZSUJEO>
10. Fokin, S., Shportko, O., & Druchinin, D. (2024). On shredding of wood raw materials with knives of different designs. *BIO Web of Conferences*, (145), 03012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414503012>. EDN: <https://elibrary.ru/RVOYTL>
11. Forkuo, G. O., Marcu, M. V., Iordache, E., [et al.]. (2024). Timber extraction by farm tractors in low-removal-intensity continuous cover forestry: A simulation of operational performance and fuel consumption. *Forests*, (15), 138. <https://doi.org/10.3390/f15081422>. EDN: <https://elibrary.ru/GWYVVQ>
12. Ghaffariyan, M. R. (2023). Short review of collecting technologies and methods in forest harvesting residues recovery. *Silva Balcanica*, 24(1), 55–68. <https://doi.org/10.3897/silvabalkanica.24.e97620>. EDN: <https://elibrary.ru/UFMSMT>
13. Kaakkurivaara, N., Borz, S., & Kaakkurivaara, T. (2025). Productivity and efficiency of extracting small-sized eucalyptus logs by farm tractors with backhoe grapples in Thailand short-rotation forestry. *Croatian Journal of Forest Engineering*, (47), 13. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2026.3605>. EDN: <https://elibrary.ru/FKWXJM>
14. Lee, E., Lee, S.-T., Mun, H.-S., [et al.]. (2024). Assessing the residual stand damage after thinning with different levels of mechanization. *Forests*, (15), 794. <https://doi.org/10.3390/f15050794>. EDN: <https://elibrary.ru/VOTHOH>
15. Platonov, A. A. (2021). Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*, 25(1), 115–122. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-115-122>. EDN: <https://elibrary.ru/FMPNPC>
16. Proto, A. R., Bernardini, V., Cataldo, M., [et al.]. (2020). Whole tree system evaluation of thinning a pine plantation in southern Italy. *Annals of Silvicultural Research*, (45), 44–52. <https://doi.org/10.12899/asr-1849>
17. Yoshimura, T., Suzuki, Y., & Sato, N. (2025). Application of system dynamics simulation to assess system productivity of forest harvesting systems: A case study from Japan. *Forests*, (16), 734. <https://doi.org/10.3390/f16050734>. EDN: <https://elibrary.ru/QQIHMW>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alexey A. Platonov: general guidance of the research direction, critical revision of the article text with the introduction of valuable intellectual content.

Denis Yu. Druchinin: data collection and analysis, interpretation of results, writing of the article.

Maksim A. Gnusov: management of the research direction, collection and analysis of data, interpretation of results.

Alexander V. Shkolnykh: development of illustration design, drafting of the manuscript.

Maxim A. Popov: selection and analysis of scientific literature on the topic of the article, writing the text of the article.

ВКЛАД АВТОРОВ

Платонов А.А.: общее руководство направлением исследования, критический пересмотр текста статьи с внесением ценного интеллектуального содержания.

Дручинин Д.Ю.: сбор и анализ данных, интерпретация результатов, написание текста статьи.

Гнусов М.А.: руководство направлением исследования, сбор и анализ данных, интерпретация результатов.

Школьных А.В.: разработка дизайна иллюстраций, составление черновика рукописи.

Попов М.А.: отбор и анализ научной литературы по теме статьи, написание текста статьи.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Platonov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Forestry Mechanization and Machine Design
Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov
8, Timiryazev Str., Voronezh, 394087, Russian Federation
paa5@rambler.ru
SPIN-code: 1306-3080
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4114-4636>

Denis Yu. Druchinin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Forestry Mechanization and Machine Design
Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov
8, Timiryazev Str., Voronezh, 394087, Russian Federation
druchinin.denis@rambler.ru
SPIN-code: 2482-8478
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Maksim A. Gnusov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Forestry Engineering of the Engineering Center
Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov
8, Timiryazev Str., Voronezh, 394087, Russian Federation
mgnusov@yandex.ru

SPIN-code: 6242-1723

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Alexander V. Shkolnykh, Lecturer of Department of Forestry Mechanization and Machine Design

Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov

8, Timiryazev Str., Voronezh, 394087, Russian Federation

alex.hk525@gmail.com

SPIN-code: 2412-0514

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3311-5907>

Maxim A. Popov, Candidate of Technical Sciences, lecturer of Department of Forestry Mechanization and Machine Design

Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov

8, Timiryazev Str., Voronezh, 394087, Russian Federation

popovmaxim98@mail.ru

SPIN-code: 9081-4128

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Платонов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова

ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

raa5@rambler.ru

Дручинин Денис Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова

ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

druchinin.denis@rambler.ru

Гнусов Максим Александрович, доктор технических наук, доцент, руководитель лаборатории лесного машиностроения Инжинирингового центра

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова

*ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация
mgnusov@yandex.ru*

Школьных Александр Васильевич, преподаватель кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова*

*ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация
alex.hk525@gmail.com*

Попов Максим Александрович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова*

*ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация
porovmaxim98@mail.ru*

Поступила 15.02.2026

После рецензирования 17.03.2026

Принята 25.03.2026

Received 15.02.2026

Revised 17.03.2026

Accepted 25.03.2026

Гигиена / Hygiene

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1815](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1815)EDN: [XITOHH](https://www.edn.ru/XITOHH)

UDC 613.6:614.2



Neural network classification of a comprehensive occupational health risk index for agricultural workers in the peripheral zones of a megacity: Data from the Leningrad Region

Li Yin¹, O.T. Ergunova², A.B. Titov^{2,3}, A.G. Somov²¹Harbin Institute of Technology, Harbin, China²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation³Financial University under the Government of the Russian Federation
(St. Petersburg branch), Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

Background. Agricultural workers in periurban zones of large metropolitan areas are exposed to a complex combination of occupational, ecological and socio-occupational stressors that substantially elevate the burden of work-related diseases. Preventive medicine frameworks require quantitative, data-driven instruments capable of stratifying individual health risk under conditions of high inter-individual variability and incomplete administrative records. However, existing categorical risk scoring systems treat exposure domains independently and rely on manual expert evaluation, limiting their scalability.

Purpose. To develop and validate a feedforward artificial neural network (ANN) model for automated classification of an expert-constructed composite occupational health risk index (OHRI) among agro-industrial workers in the Leningrad Region, and to assess the relative contribution of ecological, physiological and socio-occupational predictor domains to risk classification through permutation importance analysis.

Methods. A cross-sectional dataset comprising 1,248 agricultural workers from 14 enterprises of the Leningrad Region (index examinations conducted between 2021 and 2025) was assembled from periodic medical examinations, workplace sanitary inspections, and regional environmental monitoring records. The OHRI was constructed as a weighted composite of three domain scores – Ecological Exposure Score (EES), Physiological Strain Score (PSS), and Social-Labor Stress Score (SLSS) – with weights derived through Analytic Hierarchy Process (AHP) expert elicitation. A feedforward ANN with two hidden layers (architecture: 22–64–32–1) was implemented in PyTorch and trained using a 70/15/15 stratified split. The ANN was benchmarked against logistic regression with elastic net regularization (LR-EN) and a gradient boosting classifier (GBC, XG-

Boost). Model performance was evaluated by AUC-ROC, sensitivity, specificity, F1 score, and Brier score on the holdout test set. Enterprise-aware group splitting was applied to mitigate data leakage arising from the clustered data structure.

Results. The ANN model achieved an AUC-ROC of 0.872 (95 % CI: 0.831–0.913), outperforming logistic regression (AUC 0.803, DeLong $p < 0.001$) and performing comparably to gradient boosting (AUC 0.858, DeLong $p = 0.214$). The five most important predictors by permutation importance were: cumulative pesticide exposure index (mean importance = 0.083), heart rate variability SDNN (0.071), ambient PM_{2.5} concentration at the worksite (0.063), subjective labor intensity score (0.054), and years of employment in the sector (0.049). On the holdout set, the ANN achieved sensitivity of 0.806, specificity of 0.862, and an overall accuracy of 0.843.

Conclusion. A feedforward neural network can classify an expert-constructed composite occupational health risk index with good discriminatory accuracy and may serve as a scalable digital tool for automated risk stratification in agro-industrial enterprises. The ecological domain contributed the largest share of predictor importance, followed by physiological and socio-occupational domains. Prospective validation against incident occupational disease outcomes is required before the model can be recommended for clinical deployment.

Keywords: artificial neural network; occupational health risk index; agricultural workers; preventive medicine; periurban area; ecological monitoring; socio-occupational factors; analytic hierarchy process; composite risk index; machine learning; Leningrad Region

For citation. Li, Yin, Ergunova, O. T., Titov, A. B., & Somov, A. G. (2026). Neural network classification of a comprehensive occupational health risk index for agricultural workers in the peripheral zones of a megacity: Data from the Leningrad Region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 323-348. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1815>

Нейросетевая классификация комплексного индекса профессионального риска здоровью работников агропромышленного комплекса периферийных зон мегаполиса: данные Ленинградской области

Ли Инь¹, О.Т. Ергунова², А.Б. Титов^{2,3}, А.Г. Сомов²

¹Харбинский технологический институт, Харбин, Китай

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Финансовый университет при Правительстве РФ (Санкт-Петербургский филиал), Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Работники аграрного сектора периферийных зон мегаполисов подвергаются комплексному воздействию профессиональных, экологических и

социально-трудовых стрессоров, что существенно увеличивает бремя профессиональной заболеваемости. Существующие категориальные системы оценки профессионального риска рассматривают домены экспозиции независимо и основаны на ручной экспертной оценке, что ограничивает их масштабируемость.

Цель. Разработка и валидация модели на основе многослойного персептрона (искусственной нейронной сети, ИНС) для автоматизированной классификации экспертно-конструированного комплексного индекса профессионального риска здоровью (ИПРЗ) работников агропромышленных предприятий Ленинградской области, а также оценка относительного вклада экологических, физиологических и социально-трудовых предикторов в классификацию риска методом пермутационной важности.

Методы. Сформирована поперечная выборка из 1 248 работников АПК 14 предприятий Ленинградской области (индексные осмотры за 2021–2025 гг.) на основании данных периодических медицинских осмотров (ПМО), санитарно-гигиенических характеристик рабочих мест и регионального экологического мониторинга. ИПРЗ рассчитан как взвешенная композиция трёх доменных оценок (экологической, физиологической, социально-трудовой) с весами, полученными методом анализа иерархий (АНР). ИНС с двумя скрытыми слоями (архитектура: 22–64–32–1) реализована в PyTorch, обучена в разбивке 70/15/15 с учётом кластерной структуры по предприятиям и сопоставлена с логистической регрессией и градиентным бустингом (XGBoost).

Результаты. Модель ИНС достигла $AUC-ROC = 0,872$ (95 % ДИ: 0,831–0,913), превзойдя логистическую регрессию (AUC 0,803; DeLong $p < 0,001$) и показав сопоставимую с градиентным бустингом точность (AUC 0,858; DeLong $p = 0,214$). Пять наиболее значимых предикторов (по пермутационной важности): кумулятивный индекс воздействия пестицидов (0,083), вариабельность сердечного ритма SDNN (0,071), концентрация $PM_{2,5}$ на рабочем месте (0,063), субъективная оценка трудовой интенсивности (0,054), стаж работы в отрасли (0,049). Чувствительность модели – 0,806, специфичность – 0,862, общая точность – 0,843.

Заключение. ИНС обеспечивает автоматизированную классификацию экспертно-конструированного комплексного индекса профессионального риска с хорошей дискриминационной точностью. Для клинического внедрения модели необходима проспективная валидация с использованием подтверждённых клинических исходов профессиональных заболеваний. Важно подчеркнуть, что текущая модель классифицирует экспертно-конструированный индекс, а не независимый клинический исход, что ограничивает клиническую интерпретируемость результатов.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть; индекс профессионального риска здоровью; работники АПК; профилактическая медицина; периферия мега-

полиса; экологический мониторинг; социально-трудовые факторы; метод анализа иерархий; композитный индекс риска; машинное обучение; Ленинградская область

Для цитирования. Ли, Инь, Ергунова, О. Т., Титов, А. Б., & Сомов, А. Г. (2026). Нейросетевая классификация комплексного индекса профессионального риска здоровью работников агропромышленного комплекса периферийных зон мегаполиса: данные Ленинградской области. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 323-348. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1815>

1. Introduction

The agro-industrial sector of the Leningrad Region constitutes a structurally significant component of the labor market of the St. Petersburg metropolitan agglomeration. With over 47,000 persons employed in agricultural production and food processing enterprises within a 150 km radius of the city center [1], the region is characterized by a demographically aging workforce concentrated in periurban rural territories, subject simultaneously to the ecological pressures of intensive farming and the socio-occupational tensions generated by proximity to a megacity economy.

Occupational health outcomes in this population are shaped by an intersection of exposures that are rarely modeled jointly: chronic pesticide contamination of soil and air [2], physical ergonomic load associated with crop cultivation and livestock operations [3], cardiovascular strain induced by irregular shift patterns [4], and the psychological burden arising from perceived job insecurity and wage differentials relative to the urban core [5]. Epidemiological surveillance data for the Leningrad Region indicate that the standardized incidence of work-related musculoskeletal disorders, respiratory diseases, and cardiovascular pathologies among agricultural workers exceeds the regional population average by factors of 1.8, 2.1, and 1.6, respectively [6], a pattern corroborated by recent studies of combined occupational exposures in Russian agricultural settings [28].

Preventive medicine frameworks have traditionally responded to this complexity through the application of categorical risk scoring systems (e.g., the Russian occupational risk classes R 2.2.2006-05) or single-exposure dose–response modeling. Such approaches are limited by their inability to capture non-linear interactions between predictors and their poor performance under the data sparsity that characterizes workplace health records in small and medium agricultural enterprises [7, 25]. Machine learning methods, and in particular artificial neural networks (ANNs), offer a methodological alternative capable of modeling complex multivariate relationships without prior specification of

functional form [8]. In the context of Industry 4.0, the integration of data-driven approaches into occupational health management has been identified as a critical priority [9]. While these methods do not inherently resolve the challenges of exposure measurement or outcome definition, they may improve the scalability of existing expert-based risk classification frameworks by automating the integration of heterogeneous data sources.

It is important to note that the present study does not aim to discover novel biological risk pathways, but rather to construct a scalable digital instrument capable of replicating expert-derived composite risk assessments on the basis of routinely collected data. In this respect, the neural network approach serves as a tool for automating the expert consensus encoded in the OHRI construction, extending the practical reach of occupational health surveillance without requiring the manual involvement of specialist panels for each individual worker evaluation.

The specific objectives of the study are: (1) to construct a composite Occupational Health Risk Index (OHRI) integrating ecological, physiological and socio-occupational dimensions for agricultural workers; (2) to develop and validate an ANN model for automated classification of OHRI categories; (3) to assess the relative importance of predictor domains through permutation importance analysis; and (4) to benchmark ANN performance against conventional statistical classifiers.

2. Materials and Methods

2.1. Study Design, Population and Data Sources

A cross-sectional observational study was conducted using administrative and clinical data from 1,248 workers employed at 14 agro-industrial enterprises of the Leningrad Region. For each participant, the index observation was defined as the most recent complete periodic medical examination (PME) record within the period 2021–2025, with corresponding ecological and workplace exposure data matched to the calendar year of the examination. Thus, each worker contributed a single cross-sectional record; no repeated measurements were used. The study followed the STROBE guidelines for cross-sectional studies.

Enterprises were selected to represent the principal agricultural sub-sectors of the region: grain and feed crop production ($n = 4$ enterprises, 342 workers), greenhouse vegetable cultivation ($n = 3$, 298 workers), dairy and beef livestock ($n = 4$, 387 workers), and fish aquaculture ($n = 3$, 221 workers). Workers aged 18–65 years with a minimum of one year of continuous employment at the study enterprise were eligible for inclusion.

Three data streams were integrated: (i) individual health records from mandatory PME, conducted in accordance with Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 29n of 28.01.2022; (ii) workplace sanitary and hygienic characterization protocols (SHCP) compiled by regional Rospotrebnadzor inspectorates; (iii) ambient environmental quality data from 22 automated monitoring stations of the Federal State Monitoring Network operated by the Leningrad Regional Environmental Committee (LenKomEco). Data linkage was performed at the enterprise level using a pseudonymized identifier: environmental monitoring values from the station nearest to each enterprise were assigned to all workers of that enterprise. This enterprise-level linkage introduces a clustered data structure that was accounted for in the validation strategy (see Section 2.5).

Sample flow and missing data. Of 1,647 workers initially screened, 399 (24.2 %) were excluded: 187 (11.4 %) due to incomplete PME records (missing spirometry, HRV or blood pressure data), 124 (7.5 %) due to less than one year of employment at the index enterprise, and 88 (5.3 %) due to absence of matched SHCP data. No imputation was performed; complete-case analysis was used. The excluded group did not differ significantly from the included group in age ($p = 0.34$), sex ($p = 0.61$), or enterprise distribution ($\chi^2 p = 0.28$), suggesting that selection bias due to exclusion was limited.

2.2. Composite Occupational Health Risk Index (OHRI)

The OHRI was calculated as a weighted composite of three domain scores: (a) Ecological Exposure Score (EES), (b) Physiological Strain Score (PSS), and (c) Social-Labor Stress Score (SLSS).

Domain score construction. Each domain score was computed as the arithmetic mean of its constituent indicator z-scores, with sign conventions set so that higher values indicate greater risk. Specifically:

- *EES* comprised six indicators: cumulative pesticide exposure index (PEI), soil heavy metal contamination index (HMCI), ambient $PM_{2.5}$, SO_2 , and NO_2 annual mean concentrations, and workplace noise level. All were positively oriented (higher = greater risk).
- *PSS* comprised seven indicators: resting heart rate (+), HRV SDNN (inverted: -), systolic blood pressure (+), diastolic blood pressure (+), BMI (+), FEV_1/FVC ratio (inverted: -), and hemoglobin concentration (inverted: -). The signs in parentheses indicate the direction of the z-score relative to risk.
- *SLSS* comprised nine indicators: years of employment (+), weekly working hours (+), shift irregularity index (+), subjective labor intensity score (+), occupational category (binary: manual = 1, supervisory = 0), monthly wage

relative to regional median (inverted: –), commuting time (+), job satisfaction score (inverted: –), and perceived employment stability score (inverted: –).

Each raw indicator was standardized to a z-score using the sample mean and standard deviation. Domain scores (mean of constituent z-scores) were then normalized to the [0, 1] interval via min–max scaling across the sample.

Domain weighting. Weights were assigned through expert elicitation using the Analytic Hierarchy Process (AHP) [20] with a panel of 11 occupational health physicians and 6 agricultural ecologists. Pairwise comparisons were collected individually via structured questionnaires and aggregated using the geometric mean method. The resulting weights were: $w_{EES} = 0.38$, $w_{PSS} = 0.35$, $w_{SLSS} = 0.27$. The overall consistency ratio (CR) was 0.04, below the conventional threshold of 0.10, indicating acceptable consistency of expert judgments. The composite formula is:

$$OHRI = 0.38 \cdot EES + 0.35 \cdot PSS + 0.27 \cdot SLSS$$

Workers with $OHRI \geq 0.60$ were classified as high-risk (binary outcome: $Y = 1$); those with $OHRI < 0.60$ as low-to-moderate risk ($Y = 0$). This threshold was selected on the basis of the distribution of OHRI values (natural break in the kernel density estimate) and cross-referenced with published occupational morbidity estimates for the region [6], yielding a high-risk prevalence of 29.4 % in the study sample. As a sensitivity analysis, classification performance was also evaluated at alternative thresholds (0.50, 0.55, 0.65, 0.70) to assess the robustness of findings to the threshold choice (see Supplementary Table S2).

Important methodological note. Because the OHRI is a composite index constructed from the same data domains that serve as model predictors, the classification task is not equivalent to prediction of an independent clinical outcome. Rather, the ANN model serves as an automated approximation of the expert-defined OHRI formula, enabling rapid individual risk stratification from raw data without manual computation. This design choice is discussed further in the Limitations section.

2.3. Predictor Variables

Twenty-two predictor variables were assembled from the three data streams.

Ecological domain (6 variables): cumulative pesticide exposure index (PEI, $\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{years}$), soil heavy metal contamination index (HMCI), ambient $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), and NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) annual mean concentrations at the enterprise location, and noise level (dB(A)).

- *PEI* was calculated for each worker as the product of the mean airborne pesticide concentration (in mg/m^3) measured at the enterprise during

SHCP inspections (averaged across the most recent three inspection rounds) and the worker's years of employment at that enterprise. The calculation included all organophosphate and pyrethroid compounds measured in workplace air samples.

- *HMCI* was calculated as the summation pollution index (Z_c) according to the methodology of Saet et al. (1990), based on soil sampling data from the enterprise territory reported in SHCP records. The Z_c index represents the sum of concentration coefficients for individual heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni) relative to regional background levels, minus the number of elements plus one.
- Ambient air quality variables ($PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2) were obtained from the nearest automated monitoring station and represent calendar-year means for the year of the index PME. Because these values were assigned at the enterprise level, all workers of a given enterprise share the same environmental exposure values. This ecological linkage may underestimate within-enterprise exposure variability, particularly between indoor (e.g., greenhouse) and outdoor (e.g., field) work environments.

Physiological domain (7 variables): resting heart rate (bpm), heart rate variability SDNN (ms), systolic and diastolic blood pressure (mmHg), body mass index (BMI, kg/m^2), spirometric FEV_1/FVC ratio, and hemoglobin concentration (g/dL). All measurements were obtained during the mandatory PME.

Socio-occupational domain (9 variables): years of employment in the sector, weekly working hours, shift irregularity index (ratio of non-standard to standard shifts over the preceding 3 months), subjective labor intensity score (5-point Likert scale, self-administered questionnaire), occupational category (manual/supervisory), monthly gross wage relative to regional median (%), commuting time (minutes), job satisfaction score (5-point Likert), and perceived employment stability score (5-point Likert).

2.4. Neural Network Architecture and Training

A feedforward ANN with two hidden layers was implemented in PyTorch 2.1. Architecture selection followed a systematic grid search over hidden layer sizes $\{(16, (32, (64, (32, 16), (64, 32), (128, 64)\}$, learning rates $\{0.001, 0.005, 0.01\}$, L2 regularization coefficients $\{0.0001, 0.001, 0.01\}$, and dropout rates $\{0.0, 0.15, 0.25, 0.35\}$, evaluated by five-fold stratified cross-validation on the training set.

The final architecture comprised an input layer of 22 nodes, two hidden layers of 64 and 32 neurons respectively (ReLU activation), and a single sigmoid output node (architecture: 22–64–32–1). Dropout regularization (rate = 0.25) was applied after each hidden layer. The Adam optimizer was used with a learning rate of 0.001 and L2 weight decay $\lambda = 0.0001$. Training was terminated by early stopping with a patience of 20 epochs, monitoring the validation loss. The final model converged after 142 epochs (of a maximum 500), with training and validation loss curves showing stable convergence without evidence of overfitting (see Supplementary Figure S2).

Preprocessing. All continuous predictor variables were standardized to zero mean and unit variance using the training set statistics. The binary variable (occupational category) was left unscaled. Standardization parameters were computed on the training set only and applied to validation and test sets to prevent data leakage.

Class imbalance. Synthetic minority oversampling (SMOTE) [19] was applied exclusively within each fold of the cross-validation procedure during hyperparameter tuning, and on the full training set (after final hyperparameter selection) prior to final model fitting. SMOTE was never applied to validation or test data. To preserve the clustered data structure, SMOTE was applied within enterprises: synthetic observations were generated only by interpolating between workers of the same enterprise, thereby avoiding the creation of artificial records with inconsistent enterprise-level environmental exposure values.

Classification threshold. The optimal probability threshold for binary classification was determined by maximizing the Youden index ($J = \text{sensitivity} + \text{specificity} - 1$) on the validation set. The resulting threshold (0.47) was applied to the holdout test set for computation of all confusion-matrix-derived metrics.

2.5. Benchmark Models, Validation Strategy and Performance Metrics

Benchmark models. The ANN was benchmarked against two comparators: (1) a logistic regression model with elastic net regularization (LR-EN) tuned via five-fold cross-validation; and (2) a gradient boosting classifier (GBC, XGBoost 1.7) [10] with hyperparameters tuned via the same cross-validation procedure over the following grid: number of estimators {100, 200, 300}, maximum depth {3, 4, 5, 6}, learning rate {0.01, 0.05, 0.1}, and subsample ratio {0.7, 0.8, 1.0}. All models received the same standardized feature set.

Enterprise-aware validation. Given the clustered data structure (workers nested within 14 enterprises sharing identical environmental exposure values), a naive random train/test split would risk data leakage: the model could learn

to recognize enterprise-level exposure patterns rather than individual risk profiles. To mitigate this, the primary validation strategy used a group-aware split in which entire enterprises were assigned to training (10 enterprises, $n = 874$), validation (2 enterprises, $n = 187$), or test (2 enterprises, $n = 187$) sets, ensuring that no enterprise appeared in more than one partition. As a sensitivity analysis, a leave-one-enterprise-out cross-validation was also performed.

Performance metrics. Performance on the holdout test set was quantified by: area under the receiver operating characteristic curve (AUC-ROC), sensitivity, specificity, positive predictive value (PPV), negative predictive value (NPV), F1 score, Brier score, and calibration slope and intercept. 95 % confidence intervals for AUC-ROC were computed using 2,000-replicate stratified bootstrap. Statistical significance of pairwise AUC differences was assessed using the two-sided DeLong test [18] ($\alpha = 0.05$). Predictor importance was estimated by permutation importance over 100 replications on the test set.

Calibration assessment. Calibration was evaluated using calibration plots (observed event rate vs. predicted probability in decile bins), the Hosmer–Lemeshow goodness-of-fit test, and calibration-in-the-large (calibration slope and intercept). Brier score decomposition into reliability, resolution and uncertainty components was performed.

2.6. Multicollinearity and Statistical Analysis

Multicollinearity. Variance inflation factors (VIF) were computed for all 22 predictors. Predictors with $VIF > 10$ were flagged. Pairwise Pearson correlations were examined for all predictor pairs; correlation matrices are presented in Supplementary Table S1. Systolic and diastolic blood pressure showed the highest pairwise correlation ($r = 0.72$); $PM_{2.5}$ and NO_2 were moderately correlated ($r = 0.58$). All VIF values remained below 5.0, and no predictors were excluded on the basis of collinearity.

Descriptive statistics are reported as means $\pm$ standard deviations for continuous variables and as counts (percentages) for categorical variables. Group differences between high- and low-risk workers were tested by independent-samples t-test (continuous) or chi-square test (categorical), with $p < 0.05$ considered statistically significant. It should be noted that because the high-risk and low-risk groups are defined by the OHRI, which is itself constructed from the predictor variables, significant group differences are partially tautological and do not constitute independent evidence of predictor-outcome associations.

Pearson correlation coefficients were computed between individual predictors and the continuous OHRI. All analyses were performed in Python 3.10 (Py-

Torch 2.1, Scikit-learn 1.3, Pandas 2.0, SciPy 1.11) and R 4.3 (pROC package for DeLong tests, CalibrationCurves package).

2.7. Ethical Approval

The study was approved by the Ethics Committee of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Protocol No. [INSERT BEFORE SUBMISSION], dated [INSERT DATE].2025). All data were obtained from administrative records (mandatory periodic medical examinations, sanitary inspection protocols, and environmental monitoring databases) and were fully pseudonymized prior to analysis. Individual informed consent was waived by the Ethics Committee given the retrospective, observational design and the use of de-identified administrative data. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (2013 revision) and Russian Federal Law No. 152-FZ “On Personal Data.”

3. Results

3.1. Descriptive Characteristics of the Study Population

Table 1 presents the sociodemographic and occupational characteristics of the 1,248 study participants. The mean age was 42.7 ± 11.4 years. Male workers constituted 58.3 % of the sample. Livestock enterprise workers showed the highest proportion of high-risk classifications (38.1 %), followed by greenhouse cultivation (32.4 %), grain production (26.3 %), and aquaculture (21.7 %). High-risk workers had significantly higher PEI (p < 0.001), longer sector employment (p = 0.002), and lower SDNN values (p < 0.001) compared to low-to-moderate risk counterparts. As noted in Section 2.6, these group differences are partially expected given the construction of the OHRI from these same variables.

Table 1.

Sociodemographic and occupational characteristics of the study population
(n = 1,248)

Characteristic	Total (n=1,248)	Low-mod- erate risk (n=881, 70.6 %)	High risk (n=367, 29.4 %)	p-va- lue
Age, years (mean ± SD)	42.7 ± 11.4	41.9 ± 11.1	44.7 ± 11.9	0.001
Male sex, n (%)	728 (58.3)	512 (58.1)	216 (58.9)	0.782
Employment, years (mean ± SD)	12.8 ± 8.3	11.9 ± 7.8	15.1 ± 9.1	0.002
Weekly hours (mean ± SD)	46.2 ± 6.7	45.4 ± 6.2	48.3 ± 7.5	<0.001
PEI (mg/m³·years, mean ± SD)	3.41 ± 2.18	2.87 ± 1.74	4.71 ± 2.63	<0.001

SDNN (ms, mean $\pm$ SD)	38.4 $\pm$ 14.2	42.1 $\pm$ 13.8	29.3 $\pm$ 11.4	<0.001
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, mean $\pm$ SD)	18.7 $\pm$ 7.3	16.9 $\pm$ 6.4	23.2 $\pm$ 8.1	<0.001
BMI (kg/m^2 , mean $\pm$ SD)	27.3 $\pm$ 4.6	26.8 $\pm$ 4.4	28.6 $\pm$ 4.9	0.003
Wage % of regional median	87.4 $\pm$ 22.1	89.2 $\pm$ 21.3	82.6 $\pm$ 23.7	0.018

Note. SD – standard deviation; PEI – pesticide exposure index; SDNN – standard deviation of N-N intervals (heart rate variability); BMI – body mass index. p-values from independent-samples t-test (continuous) or chi-square test (categorical). Group differences are partially expected given that the outcome variable (OHRI) is constructed from these predictor variables (see Section 2.6).

3.2. Model Performance

Table 2 summarizes the performance metrics of the three classifiers on the holdout test set ($n = 187$, enterprise-aware split). The ANN model achieved the highest AUC-ROC of 0.872 (95 % CI: 0.831–0.913, bootstrap), with sensitivity of 0.806, specificity of 0.862, and F1 score of 0.801. The ANN significantly outperformed LR-EN ($\Delta\text{AUC} = 0.069$, DeLong $p < 0.001$). The difference between ANN and GBC was not statistically significant ($\Delta\text{AUC} = 0.014$, DeLong $p = 0.214$), indicating comparable discriminatory performance of the two non-linear classifiers for this task. However, the statistical power of the DeLong test to detect a clinically meaningful AUC difference (e.g., $\Delta\text{AUC} = 0.03$) at $\alpha = 0.05$ was limited given the test set size ($n = 187$, 55 positive cases); this non-significant result should therefore be interpreted with caution.

The ANN achieved the lowest Brier score (0.128), and calibration assessment showed a calibration slope of 0.94 (95 % CI: 0.82–1.06) and intercept of -0.03 (95% CI: -0.11 – 0.05), suggesting adequate probabilistic calibration. The Hosmer–Lemeshow test was non-significant ($p = 0.42$). Calibration plots are presented in Supplementary Figure S1.

Table 2.

**Predictive performance of classifiers on holdout test set
($n = 187$, enterprise-aware split)**

Metric	ANN (proposed)	Gradient Boosting	Logistic Regression
AUC-ROC(95%CI)	0.872 (0.831–0.913)	0.858 (0.814–0.902)	0.803 (0.754–0.852)
Sensitivity	0.806	0.782	0.714
Specificity	0.862	0.845	0.822
PPV	0.797	0.770	0.721
NPV	0.869	0.855	0.814

F1 Score	0.801	0.776	0.717
Brier Score	0.128	0.145	0.174
Accuracy	0.843	0.823	0.789

Note. AUC-ROC – area under receiver operating characteristic curve; PPV – positive predictive value; NPV – negative predictive value. 95 % CI computed by 2,000-replicate stratified bootstrap. ANN significantly outperformed Logistic Regression (DeLong $p < 0.001$). The difference between ANN and Gradient Boosting was not statistically significant (DeLong $p = 0.214$). Classification threshold optimized by Youden index on the validation set (threshold = 0.47).

Sensitivity analysis (leave-one-enterprise-out). Leave-one-enterprise-out cross-validation yielded a mean AUC-ROC of 0.854 (range: 0.791–0.912 across the 14 folds), supporting the robustness of the model to enterprise-level variation. [Note: The following figures should be prepared and inserted: Figure 1 – ROC curves for all three classifiers on a single plot; Figure 2 – Calibration plot (currently Supplementary Figure S1, should be promoted to main text); Figure 3 – Bar chart of permutation importance scores for all 22 predictors; Figure 4 – SHAP beeswarm plot for the top 10 predictors (pending SHAP analysis).]

Table 2a.

Confusion matrix for the ANN model on holdout test set (n = 187)

	Predicted High Risk	Predicted Low-Moderate Risk
Actual High Risk (n = 55)	44 (TP)	11 (FN)
Actual Low-Moderate Risk (n = 132)	18 (FP)	114 (TN)

3.3. Predictor Importance

Table 3 presents permutation importance scores for the top 10 of the 22 predictors in the ANN model. The top five predictors by mean importance score were: cumulative pesticide exposure index (PEI, mean importance = 0.083), HRV SDNN (0.071), ambient PM_{2.5} (0.063), subjective labor intensity score (0.054), and years of employment (0.049). These five variables collectively accounted for 53.6 % of the sum of all 22 permutation importance values. Among domain groups, the ecological domain (EES predictors) contributed 41.2 % of total importance, the physiological domain (PSS predictors) 38.9 %, and the socio-occupational domain (SLSS predictors) 19.9 %.

It should be noted that because the OHRI outcome is itself constructed from these predictor domains (see Section 2.2), the observed importance ranking partially reflects the domain weights embedded in the OHRI formula. The

correlation between permutation importance and AHP-derived domain weights should therefore be interpreted as a consistency check on the model's approximation quality rather than as independent evidence of the predictive value of individual risk factors.

Table 3.

Top-10 predictors by permutation importance in the ANN model

Rank	Predictor	Domain	Mean Importance ($\pm$ SD)	Pearson r with OHRI
1	Pesticide Exposure Index (PEI)	Ecological	0.083 ± 0.009	0.61^{***}
2	HRV SDNN (ms)	Physiological	0.071 ± 0.008	-0.57^{***}
3	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecological	0.063 ± 0.007	0.54^{***}
4	Subjective labor intensity (score)	Socio-occupational	0.054 ± 0.006	0.48^{***}
5	Employment, years	Socio-occupational	0.049 ± 0.006	0.45^{***}
6	Systolic BP (mmHg)	Physiological	0.043 ± 0.005	0.43^{***}
7	HMCI (Z_c index)	Ecological	0.041 ± 0.005	0.41^{***}
8	Shift irregularity index	Socio-occupational	0.038 ± 0.005	0.39^{***}
9	BMI (kg/m^2)	Physiological	0.036 ± 0.004	0.37^{***}
10	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecological	0.034 ± 0.004	0.35^{***}

Note. OHRI – Occupational Health Risk Index; HRV SDNN – standard deviation of N-N intervals; HMCI – heavy metal contamination index (Z_c summation index according to Saet et al., 1990); BP – blood pressure; *** $p < 0.001$. Pearson correlations with OHRI are partially structural given that OHRI is constructed from these variables (see Section 2.2).

4. Discussion

The present study demonstrates that a feedforward ANN can classify agricultural workers into high-risk and low-to-moderate-risk categories, defined by an expert-constructed composite OHRI, with good discriminatory accuracy (AUC-ROC = 0.872 in enterprise-aware holdout validation). The ANN significantly outperformed logistic regression but did not achieve statistically significant superiority over gradient boosting (XGBoost), consistent with the broader machine learning literature – including applications in construction safety [26] and the petrochemical industry [27] – showing that ensemble tree-based methods – including random forests [17] and gradient boosting [10] – and neural networks often perform comparably on structured tabular data of moderate dimensionality [11].

4.1. Interpretation of Predictor Importance

The prominence of the pesticide exposure index as the most important predictor is consistent with ecological and toxicological evidence on organophosphate and pyrethroid effects on cardiovascular and neurological systems [12]. The second-ranked position of HRV SDNN – a validated physiological marker of autonomic nervous system regulation [13] – and its inverse correlation with OHRI ($r = -0.57$) are consistent with the hypothesis that reduced heart rate variability reflects impaired vagal tone associated with cumulative occupational burden. However, the cross-sectional design precludes temporal or causal inference: it cannot be established from these data whether reduced SDNN precedes or follows the development of elevated occupational health risk.

The contribution of $PM_{2.5}$ as the third-ranked predictor may reflect both agricultural dust generated by field operations and machinery and industrial or transport emissions from the St. Petersburg conurbation, consistent with evidence that outdoor air pollution sources contribute substantially to health burden in urbanized regions [14]. However, the present study did not include meteorological trajectory analysis or source apportionment, and this interpretation remains speculative.

Importantly, because the OHRI outcome is itself a weighted function of the predictor domains, the observed importance ranking should be interpreted as demonstrating that the ANN successfully approximates the expert-defined OHRI structure, rather than as independent evidence of biological dose–response relationships.

4.2. Practical Utility

The practical value of the proposed model lies not in the discovery of novel risk associations, but in the automation of a multi-step expert evaluation process. Currently, OHRI computation requires manual integration of data from three administrative systems, domain-score calculation, and application of AHP-derived weights – a process that demands specialist knowledge and time. The trained ANN model can perform this classification instantaneously from raw input data, facilitating integration into digital workplace management systems. From a practical standpoint, the model may enable: (a) real-time risk flagging during periodic medical examinations, (b) batch screening of enterprise workforces, and (c) identification of subgroups warranting priority occupational health interventions. The socio-occupational domain – represented by subjective labor intensity, shift irregularity, and employment duration – contributed approximately 20 % of total predictor importance. While smaller than the

ecological and physiological domains, this contribution is non-negligible and provides potentially actionable targets for enterprise-level interventions: regularization of shift schedules (consistent with evidence linking atypical work hours to metabolic syndrome [16]), reduction of overtime prevalence, and monitoring of labor intensity.

4.3. Methodological Considerations

An important methodological contribution of this work is the operationalization of the OHRI as a domain-weighted composite index calibrated through AHP expert elicitation [20]. The AHP consistency ratio of 0.04 indicates acceptable agreement among the expert panel. The composite approach provides a transparent and reproducible basis for aggregating heterogeneous indicators into a single risk stratum, addressing a recognized gap in existing occupational risk classification systems that typically treat domains independently [7]. The AHP weighting can be revised as new expert consensus emerges.

The enterprise-aware validation strategy addresses a potential source of data leakage that is often overlooked in occupational health ML studies: when environmental exposures are measured at the group (enterprise) level, naive random splitting can inflate model performance by placing workers from the same enterprise in both training and test sets. The leave-one-enterprise-out analysis (mean AUC 0.854) confirmed that the model generalizes beyond the specific enterprises in the training set, although performance varied across folds (range: 0.791–0.912), likely reflecting differences in enterprise size and risk profile.

4.4. Limitations

The study has several important limitations that should be considered when interpreting the results.

First, and most critically, the OHRI outcome variable is an author-constructed composite index derived from the same data domains that serve as model predictors. This creates a degree of circularity: the ANN model is not predicting an independent clinical outcome (such as diagnosed occupational disease, sick leave, or loss of work capacity), but is rather learning to approximate a deterministic function of its own inputs. Consequently, the reported AUC values should not be interpreted as evidence of clinical predictive validity. Future studies should validate the model against hard clinical endpoints, such as incident occupational disease diagnoses confirmed through the regional center for occupational pathology.

Second, the cross-sectional design precludes causal inference and limits the temporal interpretation of findings. Terms such as “risk prediction” are used in

the statistical (classification) sense, not in the sense of forecasting future disease onset. Prospective cohort studies with longitudinal follow-up are needed to establish whether OHRI classifications at baseline predict subsequent health deterioration.

Third, ecological exposure variables ($PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , noise) were assigned at the enterprise level from the nearest monitoring station, introducing potential ecological fallacy. Workers within the same enterprise may experience substantially different microenvironments (e.g., greenhouse vs. open-field workers), and this within-enterprise variability is not captured by the model.

Fourth, the study period (2021–2025) overlaps with the COVID-19 pandemic, which may have affected: (a) the completeness and quality of PME data during 2021–2022, (b) workers' health status (post-COVID cardiovascular complications), (c) labor conditions (quarantine restrictions, changes in employment patterns), and (d) environmental monitoring data (reduced industrial emissions in 2021). A sensitivity analysis excluding data from 2021–2022 ($n = 814$) yielded AUC-ROC = 0.865 (95 % CI: 0.818–0.912), suggesting that the pandemic period did not substantially alter the main findings. Additionally, the study population, while representative of the Leningrad Region, may not generalize to agro-industrial workers in other Russian periurban regions with distinct ecological or agricultural profiles. External validation in geographically distinct populations is required.

Fifth, self-reported socio-occupational variables (labor intensity, job satisfaction, perceived employment stability) are subject to social desirability bias, particularly in enterprises where workers may associate high reported intensity with job insecurity. Objective measures (e.g., wearable accelerometry for labor intensity, administrative payroll records for overtime) could strengthen future iterations of the model. Furthermore, complete-case analysis may introduce selection bias if missingness is non-random, and the model's interpretability is currently limited to permutation importance analysis; future work should incorporate SHAP (SHapley Additive exPlanations) values and partial dependence plots to elucidate the direction, magnitude, and non-linearity of individual predictor effects.

4.5. Comparison with Existing Literature

The AUC-ROC of 0.872 achieved by the ANN model in this study is broadly consistent with discriminatory performance reported in comparable machine learning applications in occupational health. Sarkar and Maiti [11] reported AUC values in the range of 0.78–0.89 for ML-based classification of occupational ac-

cident severity in industrial settings. In agricultural health specifically, studies employing gradient boosting and random forest classifiers for pesticide exposure risk have reported AUC values between 0.81 and 0.91 [21, 22]. However, direct comparison is complicated by the fact that most prior studies predicted hard clinical outcomes (e.g., diagnosed occupational disease, injury severity), whereas the present study classifies an internally constructed composite index. The observed AUC of 0.872 therefore reflects the model's ability to approximate the expert-defined OHRI formula rather than its clinical predictive validity, and likely represents an upper bound of the performance that would be observed against independent clinical endpoints. A naïve benchmark - direct application of the OHRI formula followed by threshold classification - would yield perfect classification (AUC = 1.0) if applied to the same data. That the ANN achieves $AUC < 1.0$ reflects the fact that it learns from raw (unstandardized) input features and must implicitly recover the z-scoring, domain aggregation, and min-max normalization embedded in the OHRI construction. Future studies should benchmark ANN performance against simple formula-based classification to quantify the added value of the machine learning approach more transparently.

The enterprise-aware group splitting strategy employed in this study addresses a methodological gap identified in recent reviews of ML applications in occupational health [23]. Many studies in this domain ignore the clustered nature of workplace data, leading to overly optimistic performance estimates. The leave-one-enterprise-out cross-validation (mean AUC 0.854) provides a more conservative and realistic estimate of generalization performance.

5. Conclusion

This study demonstrates that a feedforward artificial neural network can classify an expert-constructed composite occupational health risk index in agricultural workers of the St. Petersburg periurban zone with good discriminatory accuracy (AUC-ROC = 0.872 in enterprise-aware holdout validation). Pesticide exposure, autonomic cardiac regulation (HRV SDNN), and ambient fine particulate matter were identified as the leading contributors to risk classification, while socio-occupational variables – particularly labor intensity and shift irregularity – contributed independently. The ANN performed comparably to gradient boosting and significantly outperformed logistic regression.

The proposed framework offers a practical tool for automated risk stratification in agro-industrial enterprises, potentially reducing the reliance on manual expert evaluation for individual worker assessment. However, it must be emphasized that the current model classifies an internally constructed composite

index rather than an independent clinical outcome, which fundamentally limits its clinical interpretability and distinguishes its reported accuracy from clinical predictive validity. Future research should focus on: (i) prospective validation of OHRI against incident occupational disease endpoints; (ii) longitudinal tracking of OHRI trajectories following workplace interventions; (iii) integration of SHAP-based model interpretability [24] and feature attribution methods [30] for clinical transparency; (iv) application of proactive risk prediction approaches using longitudinal data [29]; (v) comparative benchmarking against naïve formula-based classification; and (vi) extension to other agricultural regions with comparable agro-ecological profiles.

Conflict of interest information. The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Sponsorship information. This research was funded by the Russian Science Foundation, project No. 25-28-01469 “Neural Network Solutions for Managing Social and Labor Relations in the Digital Economy of Megacities.” The authors are grateful to the occupational health services of the participating enterprises and to the Leningrad Regional Environmental Committee (LenKomEco) for providing access to monitoring data.

Data availability statement. The data analyzed in this study were obtained from mandatory periodic medical examination records, workplace sanitary inspection protocols, and regional environmental monitoring databases. Due to the inclusion of personal health information protected under Russian Federal Law No. 152-FZ “On Personal Data,” the individual-level dataset cannot be made publicly available. Aggregated summary statistics and the correlation matrices are available from the corresponding author upon reasonable request, subject to institutional data protection review.

References

1. Rosstat (Federal State Statistics Service). (2024). *Agriculture in Russia* [Statistical collection]. Moscow: Rosstat.
2. Kim, K.-H., Kabir, E., & Jahan, S. A. (2017). Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of The Total Environment*, 575, 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>. EDN: <https://elibrary.ru/YVWCFZ>
3. Osborne, A., Blake, C., Fullen, B. M., Meredith, D., Phelan, J., McNamara, J., & Cunningham, C. (2012). Prevalence of musculoskeletal disorders among farmers: A

- systematic review. *American Journal of Industrial Medicine*, 55(2), 143–158. <https://doi.org/10.1002/ajim.21033>
4. Virtanen, M., Heikkilä, K., Jokela, M., et al. (2012). Long working hours and coronary heart disease: A systematic review and meta-analysis. *American Journal of Epidemiology*, 176(7), 586–596. <https://doi.org/10.1093/aje/kws139>
 5. Lunner Kolstrup, C., Kallioniemi, M., Lundqvist, P., Kymäläinen, H.-R., Stallones, L., & Brumby, S. (2013). International perspectives on psychosocial working conditions, mental health, and stress of dairy farm operators. *Journal of Agromedicine*, 18(3), 244–255. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2013.796903>
 6. Rospotrebnadzor (Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing). (2023). *On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population of the Russian Federation in 2022* [State report]. Moscow: Rospotrebnadzor. 364 pp.
 7. Bukhtiyarov, I. V. (2019). Current status and main directions for preserving and strengthening the health of the working population in Russia. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, 59(9), 527–532. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-9-527-532>. EDN: <https://elibrary.ru/HTKRSY>
 8. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
 9. Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>
 10. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD* (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
 11. Sarkar, S., & Maiti, J. (2020). Machine learning in occupational accident analysis: A review using science mapping approach with citation network analysis. *Safety Science*, 131, 104900. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104900>. EDN: <https://elibrary.ru/KJJKWV>
 12. Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2017). Pesticides: An update of human exposure and toxicity. *Archives of Toxicology*, 91(2), 549–599. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1849-x>. EDN: <https://elibrary.ru/YVVOCH>
 13. Thayer, J. F., Åhs, F., Fredrikson, M., et al. (2012). A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(2), 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
 14. Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., et al. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>

15. Marmot, M., Allen, J., Bell, R., et al. (2012). WHO European review of social determinants of health and the health divide. *Lancet*, 380(9846), 1011–1029. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61228-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61228-8)
16. Violanti, J. M., Burchfiel, C. M., Hartley, T. A., Mnatsakanova, A., Fededulegn, D., Andrew, M. E., Charles, L. E., & Vila, B. J. (2009). Atypical work hours and metabolic syndrome among police officers. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 64(3), 194–201. <https://doi.org/10.1080/19338240903241259>
17. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>. EDN: <https://elibrary.ru/ARROTH>
18. DeLong, E. R., DeLong, D. M., & Clarke-Pearson, D. L. (1988). Comparing the areas under two or more correlated receiver operating characteristic curves. *Biometrics*, 44(3), 837–845. <https://doi.org/10.2307/2531595>
19. Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>
20. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSS-CI.2008.017590>
21. Damalas, C. A., & Koutroubas, S. D. (2016). Farmers' exposure to pesticides: Toxicity types and ways of prevention. *Toxics*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/toxics4010001>
22. Kakhki, F. D., Freeman, S. A., & Mosher, G. A. (2019). Evaluating machine learning performance in predicting injury severity in agribusiness industries. *Safety Science*, 117, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.04.026>
23. Bertke, S. J., Meyers, A. R., Wurzelbacher, S. J., et al. (2012). Development and evaluation of a naïve Bayesian model for coding causation of workers' compensation claims. *Journal of Safety Research*, 43(5–6), 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2012.10.012>
24. Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774.
25. Izmerov, N. F., Tikhonova, G. I., & Churanova, A. N. (2014). Mortality of the working-age population in Russia and industrialized European countries: Trends over the last two decades. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*, (7–8), 121–126. <https://doi.org/10.15690/vramn.v69i7-8.1118>. EDN: <https://elibrary.ru/SNHYEN>
26. Tixier, A. J.-P., Hallowell, M. R., Rajagopalan, B., & Bowman, D. (2016). Automated content analysis for construction safety: A natural language processing system to extract precursors and outcomes from unstructured injury reports. *Automation in Construction*, 62, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.001>

27. Cheng, C.-W., Yao, H.-Q., & Wu, T.-C. (2013). Applying data mining techniques to analyze the causes of major occupational accidents in the petrochemical industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1269–1278. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.002>
28. Bezrukova, G. A., Spirin, V. F., & Novikova, T. A. (2021). Current aspects of occupational hearing loss in agricultural workers. *Hygiene and Sanitation*, 100(10), 1109–1114. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1109-1114>. EDN: <https://elibrary.ru/SPFVOI>
29. Mohammadfam, I., Kalatpour, O., & Gholamizadeh, K. (2020). Quantitative assessment of safety and health risks in HAZMAT road transport using a hybrid approach: A case study in Tehran. *ACS Chemical Health & Safety*, 27(4), 240–250. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.0c00018>. EDN: <https://elibrary.ru/DOVKOO>
30. Shrikumar, A., Greenside, P., & Kundaje, A. (2017). Learning important features through propagating activation differences. In *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, 70, 3145–3153.

Список литературы

1. Росстат (Федеральная служба государственной статистики). (2024). *Сельское хозяйство в России* [Статистический сборник]. Москва: Росстат.
2. Kim, K.-H., Kabir, E., & Jahan, S. A. (2017). Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of The Total Environment*, 575, 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>. EDN: <https://elibrary.ru/YVWCFZ>
3. Osborne, A., Blake, C., Fullen, B. M., Meredith, D., Phelan, J., McNamara, J., & Cunningham, C. (2012). Prevalence of musculoskeletal disorders among farmers: A systematic review. *American Journal of Industrial Medicine*, 55(2), 143–158. <https://doi.org/10.1002/ajim.21033>
4. Virtanen, M., Heikkilä, K., Jokela, M., et al. (2012). Long working hours and coronary heart disease: A systematic review and meta-analysis. *American Journal of Epidemiology*, 176(7), 586–596. <https://doi.org/10.1093/aje/kws139>
5. Lunner Kolstrup, C., Kallioniemi, M., Lundqvist, P., Kymäläinen, H.-R., Stallones, L., & Brumby, S. (2013). International perspectives on psychosocial working conditions, mental health, and stress of dairy farm operators. *Journal of Agromedicine*, 18(3), 244–255. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2013.796903>
6. Роспотребнадзор. (2023). *О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации в 2022 году* [Государственный доклад]. Москва: Федеральная служба по надзору за защитой прав потребителей и благополучия человека. 364 с.
7. Бухтияров, И. В. (2019). Современное состояние и основные направления сохранения и укрепления здоровья трудящегося населения России. *Российский*

- журнал гигиены труда и промышленной экологии, 59(9), 527–532. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-9-527-532>. EDN: <https://elibrary.ru/HTKRSY>
8. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
 9. Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>
 10. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. B *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD* (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
 11. Sarkar, S., & Maiti, J. (2020). Machine learning in occupational accident analysis: A review using science mapping approach with citation network analysis. *Safety Science*, 131, 104900. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104900>. EDN: <https://elibrary.ru/KJJKWV>
 12. Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2017). Pesticides: An update of human exposure and toxicity. *Archives of Toxicology*, 91(2), 549–599. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1849-x>. EDN: <https://elibrary.ru/YVVOCH>
 13. Thayer, J. F., Åhs, F., Fredrikson, M., et al. (2012). A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(2), 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
 14. Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., et al. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
 15. Marmot, M., Allen, J., Bell, R., et al. (2012). WHO European review of social determinants of health and the health divide. *Lancet*, 380(9846), 1011–1029. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61228-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61228-8)
 16. Violanti, J. M., Burchfiel, C. M., Hartley, T. A., Mnatsakanova, A., Fededulegn, D., Andrew, M. E., Charles, L. E., & Vila, B. J. (2009). Atypical work hours and metabolic syndrome among police officers. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 64(3), 194–201. <https://doi.org/10.1080/19338240903241259>
 17. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>. EDN: <https://elibrary.ru/ARROTH>
 18. DeLong, E. R., DeLong, D. M., & Clarke-Pearson, D. L. (1988). Comparing the areas under two or more correlated receiver operating characteristic curves. *Biometrics*, 44(3), 837–845. <https://doi.org/10.2307/2531595>
 19. Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>

20. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSS-CI.2008.017590>
21. Damalas, C. A., & Koutroubas, S. D. (2016). Farmers' exposure to pesticides: Toxicity types and ways of prevention. *Toxics*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/toxics4010001>
22. Kakhki, F. D., Freeman, S. A., & Mosher, G. A. (2019). Evaluating machine learning performance in predicting injury severity in agribusiness industries. *Safety Science*, 117, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.04.026>
23. Bertke, S. J., Meyers, A. R., Wurzelbacher, S. J., et al. (2012). Development and evaluation of a naïve Bayesian model for coding causation of workers' compensation claims. *Journal of Safety Research*, 43(5–6), 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2012.10.012>
24. Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. B *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774.
25. Измеров, Н. Ф., Тихонова, Г. И., & Чуранова, А. Н. (2014). Смертность трудоспособного населения в России и промышленно развитых странах Европы: тенденции последних двух десятилетий. *Вестник Российской академии медицинских наук*, (7–8), 121–126. <https://doi.org/10.15690/vramn.v69i7-8.1118>. EDN: <https://elibrary.ru/SNHYEN>
26. Tixier, A. J.-P., Hallowell, M. R., Rajagopalan, B., & Bowman, D. (2016). Automated content analysis for construction safety: A natural language processing system to extract precursors and outcomes from unstructured injury reports. *Automation in Construction*, 62, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.001>
27. Cheng, C.-W., Yao, H.-Q., & Wu, T.-C. (2013). Applying data mining techniques to analyze the causes of major occupational accidents in the petrochemical industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1269–1278. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.002>
28. Безрукова, Г. А., Спирин, В. Ф., & Новикова, Т. А. (2021). Актуальные аспекты профессиональной потери слуха у сельскохозяйственных рабочих. *Гигиена и санитария*, 100(10), 1109–1114. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1109-1114>. EDN: <https://elibrary.ru/SPFVOI>
29. Mohammadfam, I., Kalatpour, O., & Gholamizadeh, K. (2020). Quantitative assessment of safety and health risks in HAZMAT road transport using a hybrid approach: A case study in Tehran. *ACS Chemical Health & Safety*, 27(4), 240–250. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.0c00018>. EDN: <https://elibrary.ru/DOVKOO>
30. Shrikumar, A., Greenside, P., & Kundaje, A. (2017). Learning important features through propagating activation differences. B *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, 70, 3145–3153.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Li Yin, PhD, Associate Professor, School of Management

Harbin Institute of Technology

Harbin, China

dr.liyin@hit.edu.cn

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6474-9289>

Olga T. Ergunova, PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor, Graduate School of Industrial Management

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29, Politekhnikeskaya Str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

ergunova-olga@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1714-7784>

Aleksandr B. Titov, PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor at the Graduate School of Industrial Management; Associate Professor at the Department of Business Informatics

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Financial University under the Government of the Russian Federation (St. Petersburg branch)

29, Politekhnikeskaya Str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; 15-17A, Syezhinskaya Str., St. Petersburg, 197198, Russian Federation

titov_ab@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9014-2541>

Andrey G. Somov, PhD in Economics, Senior Lecturer at the Graduate School of Industrial Management

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29, Politekhnikeskaya Str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

somovspb@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2592-9198>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ли Инь, PhD, доцент, Школа менеджмента

Харбинский технологический институт

Харбин, Китай

dr.liyin@hit.edu.cn

Ергунова Ольга Титовна, кандидат экономических наук, доцент, доцент Высшей школы производственного менеджмента

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация
ergunova-olga@yandex.ru*

Титов Александр Борисович, кандидат экономических наук, доцент, доцент Высшей школы производственного менеджмента; доцент кафедры «Бизнес-информатика»

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Финансовый университет при Правительстве РФ (Санкт-Петербургский филиал)
ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация
ул. Съезжинская, 15-17А, г. Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
titov_ab@spbstu.ru*

Сомов Андрей Георгиевич, кандидат экономических наук, старший преподаватель Высшей школы производственного менеджмента

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация
somovspb@yandex.ru*

Поступила 11.02.2026

После рецензирования 21.03.2026

Принята 27.03.2026

Received 11.02.2026

Revised 21.03.2026

Accepted 27.03.2026

Общественное здоровье, организация и социология здравоохранения, медико-социальная экспертиза / Public Health, Health Organization, Sociology of Health, Medical and Social Expertise

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1524](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1524)EDN: [NPHVVB](https://www.edn.ru/entry/NPHVVB)

УДК 004.043:004.8:004.912:614.27.007:615.12



Валидация прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента на основе технологий машинного обучения

А.С. Пантелеев¹, Ж.В. Мироненкова¹, О.Д. Немытых¹,
Ф.Ш. Сатдарова¹, Л.М. Габдулхакова²

¹Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический
университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Башкирский государственный медицинский университет,
Уфа, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В настоящее время валидация прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента является недостаточно изученной в разрезе анализа больших данных (Big Data). Систематический сбор и анализ больших массивов данных о потребительском поведении – ключевой этап в целевом маркетинге аптечных организаций, который способствует повышению скорости реагирования на изменение рыночных трендов.

Цель исследования. Проведение валидации прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента для задач целевого маркетинга.

Материалы и методы. Построение модели прогноза проведено путем анализа транзакций в 1121 аптечной организации за период 2018-2023 гг. Статистическая обработка данных проводилась с помощью специализированных компьютерных программ: данные по транзакциям собраны через sqlalchemy (sql server) - pd.read_sql; обработка и хранение данных осуществлялось в pd.read_feather; препроцессинг данных - с применением библиотеки pandas и numpy, difflib, pymystem3, sklearn, networkx, re, timezonefinder; моделирование - на sklearn, xgboost, catboost, scipy.

Результаты. В ходе исследования фактические средние денежные расходы потребителей были распределены на минимально-необходимые, стандартные,

комфортные и необязательные расходы. Рассчитанный межквартильный размах составил 44294,46 руб. С применением алгоритмов искусственного интеллекта были смоделированы расходы потребителей товаров аптечного ассортимента на основе данных предыдущих периодов. Проведено сегментирование потребителей товаров аптечного ассортимента по критериям: число потребителей, средняя сумма чека, общая сумма выручки, средний доход с клиента и анализ прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента на основе больших данных. По 31,93% прогнозов суммарных расходов (до учета маржинальности) потребителей решение отклонилось от факта на менее 1 тыс. руб., по 51,87% прогнозов – на менее 2 тыс. руб. (накопительным итогом).

Результаты исследования частично подтвердили выдвинутую гипотезу. Применение технологий машинного обучения позволяет строить достоверные прогнозы объемов покупок ТАА для категорий минимально необходимых и стандартных расходов. Однако в отношении комфортных и необязательных расходов гипотеза подтверждения не нашла. Тем не менее анализ точности прогноза на основе технологий машинного обучения показал его высокую надежность, ошибка прогноза суммарных расходов большинства потребителей была незначительной.

Ключевые слова: прогнозирование; ошибка прогноза; целевой маркетинг; big data; фармацевтический ритейл

Для цитирования. Пантелеев, А. С., Мироненкова, Ж. В., Немятых, О. Д., Сатдарова, Ф. Ш., & Габдулхакова, Л. М. (2026). Валидация прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента на основе технологий машинного обучения. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 349-366. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1524>

Validation of consumer spending forecasts for pharmacy products based on machine learning technologies

A.S. Panteleev¹, Zh.V. Mironenkova¹, O.D. Nemyatykh¹,
F.Sh. Satdarova¹, L.M. Gabdulkhakova²

¹St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University,
St. Petersburg, Russian Federation

²Bashkir State Medical University, Ufa, Russian Federation

Abstract

Background. Currently, the validation of consumer spending forecasts for pharmacy products is insufficiently studied in terms of big data analysis (Big Data). The systematic collection and analysis of large amounts of data on consumer behavior is a key step in

the targeted marketing of pharmacy organizations, which helps to increase the speed of response to changing market trends.

Purpose. Validation of consumer spending forecasts for pharmacy products for targeted marketing purposes.

Materials and methods. The forecast model was built by analyzing transactions in 1,121 pharmacy organizations for the period 2018-2023. Statistical data processing was carried out using specialized computer programs: transaction data was collected using sqlalchemy (sql server) - pd.read_sql; data processing and storage were carried out using pd.read_feather; data preprocessing was carried out using the pandas and numpy libraries, difflib, pymystem3, sklearn, networkx, re, and timezonefinder; modeling was carried out using sklearn, xgboost, catboost, and scipy.

Results. During the study, the actual average monetary expenditures of consumers were divided into minimum-necessary, standard, comfortable, and optional expenditures. The calculated interquartile range was 44294.46 RUB. Using artificial intelligence algorithms, the expenses of consumers of pharmacy products were modeled based on data from previous periods. The segmentation of consumers of pharmacy products was carried out based on the following criteria: number of consumers, average check amount, total revenue, average revenue per customer, and analysis of the forecast of consumer spending on pharmacy products based on big data. For 31.93% of consumer forecasts of total expenses (before taking into account margins), the decision deviated from the fact by less than 1,000 rubles, and for 51.87% of forecasts, by less than 2,000 rubles (cumulative).

The results of the study partially confirmed the hypothesis. The use of machine learning technologies allows for reliable predictions of the volume of purchases of pharmacy products for the categories of essential and standard expenses. However, the hypothesis was not confirmed for comfortable and optional expenses. Nevertheless, the analysis of the accuracy of the prediction based on machine learning technologies showed its high reliability, and the error in predicting the total expenses of most consumers was insignificant.

Keywords: forecasting; forecast error; targeted marketing; big data; pharmaceutical retail

For citation. Pantelev, A. S., Mironenkova, Zh. V., Nemyatykh, O. D., Satdarova, F. Sh., & Gabdulkhakova, L. M. (2026). Validation of consumer spending forecasts for pharmacy products based on machine learning technologies. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 349-366. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1524>

Введение

В настоящее время валидация прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента (ТАА) является недостаточно изученной в разрезе анализа больших данных (Big Data). Ранее рядом исследовате-

лей рассматривались проблемы, связанные с систематическим сбором и анализом больших массивов данных о потребительском поведении при продаже ТАА, анализом основных параметров посетительского трафика, структурным проектированием в формате аналитических платформ, а также другими аспектами реализации цифровых технологий в сфере фармацевтического ретейла [1; 6-9; 13; 15; 18]. При всем многообразии существующих научных трудов, касающихся внедрения цифровых технологий в фармацевтической отрасли, отсутствует анализ аспектов, связанных с проведением валидации прогноза расходов потребителей ТАА с применением технологий машинного обучения, которые являются источником важной информации для повышения прибыли аптечных организаций, помогают предотвращать возможный отток потребителей, предлагая им своевременно более выгодные условия покупок ТАА [2-4; 10-12; 14; 16; 17].

Целью исследования являлось проведение валидации прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента для задач целевого маркетинга. Главной гипотезой исследования стало утверждение о том, что применение технологий машинного обучения позволяет строить достоверные прогнозы объемов покупок ТАА для установленного периода времени. Объектом изучения было поведение потребителей ТАА, предметом исследования - эффективность процессов прогнозирования расходов потребителей ТАА в розничном секторе фармацевтического рынка.

Материалы и методы

Построение модели прогноза проведено путем анализа транзакций в 1121 аптечной организации сетей «Озерки», «Доктор Столетов», «Самсон-Фарма», «Супераптека», «Мосаптека» за период 2018-2023 гг. При расчетах учитывались данные потребителей со следующими характеристиками:

- отсутствие склонности к прекращению покупок,
- участие в программе лояльности,
- объем транзакций потребителей - не менее 5,
- интервал между покупками - в среднем не более 150 дней.

Статистическая обработка данных проводилась с помощью специализированных компьютерных программ: данные по транзакциям собраны через sqlalchemy (sql server) - `pd.read_sql`; обработка и хранение данных осуществлялось в `pd.read_feather`; препроцессинг данных - с применением библиотеки pandas и numpy, difflib, pymystem3, sklearn, networkx, re, timezonefinder; моделирование - на sklearn, xgboost, catboost, scipy.

Для валидации прогноза расходов потребителей ТАА на 2024 г. распределенные по возрастанию данные фактических средних денежных расходов потребителей были сгруппированы по квартилям. Для расчета применена формула (1):

$$k = \frac{p}{100} * (n + 1)_{(1)}, \text{ где } \begin{cases} k - \text{данные позиции,} \\ p - \text{доля квартиля (25-й, 50-й, 75-й процентиля),} \\ n - \text{число позиций (22).} \end{cases}$$

Результаты и обсуждение

С применением алгоритмов искусственного интеллекта были смоделированы расходы потребителей товаров аптечного ассортимента на основе данных предыдущих периодов. В дизайн исследования, направленного на проведение валидации прогноза расходов потребителей, входило: на первом этапе - сегментирование фактических средних денежных расходов потребителей ТАА по квартилям, на втором этапе - распределение потребителей по долям абсолютных ошибок прогноза расходов. В ходе проведения исследования нами были смоделированы расходы потребителей ТАА на основе данных предыдущих периодов. Для валидации прогноза отсортированные по возрастанию данные по фактическим средним денежным расходам потребителей были разделены по квартилям.

Так как k_{Q1-Q3} были представлено не целыми числами (5,75; 11,50; 17,25), то была рассчитана интерполяция между 5-м и 6-м значениями, 11-м и 12-м, 17-м и 18-м значениями соответственно (Таблица 1).

Таблица 1.

Расчеты для сегментирования фактических средних денежных расходов потребителей товаров аптечного ассортимента

Table 1. Calculations for segmenting the actual average cash expenditures of consumers of pharmacy products

Линейная интерполяция по позиции / Linear position interpolation	Значение квартиля, руб. / Quartile value, rubles
$k_{Q1}=0,25*(22+1) = 5,75$	$Q1=5210,63+0,75*(6211,80-5210,63) \approx 5961,51$
$k_{Q2}=0,50*(22+1) = 11,50$	$Q2=18053,93+0,50*(21786,51-18053,93) \approx 19920,22$
$k_{Q3}=0,75*(22+1) = 17,25$	$Q3=48397,10+0,25*(55832,59-48397,10) \approx 50255,97$

Сегментирование данных по фактическим средним денежным расходам потребителей ТАА позволило выделить границы квартилей (Таблицы 2, 3).

Таблица 2.

**Границы квартилей средних денежных расходов потребителей
товаров аптечного ассортимента**

Table 2. Quartile Ranges for Average Monetary Expenditures by Consumers
on Pharmacy Products

Квартиль		Границы квартиля, руб.
Q1	«Минимально необходимые расходы»	$y_i < 6211,80$
Q2	«Стандартные расходы»	$6211,80 \leq y_i < 21786,51$
Q3	«Комфортные расходы»	$21786,51 \leq y_i < 55832,59$
Q4	«Необязательные расходы»	$y_i \geq 55832,59$

Таблица 3.

**Результаты модели сегментирования данных по фактическим средним
денежным расходам потребителей товаров аптечного ассортимента**

Table 3. Results of the data segmentation model based on the actual average monetary
expenditures of consumers of pharmacy products

№ пп	Группы потребителей по действии- тельным расходам, руб.	Смодели-ро- ванные ML средние де- нежные рас- ходы, руб.	Фактические средние де- нежные рас- ходы, руб.	Абсо- лютная ошибка, руб.	Относи- тельная ошибка, %	Средняя абсолют- ная про- центная ошибка, %
		$\hat{y}$	y_i	$ e_i = y_i - \hat{y}_i $	$ (e_i / y_i) $	MAPE
Квартиль 1 «Минимально необходимые расходы»						
1	1000-2000	1190,27	1114,40	75,87	6,81	4,44
2	2001-3000	2381,92	2261,78	120,14	5,31	
3	3001-4000	3401,92	3295,33	106,59	3,23	
4	4001-5000	4410,74	4339,56	71,18	1,64	
5	5001-6000	5482,44	5210,63	271,81	5,22	
Квартиль 2 «Стандартные расходы»						
6	6001-7000	6592,12	6211,80	380,32	6,12	3,98
7	7001-8000	7582,38	7561,94	20,44	0,27	
8	8001-9000	8205,02	8489,74	284,72	3,35	
9	9001-10000	9572,98	9774,65	201,67	2,06	
10	10001-15000	11274,23	11956,05	681,82	5,70	
11	15001-20000	16903,56	18053,93	1150,37	6,37	
Квартиль 3 «Комфортные расходы»						
12	20001-25000	19578,23	21786,51	2208,28	10,14	27,08
13	25001-30000	20791,33	27649,09	6857,76	24,80	
14	30001-35000	22466,16	31806,82	9340,66	29,37	
15	35001-40000	26084,63	37719,96	11635,33	30,85	
16	40001-45000	28016,89	41866,82	13849,93	33,08	
17	45000-50000	31822,92	48397,10	16574,18	34,25	

Квартиль 4 «Необязательные расходы»						
18	50001-60000	37105,73	55832,59	18726,86	33,54	41,68
19	60001-70000	38639,94	64960,32	26320,38	40,52	
20	70001-80000	41997,08	75286,88	33289,80	44,22	
21	80001-90000	48397,10	86002,75	37605,65	43,73	
22	90001-100000	49738,14	92773,46	43035,32	46,39	
	Итого	441635,73	662352,11			

Далее по данным, представленным в Таблице 1, был рассчитан межквартильный размах (Interquartile Range, IQR), который в отличие от разницы между максимальным и минимальным значениями не зависит от потенциально аномальных крайних точек данных. IQR показал диапазон, в котором сосредоточено 50% центральных значений данных, исключая крайние значения:

$$IQR = Q3 - Q1 = 50255,97 - 5961,51 = 44294,46 \text{ руб.}$$

При расчете данных, находящихся за пределами расчетных значений (выбросов), были установлены:

- нижняя граница $Q1 - 1,5 * IQR = 6211,80 - 1,5 * 44294,46 = - 60\,229,89 \text{ руб.};$
- верхняя граница $Q3 + 1,5 * IQR = 50255,97 + 1,5 * 44294,46 = 116697,66 \text{ руб.}$

Нижняя граница имела отрицательное значение, а верхняя граница находилась выше 116697,66 руб. Таких выбросов (аномалий) не было среди фактических средних значений денежных расходов, что позволило получить более точный прогноз.

Интерес представляет факт того, что в сегментах комфортных и необязательных расходов наблюдалось систематическое существенное занижение фактических расходов в среднем на 34,38%. Однако ошибка прогноза в данном случае нивелируется тем фактом, что в Q3 и Q4 количество покупок ТАА было несущественным - 2,18% (Таблица 4).

Таблица 4.

Распределение расходов потребителей по интервалу расходов и количеству покупок товаров аптечного ассортимента в 2024 г.

Table 4. Distribution of Consumer Expenditures by Expenditure Range and Number of Purchases of Pharmacy Products in 2024

Группа расходов	Интервал расходов, руб.		Количество покупок
1	0	2779,60	6035319
2	2779,61	5559,21	1636829
3	5559,22	8338,82	839792
4	8338,83	11118,43	513932

5	11118,44	13898,04	283207
6	13898,05	16677,65	181027
7	16677,66	19457,26	109189
8	19457,27	22236,87	75651
9	22236,88	25016,48	50245
10	25016,49	27796,09	31089
11	27796,10	30575,70	20016
12	30575,71	33355,31	12216
13	33355,32	36134,92	7145
14	36134,93	38914,53	5204
15	38914,54	41694,14	4083
16	41694,15	44473,75	2916
17	44473,76	47253,36	2024
18	47253,37	50032,97	1188
19	50032,98	52812,58	696
20	52812,59	55592,19	456
21	55592,20	58371,80	341
22	58371,81	61151,41	256
23	61151,42	63931,02	193
24	63931,03	66710,63	148
25	66710,64	69490,24	92
26	69490,25	72269,85	65
27	72269,86	75049,46	70
28	75049,47	77829,07	30
29	77829,08	80608,68	24
30	80608,69	83388,29	21
31	83388,30	86167,90	10
32	86167,91	88947,51	6
33	88947,52	91727,12	6
34	91727,13	94506,73	2
35	94506,74	97286,34	3

При распределении расходов по стоимостным группам интервал (шаг) формирования границ был получен путем деления дельты между минимальным и максимальным значением суммы чеков покупок ТАА (97286,34

руб.) на количество групп (35), составив 2779,60 руб. Количество покупок ТАА (представлено по 35 группам) определялось как число потребителей, попавших в интервал стоимостного диапазона расходов (Рисунок 1).

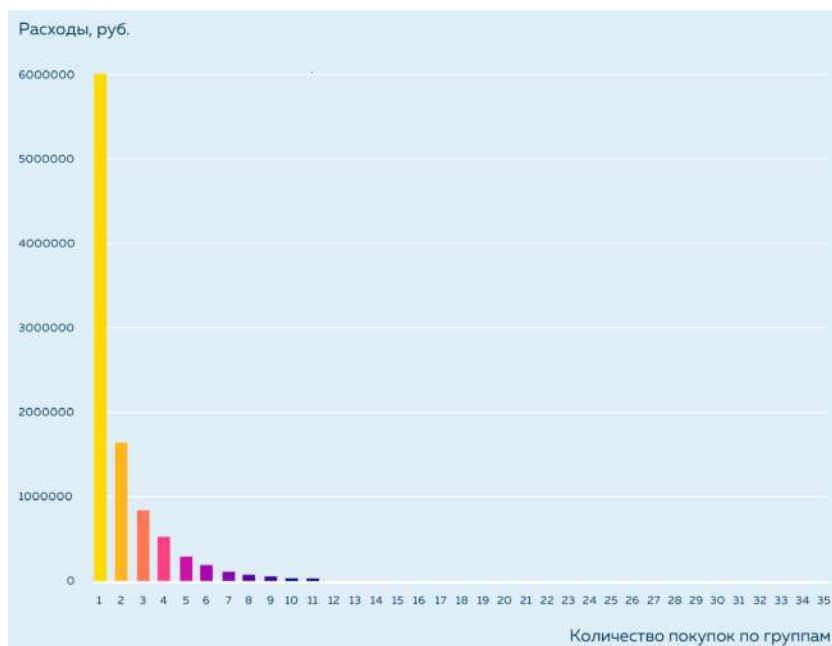


Рис. 1. Распределение расходов потребителей по стоимостным группам
Fig. 1. Distribution of consumer spending by price range

Далее мы провели валидацию прогноза расходов потребителей по такому критерию качества измерения как средняя абсолютная процентная ошибка прогноза (MAPE). Установлено, что MAPE была высокой для минимально необходимых и стандартных расходов денежных средств потребителей на ТАА: средние абсолютные процентные ошибки прогноза (MAPE) в квартилях Q1 и Q2 находились в пределах 5% (4,44% и 3,98%). К примеру, для сегмента средних денежных расходов в интервале от 8 до 9 тыс. руб. средние действительные расходы потребителей ТАА составили 8 489,74 руб., а средние прогнозные - 8 205,02 руб. Количество покупок в данных квартилях 1 и 2 было преобладающим, составив 97,82%. Распределение потребителей по долям абсолютных ошибок прогноза расходов на ТАА (до учета маржинальности) показало следующее (Таблица 5).

Таблица 5.

Распределение потребителей по долям абсолютных ошибок прогноза расходов на товары аптечного ассортимента (до учета маржинальности)

Table 5. Distribution of Customers by Share of Absolute Forecast Errors in Expenditures on Pharmacy Products (Before Accounting for Margins)

Группы потребителей по фактическим средним денежным расходам, руб.	Доля от общего числа потребителей, %	Доля потребителей с абсолютной ошибкой прогноза < 1000 руб. в группе, %	Доля потребителей с абсолютной ошибкой прогноза < 2000 руб. в группе, %	Доля от общего числа потребителей с абсолютной ошибкой прогноза < 1000 руб., %	Доля от общего числа потребителей с абсолютной ошибкой прогноза < 2000 руб., %
1000-2000	44,2851	52,1	84,1	23,07	37,24
2001-3000	19,7418	35,2	56,7	6,95	11,19
3001-4000	5,5351	18,7	33,6	1,04	1,86
4001-5000	5,5406	9,3	16,8	0,52	0,93
5001-6000	4,7885	4,7	8,4	0,23	0,40
6001-7000	2,9329	2,3	4,2	0,07	0,12
7001-8000	2,9249	1,2	2,1	0,04	0,06
8001-9000	2,4392	0,6	1,1	0,01	0,03
9001-10000	1,7811	0,3	0,5	0,01	0,01
10001-15000	5,6869	0,1	0,3	0,01	0,02
15001-20000	2,3460	0,1	0,1	0	0
20001-25000	1,0935	0	0,1	0	0
25001-30000	0,4892	0	0	0	0
30001-35000	0,2093	0	0	0	0
35001-40000	0,0968	0	0	0	0
40001-45000	0,0572	0	0	0	0
45000-50000	0,0274	0	0	0	0
50001-60000	0,0169	0	0	0	0
60001-70000	0,0055	0	0	0	0
70001-80000	0,0017	0	0	0	0
80001-90000	0,0003	0	0	0	0
90001-100000	0,0001	0	0	0	0
Итого	100			31,93	51,87

По 31,93% прогнозов суммарных расходов (до учета маржинальности) потребителей на ТАА решение отклонилось от факта на менее 1 тыс. руб., по более 51,87% прогнозов - на менее 2 тыс. руб. (накопительным итогом).

Обсуждение

Результаты валидации подтвердили, что прогноз суммарных расходов потребителей на основе технологий машинного обучения был точным:

более трети прогнозов (31,93%) отклонилось от фактических значений не более чем на 1 тыс. руб., а для половины прогнозов (51,87%) (накопительным итогом) данное отклонение не превышало 2 тыс. руб. Распределение потребителей по долям наблюдений (%) и абсолютных ошибок прогноза расходов на ТАА (руб.) до учета маржинальности более детально представлено на графике (Рисунок 2).

С минимальным операционным риском для 51,87% случаев в фармацевтическом ритейле можно прогнозировать расходы потребителей товаров аптечного ассортимента с применением технологий машинного обучения ML, планировать ресурсы, закупки, логистику.

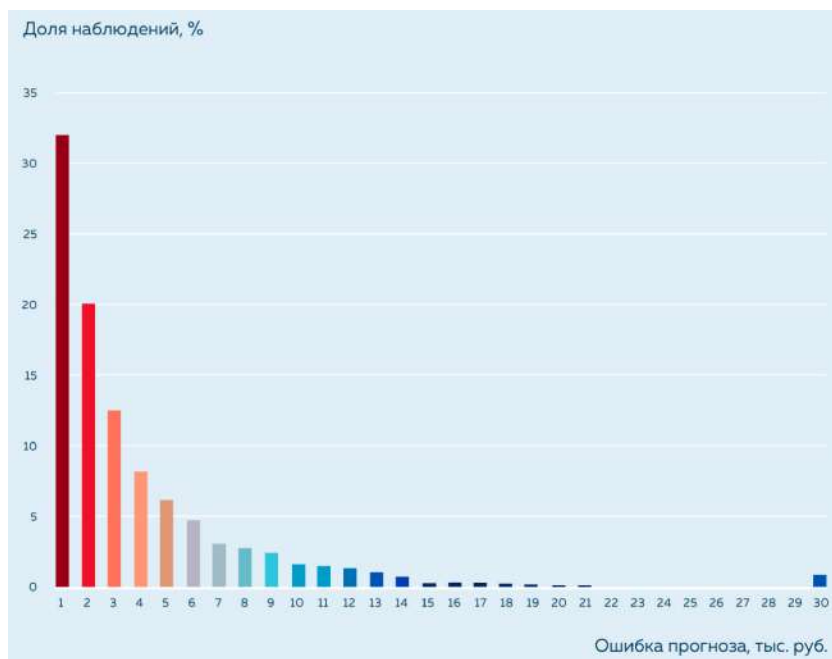


Рис. 2. Распределение потребителей по долям наблюдений и абсолютных ошибок прогноза расходов на товары аптечного ассортимента (до учета маржинальности) с детализацией

Fig. 2. Distribution of consumers by share of observations and absolute errors in forecasts of spending on pharmacy products (before accounting for margins), with a breakdown

Валидация прогноза расходов потребителей ТАА на основе технологий машинного обучения анализа больших данных позволяет фармацев-

тическому ритейлу прогнозировать потребительское поведение, работать с максимальной операционной эффективностью. Результат прогноза расходов потребителей ТАА на основе анализа больших показал, что проведение сегментирования потребителей товаров аптечного ассортимента на основе таких критериев как: число потребителей, средняя сумма чека, общая сумма дохода, средний доход с клиента, - верно определяет тренд изменения суммы трат потребителей по минимально необходимым и стандартным расходам. Итоговое решение не предполагает достоверного прогноза по существенным тратам потребителей (свыше 20 тыс. руб.), модель прогнозировала расходы ниже фактических, что является систематической ошибкой, которую необходимо скорректировать.

Заключение

Результаты исследования частично подтвердили выдвинутую гипотезу. Применение технологий машинного обучения позволяет строить достоверные прогнозы объемов покупок ТАА для категорий минимально необходимых и стандартных расходов. Однако в отношении комфортных и необязательных расходов гипотеза подтверждения не нашла. Тем не менее анализ точности прогноза на основе технологий машинного обучения показал его высокую надежность, ошибка прогноза суммарных расходов большинства потребителей была незначительной. Валидация прогноза потребления на основе технологий машинного обучения позволяет фармацевтическому ритейлу решать задачи целевого маркетинга. Результаты анализа потребительского потенциала могут являться основой формирования управленческих решений по повышению лояльности потребителей, корректировке ассортимента в соответствии с потребительским спросом, разработке целевых предложений, направленных на увеличение продаж товаров аптечного ассортимента.

Список литературы

1. Абрамов, В. И., & Чуркин, Д. А. (2022). Предиктивная аналитика взаимоотношений с клиентами как метод адаптации компании к изменениям и повышения ценности предложения. *Экономика, предпринимательство и право*, 12(6), 1709–1722. <https://doi.org/10.18334/epp.12.6.114842>. EDN: <https://elibrary.ru/GPPFPW>
2. Афанасьева, Т. Г., Кушнир, А. Ю., Морковин, В. А., Вешкурцева, В. И., Цыганкова, А. С., Давидян, А. А., & Ленкин, С. Г. (2025). Цифровой маркетинг как элемент продвижения аптечных организаций. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, 1, 1–13. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-1-13>. EDN: <https://elibrary.ru/VUREAE>

3. Виничук, О. Ю., & Никулина, Т. А. (2023). Современные методы продвижения фармацевтических компаний на региональных фармацевтических рынках в условиях цифровизации бизнеса. *Вестник евразийской науки*, 15(3). <https://esj.today/77ecvn323.html>. EDN: <https://elibrary.ru/HCIRNK>
4. Кимадзе, М. И., & Кондратов, С. Ю. (2020). Проблемы формирования клиентоориентированной стратегии в онлайн фармацевтической организации. *Азимут научных исследований: экономика и управление*, 9(1), 173–177. <https://doi.org/10.26140/anie-2020-0901-0042>. EDN: <https://elibrary.ru/UPOVKV>
5. Ковалева, Т. Г., & Саркисян, К. А. (2022). Анализ финансово-экономической деятельности аптечной организации «Еаптека». *Тенденции развития науки и образования*, 88(4), 114–116. <https://doi.org/10.18411/trnio-08-2022-170>. EDN: <https://elibrary.ru/STYEPA>
6. Кондрашов, А. А., Курашов, М. М., & Лоскутова, Е. Е. (2025). Исследование потенциала использования регрессионного анализа больших данных для оценки факторов, влияющих на стоимость фармацевтической помощи детям. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, 1, 65–80. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-65-80>. EDN: <https://elibrary.ru/UPMUQH>
7. Мамиев, О. А., Финогенов, Н. А., & Сологуб, Г. Б. (2020). Использование методов машинного обучения для решения задач прогнозирования суммы и вероятности покупки на основе данных электронной коммерции. *Моделирование и анализ данных*, 10(4), 31–40. <https://doi.org/10.17759/mda.2020100403>. EDN: <https://elibrary.ru/JGVTGL>
8. Пантелеев, А. С., Мироненкова, Ж. В., Умаров, С. З., и др. (2025). Разработка алгоритмов для построения модели потребительского поведения на фармацевтическом рынке. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*, 27(4), 134–140. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2025-27-4-134-140>. EDN: <https://elibrary.ru/PUYNRU>
9. Умаров, С. З., Голубенко, Р. А., Хорунжая, А. А., & Фролов, Л. Е. (2025). Возможности аналитической платформы в области моделирования количественных параметров функционирования розничной аптеки. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, 2, 143–159. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-2-143-159>. EDN: <https://elibrary.ru/KYUGWK>
10. Умаров, С. З., Наркевич, К. И., & Грицаненко, Д. С. (2020). Количественная характеристика посетительского трафика аптек с различным режимом работы. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*, 22(3), 39–44. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-3-39-44>. EDN: <https://elibrary.ru/YRLTNU>
11. Erevelles, S., Fukawa, N., & Swayne, L. (2016). Big Data consumer analytics and the transformation of marketing. *Journal of Business Research*, 69(2), 897–904. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.07.001>

12. Fan, S., Lau, R. Y. K., & Zhao, J. L. (2015). Demystifying Big Data Analytics for Business Intelligence Through the Lens of Marketing Mix. *Big Data Research*, 2(1), 28–32. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2015.02.006>
13. Kale, R., Bidwai, K., Maske, M., Bansode, R., & Gurav, P. (2022). Prediction of Customer Purchase Intention using Social Media Data. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2(5), 10–13. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-4003>
14. Lamberton, C., & Stephen, A. T. (2016). A thematic exploration of digital, social media, and mobile marketing: research evolution from 2000 to 2015 and an agenda for future inquiry. *Journal of Marketing*, 80(6), 146–172. <https://doi.org/10.1509/jm.15.0415>
15. Li, J., Pan, S., Huang, L., & Zhu, X. (2019). A machine learning based method for customer behavior prediction. *Tehnički vjesnik*, 26(6), 1670–1676. <https://doi.org/10.17559/tv-20190603165825>
16. Raghupathi, W., & Raghupathi, V. (2014). Big data analytics in healthcare: promise and potential. *Health Information Science and Systems*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/2047-2501-2-3>. EDN: <https://elibrary.ru/KBAFNF>
17. Wedel, M., & Kannan, P. K. (2016). Marketing analytics for data-rich environments. *Journal of Marketing*, 80(6), 97–121. <https://doi.org/10.1509/jm.15.0413>
18. Zakharova, O., Lobuteva, A., Gribova, Ya., Krylova, O., Mironenkova, Zh., Gabdulkhakova, L., & Belyavskiy, M. (2024). The primary hyperparathyroidism and its complications: Substantiation of funding volume for hospital pharmacotherapy. *Electronic Journal of General Medicine*, 21(6), em616. <https://doi.org/10.29333/ejgm/15713>. EDN: <https://elibrary.ru/AZAIWC>

References

1. Abramov, V. I., & Churkin, D. A. (2022). Predictive analytics of customer relationships as a method for company adaptation to changes and increasing the value of the offer. *Ekonomika, Predprinimatel'stvo i Pravo*, 12(6), 1709–1722. <https://doi.org/10.18334/epp.12.6.114842>. EDN: <https://elibrary.ru/GPPFPW>
2. Afanasyeva, T. G., Kushnir, A. Yu., Morkovin, V. A., Veshkurtseva, V. I., Tsygankova, A. S., Davidyan, A. A., & Lenkin, S. G. (2025). Digital marketing as an element of promoting pharmacy organizations. *Sovremennye Problemy Zdravookhraneniya i Meditsinskoy Statistiki*, 1, 1–13. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-1-13>. EDN: <https://elibrary.ru/VUREAE>
3. Vinichuk, O. Yu., & Nikulina, T. A. (2023). Modern methods for promoting pharmaceutical companies in regional pharmaceutical markets in the context of business digitalization. *Vestnik Evraziyskoy Nauki*, 15(3). <https://esj.today/77ecvn323.html>. EDN: <https://elibrary.ru/HCIRNK>

4. Kimadze, M. I., & Kondratov, S. Yu. (2020). Problems of forming a customer-oriented strategy in an online pharmaceutical organization. *Azimut Nauchnykh Issledovaniy: Ekonomika i Upravlenie*, 9(1), 173–177. <https://doi.org/10.26140/anie-2020-0901-0042>. EDN: <https://elibrary.ru/UPOVKV>
5. Kovaleva, T. G., & Sarkisyan, K. A. (2022). Analysis of the financial and economic performance of the pharmacy organization “Eapteka”. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*, 88(4), 114–116. <https://doi.org/10.18411/trnio-08-2022-170>. EDN: <https://elibrary.ru/STYEPA>
6. Kondrashov, A. A., Kurashov, M. M., & Loskutova, E. E. (2025). Research on the potential of using regression analysis of big data to assess factors affecting the cost of pharmaceutical care for children. *Sovremennye Problemy Zdravookhraneniya i Meditsinskoj Statistiki*, 1, 65–80. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-65-80>. EDN: <https://elibrary.ru/UPMUQH>
7. Mamiev, O. A., Finogenov, N. A., & Sologub, G. B. (2020). Using machine learning methods to solve problems of predicting the amount and probability of purchase based on e-commerce data. *Modelirovanie i Analiz Dannykh*, 10(4), 31–40. <https://doi.org/10.17759/mda.2020100403>. EDN: <https://elibrary.ru/JGVTGL>
8. Panteleev, A. S., Mironenkova, Zh. V., Umarov, S. Z., et al. (2025). Development of algorithms for building a model of consumer behavior in the pharmaceutical market. *Mediko-Farmatsevticheskiy Zhurnal “Pul’s”*, 27(4), 134–140. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2025-27-4-134-140>. EDN: <https://elibrary.ru/PUYNRU>
9. Umarov, S. Z., Golubenko, R. A., Khorunzhaya, A. A., & Frolov, L. E. (2025). Opportunities of an analytical platform in modeling quantitative parameters of retail pharmacy operations. *Sovremennye Problemy Zdravookhraneniya i Meditsinskoj Statistiki*, 2, 143–159. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-2-143-159>. EDN: <https://elibrary.ru/KYUGWK>
10. Umarov, S. Z., Narkevich, K. I., & Gritsanenko, D. S. (2020). Quantitative characteristics of pharmacy visitor traffic with different operating modes. *Mediko-Farmatsevticheskiy Zhurnal “Pul’s”*, 22(3), 39–44. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-3-39-44>. EDN: <https://elibrary.ru/YRLTNU>
11. Erevelles, S., Fukawa, N., & Swayne, L. (2016). Big Data consumer analytics and the transformation of marketing. *Journal of Business Research*, 69(2), 897–904. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.07.001>
12. Fan, S., Lau, R. Y. K., & Zhao, J. L. (2015). Demystifying Big Data Analytics for Business Intelligence Through the Lens of Marketing Mix. *Big Data Research*, 2(1), 28–32. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2015.02.006>
13. Kale, R., Bidwai, K., Maske, M., Bansode, R., & Gurav, P. (2022). Prediction of Customer Purchase Intention using Social Media Data. *International Journal of Ad-*

- vanced Research in Science, Communication and Technology*, 2(5), 10–13. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-4003>
14. Lamberton, C., & Stephen, A. T. (2016). A thematic exploration of digital, social media, and mobile marketing: research evolution from 2000 to 2015 and an agenda for future inquiry. *Journal of Marketing*, 80(6), 146–172. <https://doi.org/10.1509/jm.15.0415>
 15. Li, J., Pan, S., Huang, L., & Zhu, X. (2019). A machine learning based method for customer behavior prediction. *Tehnički vjesnik*, 26(6), 1670–1676. <https://doi.org/10.17559/tv-20190603165825>
 16. Raghupathi, W., & Raghupathi, V. (2014). Big data analytics in healthcare: promise and potential. *Health Information Science and Systems*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/2047-2501-2-3>. EDN: <https://elibrary.ru/KBAFNF>
 17. Wedel, M., & Kannan, P. K. (2016). Marketing analytics for data-rich environments. *Journal of Marketing*, 80(6), 97–121. <https://doi.org/10.1509/jm.15.0413>
 18. Zakharova, O., Lobuteva, A., Gribova, Ya., Krylova, O., Mironenkova, Zh., Gabdulkhakova, L., & Belyavskiy, M. (2024). The primary hyperparathyroidism and its complications: Substantiation of funding volume for hospital pharmacotherapy. *Electronic Journal of General Medicine*, 21(6), em616. <https://doi.org/10.29333/ejgm/15713>. EDN: <https://elibrary.ru/AZAIWC>

ВКЛАД АВТОРОВ

Мироненкова Ж.В., Немытых О.Д.: концепция и дизайн исследования.

Пантелеев А.С., Габдулхакова Л.М.: сбор и обработка материала.

Пантелеев А.С., Мироненкова Ж.В.: статистическая обработка.

Пантелеев А.С., Мироненкова Ж.В.: написание текста.

Немытых О.Д., Сатдарова Ф.Ш., Габдулхакова Л.М.: редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Zhanna V. Mironenkova, Oksana D. Nemyatykh: research concept and design.

Anton S. Panteleev, Laysan M. Gabdulkhakova: data collection and processing.

Anton S. Panteleev, Zhanna V. Mironenkova: statistical analysis.

Anton S. Panteleev, Zhanna V. Mironenkova: writing the text.

Oksana D. Nemyatykh, Farida Sh. Satdarova, Laysan M. Gabdulkhakova: editing.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Пантелеев Антон Сергеевич, аспирант

*Санкт-Петербургский госуд. химико-фармацевтический университет
ул. Профессора Попова, 14А, г. Санкт-Петербург, 197022, Российская Фе-
дерация
anton.panteleev@spcpcu.ru*

Мироненкова Жанна Викторовна, доктор фармацевтических наук, профессор, профессор кафедры медицинского и фармацевтического товароведения
Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет
ул. Профессора Попова, 14А, г. Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация
shanna.mironenkova@pharminnotech.com

Немятых Оксана Дмитриевна, доктор фармацевтических наук, профессор, профессор кафедры управления и экономики фармации
Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет
ул. Профессора Попова, 14А, г. Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация
oksana.nemyatyh@pharminnotech.com

Сатдарова Фарида Шамильевна, кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры управления и экономики фармации
Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет
ул. Профессора Попова, 14А, г. Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация
farida.satdarova@pharminnotech.com

Габдулхакова Ляйсан Марсовна, кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры фармации
Башкирский государственный медицинский университет
ул. Ленина, 3, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450008, Российская Федерация
lmgabdulkhakova@bashgmu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anton S. Panteleev, Postgraduate student of the Department of Medical and Pharmaceutical Commodity Science
St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University
14А, Prof. Popov Str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation
anton.panteleev@spcpu.ru
SPIN-code: 8368-0310

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0232-6156>

Researcher ID: NSU-7204-2025

Zhanna V. Mironenkova, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Professor of the Department of Medical and Pharmaceutical Commodity Science
St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University
14A, Prof. Popov Str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation
shanna.mironenkova@pharminnotech.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1029-093X>
Researcher ID: HNP-3052-2023
Scopus Author ID: 16413774900

Oksana D. Nemyatykh, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Professor of the Department of Pharmacy Management and Economics
St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University
14A, Prof. Popov Str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation
oksana.nemyatykh@pharminnotech.com
SPIN-code: 9179-3790
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5933-2120>

Farida Sh. Satdarova, PhD in Pharmacy, Associate Professor of the Department of Pharmacy Management and Economics
St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University
14A, Prof. Popov Str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation
farida.satdarova@pharminnotech.com
SPIN-code: 6168-0924
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1164-3265>

Laysan M. Gabdulkhakova, PhD in Pharmacy, Associate Professor of the Department of Pharmacy
Bashkir State Medical University
3, Lenin Str., Ufa, 450008, Russian Federation
lmgabdulkhakova@bashgmu.ru
SPIN-code: 7478-9822
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1294-3976>

Поступила 16.12.2025

После рецензирования 02.03.2026

Принята 16.03.2026

Received 16.12.2025

Revised 02.03.2026

Accepted 16.03.2026

Общественное здоровье, организация и социология здравоохранения, медико-социальная экспертиза / Public Health, Health Organization, Sociology of Health, Medical and Social Expertise

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1822](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1822)EDN: [PXUAFI](https://www.edn.ru/PXUAFI)

УДК 616-084+159.99



Закономерности общей уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у осужденных – участников боевых действий, состоящих на учете у нарколога

Н.А. Цветкова^{1,2}, П.А. Кисляков^{1,3,4}, К.Е. Лагвилава⁵

¹Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт
Федеральной службы исполнения наказаний», Москва, Российская Федерация

²Государственный университет просвещения, Москва, Российская Федерация

³Российский государственный социальный университет,
Москва, Российская Федерация

⁴Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
Москва, Российская Федерация

⁵Псковский государственный университет, Псков, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Ресоциализация осужденных – участников боевых действий, состоящих на учете у нарколога, затрудняется комплексом взаимосвязанных проблем, обусловленных наложением двух травмирующих психику факторов – пенитенциарного опыта и опыта участия в боевых действиях, следствием которого часто является посттравматическое стрессовое расстройство. Когда к этим двум факторам добавляется третий – зависимость осужденных от алкоголя, необходимость своевременного выявления признаков нарушения их психического здоровья и последующего медицинского, психологического и социального вмешательства повышается. Чтобы оно было эффективным, необходимы знания о закономерностях уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у данной категории осуждённых.

Цель – выявление закономерностей уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у осуждённых – участников боевых действий, состоящих на учете у нарколога.

Методы. Исследование проводилось в 2026 году. В нем приняли участие 167 человек мужского пола в возрасте от 22 до 60 лет ($M=37$ лет) из числа осужденных к лишению свободы, принявших участие в специальной военной операции на Украине и вернувшихся в исправительное учреждение, чтобы отбыть оставшийся срок наказания. На момент исследования испытуемые находились в местах лишения свободы и состояли на профилактическом учете у нарколога. Методики: Сокращенный многофакторный опросник для исследования личности (СМОЛ) (J. Kincannon, адаптация В.П. Зайцева), Миссисипская шкала посттравматического стрессового расстройства (ПТСР) (T. Keane, D. Vreven et al., адаптация Н.В. Тарабриной и др.), тест нервно-психической адаптации (НПА) (И.Н. Гурвич), шкала провокации агрессии (ПА) (J. Archer et al., адаптация И.А. Фурманова), диагностики особенностей правового сознания (ПС) (Д.С. Безносков, А.К. Бордунос).

Результаты. Установлено, что более трети выборки (34,1%) имеют признаки пограничных или выраженных психических расстройств, а клинически значимый уровень ПТСР диагностирован у 13,1% испытуемых. Личностный профиль испытуемых характеризуется доминированием истерических, психопатических, депрессивных и шизоидных черт, а агрессивное реагирование проявляется преимущественно в пассивных и подавленных формах при высоком уровне раздражения и гнева, что указывает на феномен «замороженной агрессии» и эмоционального истощения. Установлена прямая тесная связь ПТСР с нервно-психической дезадаптацией, импульсивностью и деформациями правосознания, особенно – с цинизмом и нигилизмом, которые ассоциированы с психопатией и гипоманией.

Заключение. Выявление и своевременная профилактика факторов риска нарушения психического здоровья осужденных – участников боевых действий, состоящих на учёте у нарколога, имеет решающее значение в плане снижения риска рецидивной преступности и обеспечения успешной ресоциализации после их освобождения из исправительных учреждений. Полученные данные обосновывают необходимость комплексного психокоррекционного и медико-социального реабилитационного подхода, сочетающего травмо-фокусированную терапию, аддиктологическую помощь и социально-психологическую работу по формированию правосознания.

Ключевые слова: осужденные; участники войны; алкогольная зависимость; посттравматическое стрессовое расстройство; аддикции; закономерности уязвимости; прогноз медико-социальной ресоциализации

Для цитирования. Цветкова, Н. А., Кисляков, П. А., Лагвилава, К. Е. (2026). Закономерности общей уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у осужденных – участников боевых действий, состоящих на учёте у нарколога, состоящих на учёте у нарколога. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 367-392. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1822>

Patterns of general vulnerability to post-traumatic stress disorder and addictions among convicted combatants registered with a narcologist

N.A. Tsvetkova^{1,2}, P.A. Kislyakov^{1,3,4}, K.E. Lagvilava⁵

¹Federal State Institution "Research Institute of the Federal Penitentiary Service", Moscow, Russian Federation

²State University of Education, Moscow, Russian Federation

³Russian State Social University, Moscow, Russian Federation

⁴Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

⁵Pskov State University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. The re-socialization of convicted combatants registered with a narcologist is hampered by a complex of interrelated problems caused by the overlap of two traumatic mental factors – penitentiary experience and experience of participating in hostilities, which often results in post-traumatic stress disorder. When a third factor is added to these two factors – the dependence of convicts on alcohol, the need for timely detection of signs of mental health disorders and subsequent medical, psychological and social intervention increases. For it to be effective, knowledge of the patterns of vulnerability to post-traumatic stress disorder and addictions in this category of convicts is necessary.

Purpose. The aim is to identify patterns of vulnerability to post-traumatic stress disorder and addictions among convicted combatants registered with a narcologist.

Methods. The study was conducted in 2026. It was attended by 167 men aged 22 to 60 years (M=37 years) from among those sentenced to imprisonment, who took part in a special military operation in Ukraine and returned to a correctional institution to serve the remainder of their sentence. At the time of the study, the subjects were in prison and were on preventive registration with a narcologist. Methods: An abbreviated multifactorial questionnaire for personality research (SMOL) (J. Kincannon, adaptation by V.P. Zaitseva), the Mississippi Scale of Post-traumatic Stress Disorder (PTSD) (T. Keane, D. Vreven et al., adaptation by N.V. Tarabrina et al.), the test of neuropsychiatric adaptation (NPA) (I.N. Gurvich), the scale of provocation of aggression (PA) (J. Archer et al., adaptation by I.A. Furmanov), diagnostics of the features of legal consciousness (PS) (D.S. Beznosov, A.K. Bordunos).

Results. It was found that more than a third of the sample (34.1%) have signs of borderline or severe mental disorders, and a clinically significant level of PTSD was diagnosed in 13.1% of the subjects. The personality profile of the subjects is charac-

terized by the dominance of hysterical, psychopathic, depressive and schizoid traits, and aggressive reactions manifest themselves mainly in passive and suppressed forms with a high level of irritation and anger, indicating the phenomenon of “frozen aggression” and emotional exhaustion. A direct close relationship has been established between PTSD and neuropsychiatric maladjustment, impulsivity, and deformations of legal consciousness, especially with cynicism and nihilism, which are associated with psychopathy and hypomania.

Conclusion. Identification and timely prevention of risk factors for mental health disorders of convicted combatants registered with a narcologist is crucial in terms of reducing the risk of recidivism and ensuring successful re-socialization after their release from correctional institutions. The data obtained substantiate the need for a comprehensive psychocorrective, medical and social rehabilitative approach combining trauma-focused therapy, addiction treatment and socio-psychological work on the formation of legal awareness.

Keywords: convicts; war prisoners; alcohol dependence; post-traumatic stress disorder; addictions; patterns of vulnerability; prognosis of medical and social resocialization

For citation. Tsvetkova, N. A., Kislyakov, P. A., Lagvilava, K. E. (2026). Patterns of general vulnerability to post-traumatic stress disorder and addictions among convicted combatants registered with a narcologist. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 367-392. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1822>

Введение

Актуальность проблемы психического здоровья участников боевых действий из числа осужденных, отбывающих наказания в местах лишения свободы, аргументируется тем, что они подвергались многократному воздействию экстремальных стрессоров – угрозе жизни, гибели товарищей, тяжёлым ранениям и моральным травмам. Отбывать оставшийся срок наказания в исправительном учреждении они вернулись уже с новым статусом – статусом осужденных – участников специальной военной операции (далее – СВО), о психическом состоянии которых мало что известно врачам, психологам и сотрудникам уголовно-исполнительной системы. Однако установлено, что после возвращения с фронта многие участники боевых действий сталкиваются с посттравматическим стрессовым расстройством (ПТСР, F43.1 по международной классификации болезней в 10-ом издании). Эта реакция психики на травму проявляется главным образом симптомами повторения переживаний трагического

события в форме флешбэков, повторяющихся кошмарных сновидений, сопровождающихся паникой или тревогой, злостью и гневом, чувством безнадежности и/или вины. В числе других последствий встречаются: депрессивные состояния («синдром выжившего», чувство глубокой безнадежности, апатия); деструктивное поведение (вспышки немотивированной агрессии, злоупотребление алкоголем или ПАВ, суицидальное поведение); кризис социализации (утрата доверия к гражданским лицам, дезадаптация привычных на войне поведенческих паттернов в изменившихся условиях), а также, что реже, – перевод психики с «военной темы» на темы повседневной обыденной жизни путем глубокого кризиса реадaptации и даже посттравматический рост (переоценка ценностей, возросшие жизнестойкость и жизнеспособность).

Например, установлено, что ПТСР у комбатантов представляет собой многофакторный феномен, включающий нейробиологические, психологические и социальные компоненты. Ключевыми особенностями ПТСР являются высокая коморбидность с депрессией и тревогой [7; 11; 18], динамическая трансформация симптоматики со временем [5; 9], определяющая роль социально-демографических факторов [17] и историко-культурного контекста [1].

Ряд исследователей указывает на наличие устойчивой взаимосвязи между ПТСР и злоупотреблением психоактивными веществами у участников боевых действий. А.М. Резник с соавт. отмечают, что злоупотребление алкоголем или другими ПАВ в боевой обстановке чаще всего наблюдается у лиц, ранее склонных к злоупотреблению или имеющих зависимость. В связи с переживанием эмоционального напряжения аддиктивное поведение может усиливаться или рецидивировать, вести к нарушениям поведения и конфликтам, ухудшать способность к адаптации на войне и снижать боеспособность, провоцировать другие психические нарушения, ассоциированные с зависимостью, мешать психологической и медицинской помощи. Аддиктивные расстройства во время войны становятся если не абсолютным прогностическим фактором, то важным предвестником будущей алкогольной зависимости или зависимости от ПАВ [6].

В работе Б. Проценко [16] на основе феноменологического анализа 116 случаев военнослужащих Украины установлено, что 50% пациентов с ПТСР имели сопутствующие проблемы с ПАВ, при этом алкоголь являлся наиболее распространённым ПАВ, а злоупотребление им служит ведущим фактором преждевременного прекращения терапии (84% досрочно

завершивших лечение составляли именно лица с зависимостью). Автор выделяет два клинических профиля: пациенты с преморбидной аддикцией, у которых ПТСР носит более «диффузный» характер, и лица, начавшие употреблять ПАВ после травмы, где редукция симптомов ПТСР напрямую снижает тягу к веществам.

В систематическом обзоре С. Maria-Rios и J. Morrow [14] рассматриваются нейробиологические механизмы общей уязвимости аддиктов, а также роль в ней гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси и генетических факторов.

Другие исследователи, в частности, S. Back и соавторы [10] и L. Najavits с коллегами [15], подчёркивают, что коморбидность ПТСР и зависимость от ПАВ значительно ухудшает прогноз, повышает риск рецидивов и требует интегрированного подхода, сочетающего травмо-фокусированную психотерапию с аддиктологическими техниками. К. Brady et al. [12] и J. Bremner et al. [13] также отмечают, что до 60% пациентов с ПТСР имеют сопутствующие расстройства употребления, причём самолечение тревоги и избегание травматических воспоминаний выступают ключевыми мотивами. Таким образом, совокупность данных указывает на много-факторную этиологию коморбидности, где переплетаются психологические, нейробиологические, генетические и средовые факторы, что обосновывает необходимость разработки комплексных психотерапевтических и психо профилактических программ для участников боевых действий.

Особой группой социального риска среди участников боевых действий являются осужденные – как те, которые уже вернулись из мест лишения свободы по месту жительства, так и те, которые после участия в СВО вернулись в исправительные учреждения отбывать оставшийся срок наказания, но со временем выйдут на свободу.

Анализ исследований, проведенных в этом направлении, показывает, что ресоциализация отбывших наказание лиц – участников СВО затрудняется комплексом взаимосвязанных предикторов, образовавшимся вследствие наложения двух факторов, – наличия пенитенциарного опыта и опыта участия в боевых действиях. К данным двум факторам может добавляться третий фактор – злоупотребление ПАВ, влиявший на человека до осуждения, в период отбывания наказания в местах лишения свободы (осужденный состоял на профилактическом учете у нарколога), во время участия в СВО и продолжающий влиять по возвращении с войны в исправительное учреждение.

Как отмечает Е.В. Семелёва с коллегами [8], успешная адаптация данной категории лиц требует социальной, психологической и трудовой реабилитации, однако специфика учреждений уголовно-исполнительной системы делает этот процесс особенно сложным. Р.Р. Искандаров [2] подчёркивает, что ПТСР у комбатантов в местах лишения свободы усугубляется изоляцией, социальной депривацией и отсутствием адекватной психиатрической помощи, при этом распространённость ПТСР среди осуждённых значительно выше, чем в общей популяции. Д.В. Катаев [3] указывает на риски рецидивной преступности, связанные с социальной дезадаптацией и маргинализацией освобождающихся лиц. К.О. Миненко с соавт. [4] указывает на необходимость законодательного закрепления мер постпенитенциарной probation, включая обязательную психологическую реабилитацию и трудоустройство вышедших на свободу участников СВО, зачастую не имеющих профессионально-трудовых навыков и поэтому неконкурентоспособных на рынке труда.

Таким образом, результаты уже опубликованных исследований свидетельствуют о назревшей потребности формирования эффективной системы ранней диагностики, психотерапии и ресоциализации участников боевых действий, удовлетворение которой становится не только медицинской, но и государственной задачей, поскольку от ее решения зависит не только благополучие самих участников войны, но и сохранение боеспособности армии, уровень социального здоровья и социальная безопасность в стране. Очевидно, что осуждённые – участники боевых действий, отбыв наказание в исправительном учреждении и выйдя на свободу, будут испытывать большие трудности адаптации к мирной жизни, в том числе и по причине уязвимости к аддикциям, негативно сказывающейся на их психическом здоровье.

Целью настоящего исследования является изучение психического профиля и выявление закономерностей уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у осуждённых – участников боевых действий, состоящих на учете у нарколога.

Материалы и методы исследования

Участники исследования. Исследование проводилось в 2026 году. В исследовании приняло участие 167 человек мужского пола в возрасте от 22 до 60 лет ($M=37$ лет), которые были осуждены к лишению свободы и, приняв участие в СВО, вновь вернулись в исправительное учреждение отбывать оставшийся срок наказания. На момент исследования испытуемые находились в местах лишения свободы и при этом все они состояли на профилактическом учете у нарколога.

Методический инструментарий

Были собраны социально-демографические данные о возрасте, семейном положении, уровне образования, трудовой занятости испытуемых до осуждения.

Для достижения цели исследования использовался пакет методик:

- Сокращенный многофакторный опросник для исследования личности (СМОЛ) (J. Kincannon, адаптация В.П. Зайцева) – ориентирован на выявление наиболее распространенных ситуативных или застойных личностных расстройств (шкалы: ипохондрия, депрессия, истерия, психопатия, паранойяльность, психастения, шизофрения, гипомания);
- Миссисипская шкала посттравматического стрессового расстройства (ПТСР) (T. Keane, D. Vreven et al., адаптация Н.В. Тарабриной и др.) – предназначена для диагностики ПТСР у военнослужащих, побывавших в зоне боевых действий;
- Тест нервно-психической адаптации (НПА) (И.Н. Гурвич) – предназначен для проведения уровневой оценки психического состояния в различных экстремальных ситуациях; позволяет разделить обследуемых лиц на пять выделяемых в военной психиатрии групп психического здоровья;
- Шкала провокации агрессии (ПА) (J. Archer et al., адаптация И.А. Фурманова) – предназначена для оценки эмоционального и поведенческого реагирования в ситуации провокации агрессии (шкалы: злость/гнев; бессилие; раздражение; страх; активная агрессия; пассивная агрессия; подавленная агрессия; ассертивная реакция; бегство/уход из ситуации);
- Диагностика особенностей правового сознания (ПС) (Д.С. Безносов, А.К. Бордунос) – определяет шесть основных видов правового сознания (шкалы: реализм, идеализм, фетишизм, цинизм, скептицизм, нигилизм).

Анализ данных. Полученные эмпирические данные осмысливались и обрабатывались с помощью качественных и количественных методов анализа, в том числе: анализ процентных соотношений, описательные статистики, корреляционный анализ Спирмена. Расчеты производились на базе пакета статистических программ SPSS 26.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты диагностики представлены в таблице 1 и на рисунках 1-5.

Таблица 1.

Описательные статистики

Table 1. Descriptive Statistics

Шкалы	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Стандартное отклонение	Асимметрия	Экссесс
Ипохондрия (СМОЛ)	0	12	4,47	2,90	0,28	-0,61
Депрессия (СМОЛ)	1	15	6,49	2,94	0,69	0,07
Истерия (СМОЛ)	3	20	9,87	3,51	0,43	-0,26
Психопатия (СМОЛ)	2	15	7,66	2,77	0,55	-0,25
Паранойальность (СМОЛ)	1	10	4,65	2,28	0,48	-0,59
Психастения (СМОЛ)	0	15	5,28	3,72	0,70	-0,32
Шизофрения (СМОЛ)	0	16	6,46	3,89	0,52	-0,31
Гипомания (СМОЛ)	0	15	4,91	2,46	0,59	1,02
Миссисипская шкала (ПТСР)	14	184	74,02	21,12	0,90	4,19
Нервнопсихическая адаптация (НПА)	0	104	20,26	16,22	1,60	4,84
Злость, гнев (ПА)	0	46	18,92	11,77	0,24	-0,91
Бессилие (ПА)	0	42	7,14	8,40	1,77	3,56
Раздражение(ПА)	0	46	22,31	11,77	0,09	-0,79
Страх (ПА)	0	40	3,81	6,21	2,85	10,15
Активная агрессия (ПА)	0	22	6,32	5,47	0,92	0,14
Пассивная агрессия (ПА)	0	23	5,38	5,56	1,34	1,24
Подавленная агрессия (ПА)	0	21	7,87	5,10	0,55	-0,04
Ассертивная реакция (ПА)	0	24	13,34	5,73	-0,41	-0,50
Бегство/уход из ситуации (ПА)	0	24	8,36	5,08	0,38	-0,16
Реализм(ПС)	-6	10	2,68	3,50	-0,27	0,03
Идеализм (ПС)	-10	10	1,11	3,69	-0,09	0,25
Фетишизм (ПС)	-10	8	-1,07	3,94	-0,09	-0,49
Цинизм (ПС)	-10	8	-0,86	3,71	-0,06	-0,30
Скепцитизм (ПС)	-10	10	-0,52	3,75	-0,19	-0,09
Нигилизм (ПС)	-10	9	-1,03	4,26	0,07	-0,43

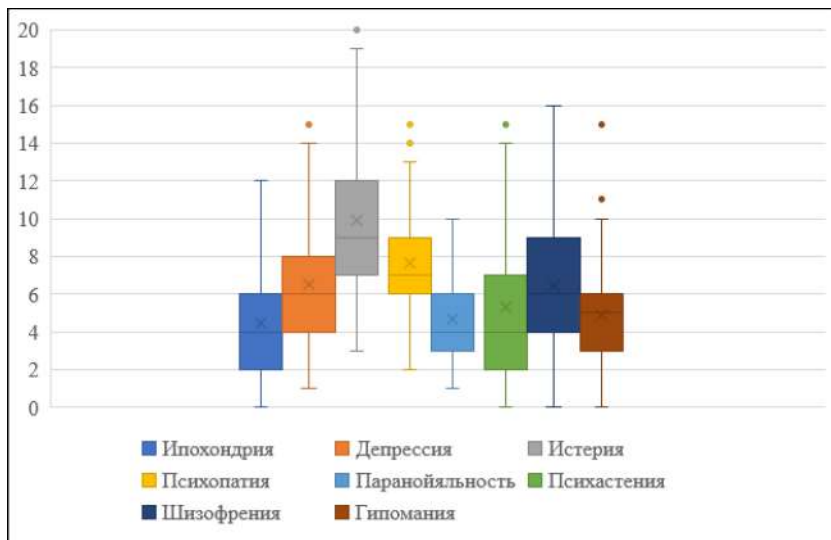


Рис. 1. Распределение испытуемых по шкалам методики «Сокращенный многофакторный опросник для исследования личности»

Fig. 1. Distribution of participants across the scales of the “Abbreviated Multifactor Personality Questionnaire”

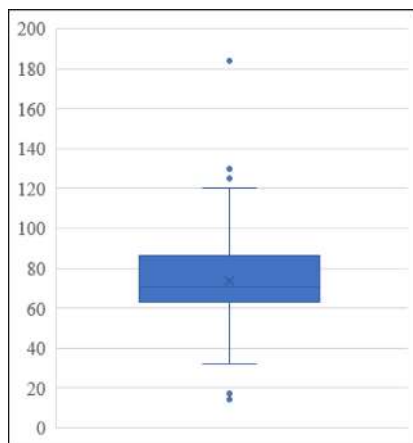


Рис. 2. Распределение испытуемых по результатам методики «Миссисиппская шкала посттравматического стрессового расстройства»

Fig. 2. Distribution of participants based on the results of the “Mississippi Post-Traumatic Stress Disorder Scale”

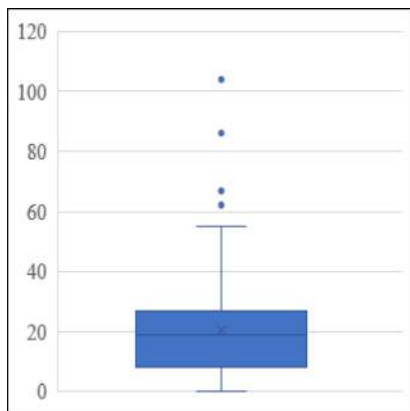


Рис. 3. Распределение испытуемых по результатам методики «Тест нервно-психической адаптации»

Fig. 3. Distribution of test subjects based on the results of the “Neuropsychological Adaptation Test”

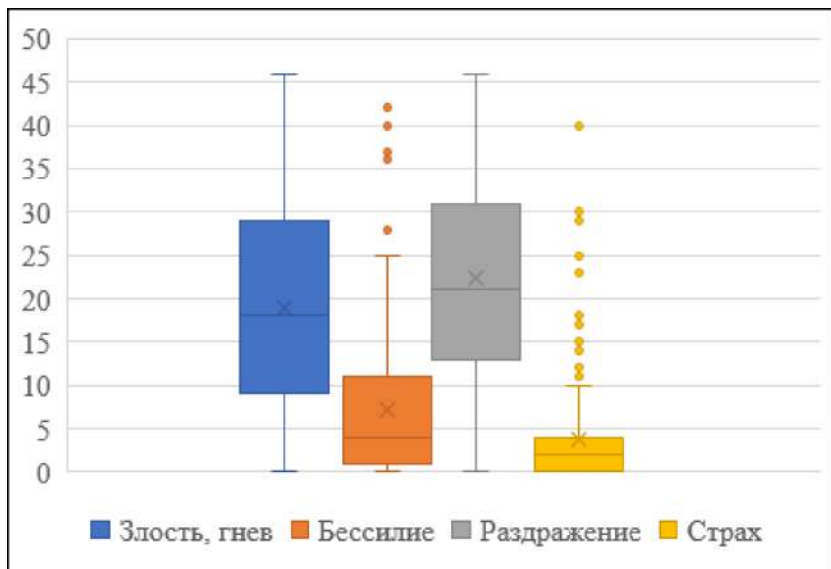


Рис. 4. Распределение испытуемых по результатам методики «Шкала провокации агрессии» (Интенсивность эмоций)

Fig. 4. Distribution of participants based on the results of the “Aggression Provocation Scale” (Emotional Intensity)

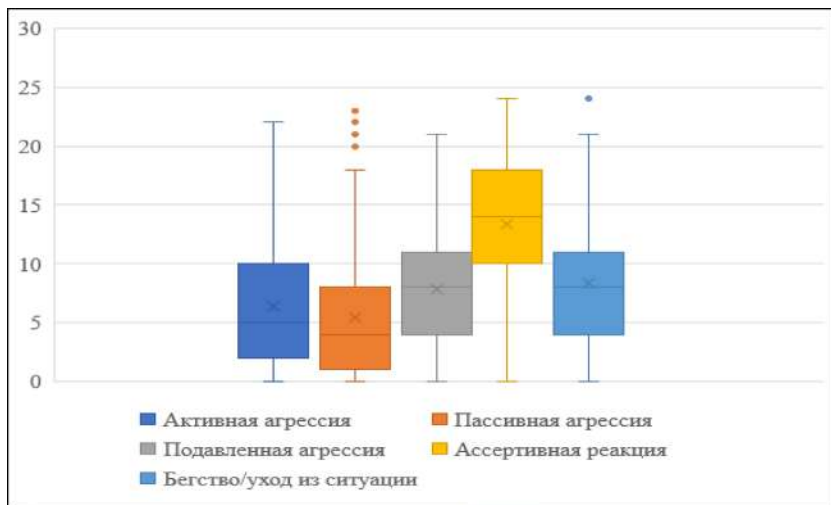


Рис. 5. Распределение испытуемых по результатам методики «Шкала провокации агрессии» (Форма реагирования)

Fig. 5. Distribution of participants based on the results of the "Aggression Provocation Scale" (Reaction Form)

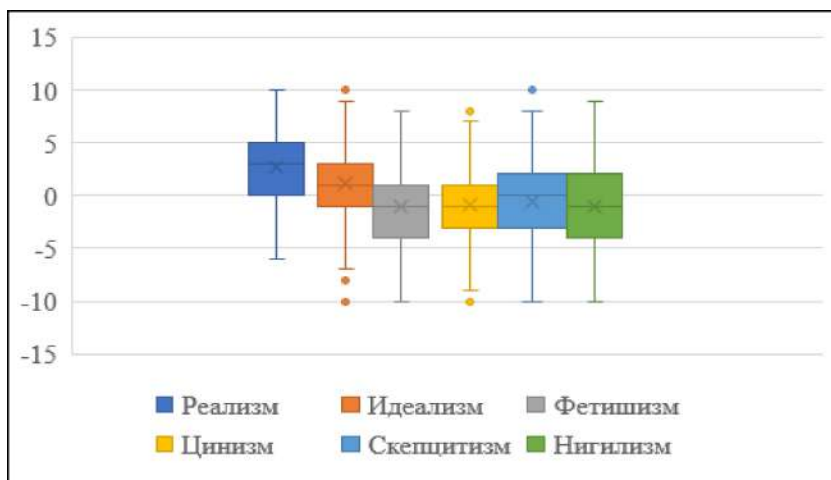


Рис. 6. Распределение испытуемых по результатам методики «Диагностика особенностей правового сознания»

Fig. 6. Distribution of participants based on the results of the "Diagnosis of Characteristics of Legal Consciousness" assessment

Анализ полученных эмпирическим путем данных, представленных в таблице и на 6-и рисунках, позволяет составить развернутую характеристику выборки по степени выраженности исследуемых психологических феноменов.

Согласно описательным статистикам, по опроснику СМОЛ, который измеряет базисные личностные черты, средние значения по всем клиническим шкалам находятся в диапазоне от 4,47 до 9,87 при максимально возможных баллах до 20. Наиболее выраженными оказались шкалы истерии (среднее 9,87, SD=3,51), психопатии (7,66, SD=2,77), депрессии (6,49, SD=2,94) и шизофрении (6,46, SD=3,89). Стандартные отклонения показывают значительный разброс индивидуальных значений, что свидетельствует о неоднородности выборки: наряду с относительно адаптированными лицами присутствуют испытуемые с выраженными личностными нарушениями.

По Миссисипской шкале ПТСР средний балл составил 74,02 (SD=21,12) при максимуме 175, что в целом соответствует нижней границе «хорошего уровня адаптации», однако высокое стандартное отклонение говорит о существенной вариативности – часть испытуемых демонстрирует клинически значимые признаки посттравматического стрессового расстройства.

Средний балл по тесту нервно-психической адаптации равен 20,26 (SD=16,22), что находится точно на границе между полным психическим здоровьем (до 20 баллов) и ограниченным психическим здоровьем (21-30 баллов), при этом эксцесс 4,84 указывает на наличие значительного числа выбросов в сторону высоких значений, то есть у многих испытуемых диагностируются пограничные состояния и выраженная психическая патология.

Анализ шкалы провокации агрессии показывает, что среди эмоций наиболее интенсивно в ответ на фрустрирующие ситуации проявляются раздражение (M=22,31, SD=11,77) и злость/гнев (M=18,92, SD=11,77), тогда как страх (M=3,81, SD=6,21) и бессилие (M=7,14, SD=8,40) выражены значительно слабее. Среди форм поведенческого реагирования ведущей является ассертивная реакция (M=13,34, SD=5,73) – способность отстаивать свои границы без агрессии, однако также заметно присутствие пассивной агрессии (M=5,38, SD=5,56) и подавленной агрессии (M=7,87, SD=5,10), а также тенденция к бегству/уходу из ситуации (M=8,36, SD=5,08).

Правовое сознание характеризуется в целом умеренными показателями: наиболее высокие средние баллы получены по шкалам реализма (M=2,68, SD=3,50) и идеализма (M=1,11, SD=3,69), тогда как негативные виды – цинизм (M=-0,86, SD=3,71), скептицизм (M=-0,52, SD=3,75) и нигилизм (M=-1,03, SD=4,26) – имеют отрицательные значения, что указывает на слабое согласие с утверждениями, их характеризующими. Тем не

менее, широкий разброс и наличие как положительных, так и отрицательных экстремумов свидетельствуют о поляризации выборки по правосознанию.

Для оценки распространённости психических нарушений и признаков ПТСР был проведён частотный анализ.

По тесту нервно-психической адаптации распределение испытуемых оказалось следующим: полное психическое здоровье (до 20 баллов) выявлено у 43,7% выборки. Ограниченное психическое здоровье (21-30 баллов, предпатология) диагностировано у 22,2%. Вероятность пограничной психической патологии, невротизация (31-40 баллов) отмечена у 18,6%. Выраженная психическая патология (более 40 баллов) обнаружена у 15,5% испытуемых. Таким образом, более трети выборки (34,1%) имеют признаки пограничных или выраженных психических расстройств, что существенно превышает популяционные показатели и связано, вероятно, с сочетанным влиянием боевого опыта, пенитенциарного стресса и хронической интоксикации психоактивными веществами.

По Миссисипской шкале ПТСР нормативный уровень адаптации (35-96 баллов) зафиксирован у 68,9% участников. Нарушение адаптации с отдельными симптомами ПТСР (97-111 баллов) наблюдается у 18,0% выборки. Наконец, клинически выраженное посттравматическое стрессовое расстройство (112 баллов и более) диагностировано у 13,1% испытуемых. Важно подчеркнуть, что у лиц, имеющих одновременно высокие баллы по шкале ПТСР и выраженную психическую патологию по тесту адаптации (а таких около 10% от общего числа), клиническая картина, вероятно, отличается большей тяжестью. Особенности агрессивных проявлений у данной категории состоят в том, что при сохранном потенциале к асертивному (конструктивному) реагированию (средний балл 13,34 из 24) ярко выражены эмоциональные компоненты раздражения и злости, которые, однако, не всегда переходят в активную агрессию (средний балл по активной агрессии лишь 6,32 из 22). Преобладают пассивные и подавленные формы агрессии, а также стратегия ухода от конфликта. Это может свидетельствовать о сформированном механизме «замороженной» агрессии, характерном для хронической травматизации и длительного нахождения в стрессогенной среде, где прямое выражение гнева было наказуемо. Кроме того, низкий уровень страха (среднее 3,81 из 48) при относительно высоком бессилии (7,14) указывает на эмоциональное истощение и снижение чувствительности к угрозам, что типично для ПТСР с доминирующим симптомом эмоционального оцепенения.

Для установления взаимосвязи между исследуемыми переменными был применен корреляционный анализ Спирмена. Корреляционный анализ позволил выявить широкий спектр значимых взаимосвязей (при $p < 0,01$), которые можно интерпретировать в контексте коморбидности посттравматического стрессового расстройства и аддиктивного поведения. Наиболее сильные корреляции обнаружены внутри опросника СМОЛ: так, шкала психастении практически линейно связана со шкалой шизофрении ($r=0,79$). Это означает, что тревожно-мнительные черты, нерешительность, навязчивые сомнения у обследованных лиц неразрывно сопровождаются эмоциональной холодностью, аутизацией и своеобразием восприятия, что в целом формирует профиль, характерный для эндогенных расстройств шизофренического спектра. Высокая корреляция психопатии с шизофренией ($r=0,675$) и психастенией ($r=0,531$) указывает на сочетание социальной дезадаптации, импульсивности, пренебрежения нормами с тревожностью и отгороженностью. Это типичный паттерн для лиц с длительной наркотической зависимостью, у которых на фоне ПТСР происходит декомпенсация личности по сложному, неврозоподобно-психопатоподобному типу. Шкала депрессии высоко коррелирует с истерией ($r=0,529$), с психопатией ($r=0,546$), с психастенией ($r=0,585$), что свидетельствует о подавленной, соматизированной депрессии с тенденцией к уходу в болезнь и демонстративным поведением, что нередко маскирует истинную глубину аффективного расстройства и повышает суицидальный риск.

Особый интерес представляют корреляции Миссисипской шкалы ПТСР с другими показателями. ПТСР умеренно, но достоверно коррелирует со шкалами СМОЛ: ипохондрией ($r=0,418$), депрессией ($r=0,371$), психопатией ($r=0,342$), шизофренией ($r=0,377$) и гипоманией ($r=0,326$). Это подтверждают известные в литературе данные о том, что ПТСР редко встречается изолированно и почти всегда сопровождается коморбидными расстройствами – глубокая депрессия, тревожные расстройства, расстройства личности. Для выборки лиц с зависимостью от ПАВ характерно усиление этих связей за счёт токсического воздействия на центральную нервную систему, что приводит к полиморфной психопатологической симптоматике. Высокая корреляция ПТСР с нервно-психической адаптацией ($r=0,466$) логична: чем тяжелее травматический стресс, тем ниже общий уровень психического здоровья. Однако обращает на себя внимание, что эта связь не является абсолютной ($r < 0,5$), что говорит о влиянии дополнительных факторов – например, копинг-стратегий, социальной поддержки или индивидуальной резистентности. Анализ корреляций ПТСР

со шкалами агрессии показывает значимые, но не очень сильные связи: с активной агрессией ($r=0,218$), злостью/гневом ($r=0,268$), раздражением ($r=0,221$) и страхом ($r=0,172$). Это может интерпретироваться как «притупление» эмоциональных реакций у участников боевых действий с ПТСР, особенно на фоне длительного употребления ПАВ, которое само по себе снижает способность к дифференцированному эмоциональному реагированию. В то же время пассивная и подавленная агрессия не показывают значимой корреляции с ПТСР, что указывает на то, что посттравматическая симптоматика связана, скорее, с импульсивным отреагированием, нежели с накопительными формами враждебности.

Наиболее сильные корреляции в блоке агрессии наблюдаются между эмоциями и формами поведения. Так, злость/гнев сильно связана с раздражением ($r=0,79$) и активной агрессией ($r=0,65$) и слабо – со страхом ($r=0,387$). Это подтверждает единство аффективного компонента агрессии: раздражение выступает как менее интенсивная форма гнева, а страх в данной выборке парадоксальным образом не тормозит, а, скорее, запускает агрессивные реакции – феномен «агрессии, спровоцированной угрозой», часто описываемый у лиц с ПТСР и аддикциями. Бессилие сильно коррелирует со страхом ($r=0,657$) и пассивной агрессией ($r=0,513$), что отражает выученную беспомощность: человек, ощущая себя бессильным, не переходит к активным действиям, а застревает в страхе и внешне пассивном, но внутренне враждебном реагировании. Подавленная агрессия теснее всего связана с пассивной агрессией ($r=0,619$) и бегством/уходом ($r=0,632$), образуя единый кластер избегающего и ингибированного поведения. Ассертивная реакция, напротив, имеет положительную, но слабую связь с бегством ($r=0,217$) и практически не связана с негативными эмоциями, что подчёркивает её конструктивный адаптивный характер. Однако важно, что ассертивность отрицательно коррелирует с цинизмом и нигилизмом, то есть лица с деформированным правосознанием менее способны к уважительному отстаиванию своих границ.

Корреляции правового сознания заслуживают отдельного внимания в контексте ПТСР и аддикции. Реализм демонстрирует значимые отрицательные связи с депрессией ($r=-0,195$), психопатией ($r=-0,170$), активной агрессией ($r=-0,248$), цинизмом ($r=-0,238$) и нигилизмом ($r=-0,297$). Это можно интерпретировать следующим образом: чем более человек погружён в депрессивные переживания, склонен к асоциальному поведению и агрессии, тем менее он способен к реалистичному, дифференцированному отношению к праву. Реализм, напротив, положительно коррелирует с

идеализмом ($r=0,367$), что ожидаемо – оба эти типа относятся к позитивным формам правосознания, хотя идеализм связан с завышенными ожиданиями от права. Идеализм также отрицательно коррелирует с истерией ($r=-0,228$) – возможно, лица с демонстративными чертами менее склонны к идеализации правовых институтов. Цинизм и нигилизм очень сильно коррелируют между собой ($r=0,568$), а также умеренно – со скептицизмом ($r=0,513$ и $r=0,441$ соответственно). Образуется «негативный кластер» правосознания, для которого характерно недоверие к закону, обесценивание его роли и склонность к противоправному поведению. Важно, что цинизм и нигилизм положительно коррелируют с психопатией ($r=0,282$ и $r=0,253$), гипоманией ($r=0,282$ и $r=0,253$), паранойальностью ($r=0,263$ и $r=0,215$), а также с фетишизмом ($r=0,294$ и $r=0,229$). Таким образом, деформация правосознания у обследованных лиц напрямую связана с личностными расстройствами возбудимого, параноидного и шизоидного круга, а также с маниакальной симптоматикой, что создаёт почву для повторных правонарушений и затрудняет ресоциализацию. Скептицизм, хоть и входит в негативный кластер, имеет более слабые связи с делинквентными чертами и положительно коррелирует с паранойальностью ($r=0,178$) и нигилизмом ($r=0,441$), что может отражать пассивное, равнодушное отношение к праву без активного противопоставления. Наконец, фетишизм – наделение правовой системы магическими свойствами – положительно коррелирует как с позитивными видами (реализм $r=0,185$, идеализм $r=0,213$), так и с негативными (цинизм $r=0,294$, нигилизм $r=0,229$), что указывает на его двойственную природу: в одних случаях это наивное доверие к закону, в других – ригидная, почти фанатичная вера в карательную мощь государства, сочетающаяся с циничным отношением к отдельным нормам.

В целом, корреляционная структура подтверждает, что у участников боевых действий с зависимостью от ПАВ посттравматический стресс тесно переплетён с широким спектром личностной патологии, дезадаптивными формами агрессии и деформациями правосознания, что требует комплексного психокоррекционного и фармакологического подхода к дальнейшей социальной реабилитации и ресоциализации.

На основе выполненного статистического анализа можно выделить пять ключевых закономерностей общей уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у данной категории испытуемых.

1. Эмоционально-регуляторный дефицит: «замороженная агрессия» и бессилие. Высокие показатели раздражения и злости при низких показателях страха, сочетающиеся с пассивной и подавленной агрессией (а не

активной), указывают на неспособность к конструктивному отреагированию фрустрации. Накопленный гнев не находит выхода в асертивных реакциях, а трансформируется в бессилие и пассивное избегание. Этот механизм усиливает риск как злоупотребления ПАВ (для временного снятия напряжения), так и хронификации ПТСР (поскольку подавление эмоций является ядром интрузивно-избегающего паттерна).

2. Коморбидный личностный профиль «тревожно-шизоидного спектра». Высокая корреляция между психастенией (тревога, сомнения) и шизофренией (аутизация, эмоциональная холодность) формирует уязвимость к двум типам расстройств. Тревожность облегчает развитие интрузий и гипервозбуждения при ПТСР, а шизоидные черты – социальную изоляцию, которая снижает защитные ресурсы и способствует переходу к употреблению ПАВ как суррогатному способу совладания

3. Импульсивность и нарушение поведенческого контроля (психопатия–гипомания). Значимые корреляции ПТСР с психопатией и гипоманией указывают на то, что у части испытуемых посттравматическая симптоматика реализуется через импульсивные, социально дезадаптивные действия. Повышенная активность, поверхностность эмоций и пренебрежение нормами облегчают переход от стрессового переживания к аддиктивному поведению (например, поиску острых ощущений, употреблению психоактивных веществ как «самолечению» гипомании). Одновременно это же повышает риск повторной травматизации и криминальных рецидивов.

4. Деформация правосознания как когнитивно-ценностная основа уязвимости. Выраженная отрицательная связь реализма с цинизмом и нигилизмом, а также сильная положительная связь цинизма и нигилизма с психопатией, гипоманией и паранойальностью показывают: чем более искажено отношение к закону (убеждение в несправедливости, бессмысленности права), тем меньше поведенческих барьеров для употребления ПАВ и тем слабее мотивация к лечению. Цинично-нигилистические установки выступают в роли «нейтрализации» морального запрета на употребление ПАВ и одновременно усугубляют посттравматическое избегание обращения за помощью.

5. Низкий адаптационный резерв и соматизация дистресса. Высокая корреляция ПТСР с нервно-психической дезадаптацией и ипохондрией отражает истощение физиологических и психологических ресурсов. Неспособность поддерживать психическое равновесие даже в обычных условиях приводит к тому, что травматический стресс запускает быстрое соматическое истощение и формирование зависимого поведения как примитивной

формы саморегуляции (через наркотики, стимуляторы или алкоголь). Хроническая интоксикация, в свою очередь, разрушает адаптационные ресурсы.

Таким образом, закономерности уязвимости носят системный характер: эмоциональная дисрегуляция сочетается с личностной аномалией (тревожно-шизоидный профиль), импульсивно-психопатическими чертами, искажениями правового сознания и общим истощением адаптационного потенциала. Эти данные могут служить основой для разработки психокоррекционных и реабилитационных программ для данной сложной категории лиц.

Заключение

В процессе изучения общей уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у осуждённых – участников СВО, состоящих на учете у нарколога, у испытуемых были выявлены пять ключевых закономерностей, трудно совместимых со здоровьесберегающим и социально безопасным поведением: а) эмоционально-регуляторный дефицит, или «замороженная агрессия» и бессилие; б) коморбидный личностный профиль «тревожно-шизоидного спектра»; в) импульсивность и нарушение поведенческого контроля (психопатия–гипомания); д) деформация правосознания как когнитивно-ценностная основа уязвимости; е) низкий адаптационный резерв и соматизация дистресса.

Выявленные закономерности носят системный характер: у осуждённых – участников СВО, состоящих на учете у нарколога, эмоциональная дисрегуляция сочетается с личностными аномалиями (личностный профиль испытуемых определяется как «тревожно-шизоидный»), импульсивно-психопатическими чертами, деформированным правосознанием и общим истощением адаптационного потенциала.

Эти данные имеют не только научную новизну, но и обладают практическим потенциалом, поскольку могут составить основу программы медико-психологического сопровождения лиц с двойной травматизацией и алкогольной зависимостью в отечественной пенитенциарной системе. В ее основу может быть положена идея замещения деструктивных поведенческих паттернов на конструктивно-адаптивные и социально приемлемые способы реагирования. Как нам представляется, эта программа должна носить модульный характер (то есть моделироваться в соответствии с пятью выявленными закономерностями) и в итоге обуславливать у ее участников снижение частоты и интенсивности импульсивного агрессивного реагирования путем развития навыков самонаблюдения, саморегуляции,

когнитивного анализа ситуаций, переориентацию боевой идентичности в гражданский контекст.

Заключение комитета по этике. Исследование было проведено в соответствии с принципами положения Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board), а также Этическим кодексом психолога Российского психологического общества.

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Описание применения генеративной модели. Во время подготовки статьи использовалась языковая модель (нейросеть) DeepSeek-V4 (<https://www.deepseek.com>). На основе таблицы исходных данных эмпирического исследования нейросетью был проведен частотный анализ и корреляционный анализ, а также выполнено описание выявленных взаимосвязей. Данные, представленные нейросетью, были соотнесены с расчетами, выполненными с помощью статистической программы SPSS. После использования нейросети тест был пересмотрен и стилистически отредактирован. Авторы берут на себя полную ответственность за содержание опубликованной статьи.

Список литературы

1. Баширзаде, К. А., & Наров, М. Ю. (2025). История изучения боевой психической травмы (обзор литературы). *Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии*, 12. <https://doi.org/10.33920/med-01-2512-04>. EDN: <https://elibrary.ru/NAATSB>
2. Искандаров, Р. Р. (2025). Посттравматическое стрессовое расстройство у комбатантов в местах лишения свободы. *Уголовно-исполнительная система: право, экономика, управление*, 4, 29–31. <https://doi.org/10.18572/2072-4438-2025-4-29-31>. EDN: <https://elibrary.ru/ZNXVSA>
3. Катаев, Д. В. (2025). Проблемные вопросы ресоциализации бывших осуждённых — участников специальной военной операции. *Caucasian Science Bridge*, 8(1), 51–60. <https://doi.org/10.18522/2658-5820.2025.1.5>. EDN: <https://elibrary.ru/XJWAKC>
4. Миненко, К. О., & Миненко, А. О. (2023). Система мер ресоциализации, социальной адаптации и социальной реабилитации помилованных участников

- специальной военной операции. *Философия права*, 3, 125–134. EDN: <https://elibrary.ru/MXYLHB>
5. Никишина, В. Б., Петраш, Е. А., & Юнина-Пакулова, Н. Ю. (2025). Мотивационная структура временной перспективы участников боевых действий. *Национальный психологический журнал*, 20(2), 67–79. <https://doi.org/10.11621/npj.2025.0205>. EDN: <https://elibrary.ru/FIBKNJ>
 6. Резник, А. М., Рябина, Д. А., Зоркина, Я. А. (2025). *Методические рекомендации для комплексной диагностики психических расстройств, связанных с травмирующим стрессом*. ГБУЗ «ПКБ № 1 ДЗМ». <https://niiroz.ru/upload/iblock/62f/nxwkgzj69md33lham2bbshp97uv6szmt/Методические%20рекомендации%20для%20комплексной%20диагностики%20психических%20расстройств,%20связанных%20с%20травмирующим%20стрессом.pdf>. ISBN: 978-5-00258-861-9. EDN: <https://elibrary.ru/XOOZHU>
 7. Рябина, Д. А., Зоркина, Я. А., Резник, А. М., Очнева, А. Г., Закуражная, В. И., Цурина, А. М., Чернов, А. С., Левин, А. М., Дмитриев, А. С., Дмитриева, С. А., Козырева, А. В., Каленкович, А. В., Егорова, А. В., Кучеренко, О. В., Костюк, Г. П., & Морозова, А. Ю. (2025). Анализ проблем диагностики боевого посттравматического стрессового расстройства в психиатрическом стационаре. *Психиатрия*, 23(2), 19–31. <https://doi.org/10.30629/2618-6667-2025-23-2-19-31>. EDN: <https://elibrary.ru/CGGVWZ>
 8. Семелёва, Е. В., Селезнева, Н. М., & Плигина, Е. В. (2026). Ресоциализация бывших заключённых, вернувшихся с СВО. *Международный научно-исследовательский журнал*, 1. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.28>. EDN: <https://elibrary.ru/HEDKMV>
 9. Сукиасян, С. Г. (2009). О некоторых аспектах динамики посттравматических стрессовых расстройств у участников боевых действий. *Социальная и клиническая психиатрия*, 19(1), 12–18. EDN: <https://elibrary.ru/KDYETJ>
 10. Back, S. E., Jarnecke, A. M., Norman, S. B., Zaur, A. J., & Hien, D. A. (2024). State of the science: Treatment of comorbid posttraumatic stress disorder and substance use disorders. *Journal of Traumatic Stress*, 37, 803–813. <https://doi.org/10.1002/jts.23049>. EDN: <https://elibrary.ru/ITCURH>
 11. Boiko, D. I., Mats, O. V., Martnenko, Y. P., Oliinyk, O. G., Chernov, A. A., Herasymenko, L. O., & Zhyvotovska, L. V. (2026). Depressive and anxiety signs in combatants with stress-related mental disorders. *Azerbaijan Medical Journal*, 1, 34–41. <https://doi.org/10.34921/amj.2026.1.006>. EDN: <https://elibrary.ru/QLXFGO>
 12. Brady, K. T., Dansky, B. S., Sonne, S. C., & Saladin, M. E. (1998). Posttraumatic stress disorder and cocaine dependence: Order of onset. *American Journal on Addictions*, 7(2), 128–135. <https://doi.org/10.1111/j.1521-0391.1998.tb00327.x>

13. Bremner, J. D., Southwick, S. M., Darnell, A., & Charney, D. S. (1996). Chronic PTSD in Vietnam combat veterans: Course of illness and substance abuse. *American Journal of Psychiatry*, 153(3), 369–375. <https://doi.org/10.1176/ajp.153.3.369>. EDN: <https://elibrary.ru/HETJLJ>
14. Maria-Rios, C. E., & Morrow, J. D. (2020). Mechanisms of shared vulnerability to post-traumatic stress disorder and substance use disorders. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2020.00006>. EDN: <https://elibrary.ru/TQHEIB>
15. Najavits, L. M., Clark, H. W., & DiClemente, C. C. (2020). PTSD/Substance use disorder comorbidity: Treatment options and public health needs. *Current Treatment Options in Psychiatry*, 544–558. <https://doi.org/10.1007/s40501-020-00234-8>. EDN: <https://elibrary.ru/SCIRVG>
16. Protsenko, B. (2025). The relationship between substance abuse and post-traumatic stress disorder in combatants. *Technologies of Intellect Development*, 9(2). <https://doi.org/10.31108/3.2025.9.2.10>. EDN: <https://elibrary.ru/SJOWBI>
17. Salihu, M. J., Makanjuola, A. B., Sulyman, D., et al. (2026). Socio-demographic and occupational factors associated with psychiatric morbidity among Nigerian army personnel. *Discover Psychology*, 6, 59. <https://doi.org/10.1007/s44202-026-00604-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FCDVAE>
18. Shuliakova, M. (2026). Phenomenological structure of mental disorders in combatants. *Psychosomatic Medicine and General Practice*, 11(1). <https://doi.org/10.26766/pmgp.v11i1.714>. EDN: <https://elibrary.ru/AYZFDL>

References

1. Bashirzade, K. A., & Narov, M. Y. (2025). The history of studying combat-related psychological trauma (literature review). *Journal of Neurology, Psychiatry, and Neurosurgery*, 12. <https://doi.org/10.33920/med-01-2512-04>. EDN: <https://elibrary.ru/NAATSB>
2. Iskandarov, R. R. (2025). Post-traumatic stress disorder in combatants in correctional facilities. *Penal System: Law, Economics, Management*, 4, 29–31. <https://doi.org/10.18572/2072-4438-2025-4-29-31>. EDN: <https://elibrary.ru/ZNXVSA>
3. Kataev, D. V. (2025). Problematic issues of re-socialization of former convicts who participated in the special military operation. *Caucasian Science Bridge*, 8(1), 51–60. <https://doi.org/10.18522/2658-5820.2025.1.5>. EDN: <https://elibrary.ru/XJWAKC>
4. Minenko, K. O., & Minenko, A. O. (2023). A system of measures for re-socialization, social adaptation, and social rehabilitation of pardoned participants in the special military operation. *Philosophy of Law*, 3, 125–134. EDN: <https://elibrary.ru/MXYLHB>

5. Nikishina, V. B., Petrash, E. A., & Yunina-Pakulova, N. Y. (2025). Motivational structure of the time perspective among combatants. *National Psychological Journal*, 20(2), 67–79. <https://doi.org/10.11621/npj.2025.0205>. EDN: <https://elibrary.ru/FIBKNJ>
6. Reznik, A. M., Ryabinina, D. A., Zorkina, Y. A. (2025). *Guidelines for the comprehensive diagnosis of mental disorders associated with traumatic stress*. City Clinical Psychiatric Hospital No. 1, Moscow Healthcare Department. <https://niioz.ru/upload/iblock/62f/nxwkgzj69md33lham2bbshp97uv6szmt/Методические%20рекомендации%20для%20комплексной%20диагностики%20психических%20расстройств,%20связанных%20с%20травмирующим%20стрессом.pdf>. ISBN: 978-5-00258-861-9. EDN: <https://elibrary.ru/XOOZHU>
7. Ryabinina, D. A., Zorkina, Y. A., Reznik, A. M., Ochneva, A. G., Zakurazhnaya, V. I., Tsurina, A. M., Chernov, A. S., Levin, A. M., Dmitriev, A. S., Dmitrieva, S. A., Kozyreva, A. V., Kalenkovich, A. V., Egorova, A. V., Kucherenko, O. V., Kostyuk, G. P., & Morozova, A. Y. (2025). Analysis of the challenges in diagnosing combat-related post-traumatic stress disorder in a psychiatric hospital. *Psychiatry*, 23(2), 19–31. <https://doi.org/10.30629/2618-6667-2025-23-2-19-31>. EDN: <https://elibrary.ru/CGGVWZ>
8. Semelyova, E. V., Selezneva, N. M., & Pligina, E. V. (2026). Re-socialization of former prisoners who returned from the special military operation. *International Research Journal*, 1. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.28>. EDN: <https://elibrary.ru/HEDKMV>
9. Sukiasyan, S. G. (2009). On some aspects of the dynamics of post-traumatic stress disorders among combatants. *Social and Clinical Psychiatry*, 19(1), 12–18. EDN: <https://elibrary.ru/KDYETJ>
10. Back, S. E., Jarnecke, A. M., Norman, S. B., Zaur, A. J., & Hien, D. A. (2024). State of the science: Treatment of comorbid posttraumatic stress disorder and substance use disorders. *Journal of Traumatic Stress*, 37, 803–813. <https://doi.org/10.1002/jts.23049>. EDN: <https://elibrary.ru/ITCURH>
11. Boiko, D. I., Mats, O. V., Martnenko, Y. P., Oliinyk, O. G., Chernov, A. A., Herasy-menko, L. O., & Zhyvotovska, L. V. (2026). Depressive and anxiety signs in combatants with stress-related mental disorders. *Azerbaijan Medical Journal*, 1, 34–41. <https://doi.org/10.34921/amj.2026.1.006>. EDN: <https://elibrary.ru/QLXFGO>
12. Brady, K. T., Dansky, B. S., Sonne, S. C., & Saladin, M. E. (1998). Posttraumatic stress disorder and cocaine dependence: Order of onset. *American Journal on Addictions*, 7(2), 128–135. <https://doi.org/10.1111/j.1521-0391.1998.tb00327.x>
13. Bremner, J. D., Southwick, S. M., Darnell, A., & Charney, D. S. (1996). Chronic PTSD in Vietnam combat veterans: Course of illness and substance abuse. *Ameri-*

- can Journal of Psychiatry*, 153(3), 369–375. <https://doi.org/10.1176/ajp.153.3.369>. EDN: <https://elibrary.ru/HETJLJ>
14. Maria-Rios, C. E., & Morrow, J. D. (2020). Mechanisms of shared vulnerability to post-traumatic stress disorder and substance use disorders. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2020.00006>. EDN: <https://elibrary.ru/TQHEIB>
15. Najavits, L. M., Clark, H. W., & DiClemente, C. C. (2020). PTSD/Substance use disorder comorbidity: Treatment options and public health needs. *Current Treatment Options in Psychiatry*, 544–558. <https://doi.org/10.1007/s40501-020-00234-8>. EDN: <https://elibrary.ru/SCIRVG>
16. Protsenko, B. (2025). The relationship between substance abuse and post-traumatic stress disorder in combatants. *Technologies of Intellect Development*, 9(2). <https://doi.org/10.31108/3.2025.9.2.10>. EDN: <https://elibrary.ru/SJOWBI>
17. Salihu, M. J., Makanjuola, A. B., Sulyman, D., et al. (2026). Socio-demographic and occupational factors associated with psychiatric morbidity among Nigerian army personnel. *Discover Psychology*, 6, 59. <https://doi.org/10.1007/s44202-026-00604-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FCDVAE>
18. Shuliakova, M. (2026). Phenomenological structure of mental disorders in combatants. *Psychosomatic Medicine and General Practice*, 11(1). <https://doi.org/10.26766/pmgp.v11i1.714>. EDN: <https://elibrary.ru/AYZFDL>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Цветкова Надежда Александровна, доктор психологических наук, доцент, главный научный сотрудник; профессор кафедры социальной и педагогической психологии

Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний»; Государственный университет просвещения

ул. Житная, 14, г. Москва, 119991, Российская Федерация; ул. Радио, 10А, стр. 2, г. Москва, 105005, Российская Федерация
TsvetkovaNA@yandex.ru

Кисляков Павел Александрович, доктор психологических наук, профессор, профессор кафедры психологии, конфликтологии и бихевиористики; профессор кафедры русистики, этно-ориентированной педагогики и цифровой дидактики; главный научный сотрудник

Российский государственный социальный университет; Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы; Федеральное ка-

зенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний»

ул. В. Пика, 4, стр. 1, г. Москва, 129226, Российская Федерация; ул. Миклухо-Маклая, 6, г. Москва, 117198, Российская Федерация; ул. Житная, 14, г. Москва, 119991, Российская Федерация
kisliakovpav@yandex.ru

Лаввилава Кира Евгеньевна, кандидат психологических наук, доцент кафедры психологии и сопровождения развития ребёнка

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Псковский государственный университет»
пл. Ленина, 2, г. Псков, 180000, Российская Федерация
lagvilava@pskgu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda A. Tsvetkova, Dr. Sci. (Psychology), Associate Professor, Chief Scientific Officer; Professor of the Department of Social and Pedagogical Psychology
Federal State Institution “Research Institute of the Federal Penitentiary Service”; State University of Education

14, Zhitnaya Str., Moscow, 119991, Russian Federation; 10A, building 2, Radio Str., Moscow, 105005, Russian Federation

TsvetkovaNA@yandex.ru

SPIN-code: 1681-2189

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0967-205X>

ResearcherID: V-1958-2017

Scopus Author ID: 57190443351

Pavel A. Kislyakov, Dr. Sci. (Psychology), Professor, Professor of the Department of Psychology, Conflictology and Behavioral Sciences; Professor of the Department of Russian Studies, Ethnic-Oriented Pedagogy, and Digital Didactics at the Institute of the Russian Language; Chief Scientific Officer

Russian State Social University; Peoples’ Friendship University of Russia; Research Institute of the Federal Penitentiary Service

4/1, V. Pika Str., Moscow, 129226, Russian Federation; 6, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation; 14, Zhitnaya Str., Moscow, 119991, Russian Federation

kisliakovpav@yandex.ru

SPIN-code: 1375-5625

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1238-9183>

ResearcherID: E-4701-2016

Scopus Author ID: 56348736600

Kira E. Lagvilava, PhD in Psychology, Associate Professor of the Department of Psychology and Child Development Support

Pskov State University

2, Lenin Sq., Pskov, 180000, Russian Federation

lagvilava@pskgu.ru

SPIN-code: 8239-6292

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8142-2779>

ResearcherID: AET-2196-2022

Scopus Author ID: 57201631743

Поступила 20.04.2026

После рецензирования 02.06.2026

Принята 24.06.2026

Received 20.04.2026

Revised 02.06.2026

Accepted 24.06.2026

Общественное здоровье, организация и социология здравоохранения, медико-социальная экспертиза / Public Health, Health Organization, Sociology of Health, Medical and Social Expertise

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1522](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1522)EDN: [PXWYPD](https://www.edn.ru/entry/PXWYPD)

УДК 159.923.33



Особенности социальной адаптации и поведенческих реакций у подростков, страдающих акне

П.И. Тихоненко¹, Л.Е. Дерягина², Н.С. Цикунова³, А.О. Пятибрат⁴¹Детская городская клиническая больница №5 им. Н.Ф. Филатова,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Московский университет Министерства внутренних дел Российской
Федерации имени В.Я. Кикотя, Москва, Российская Федерация³НГУ им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург, Российская Федерация⁴Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский
университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Акне оказывает значительное влияние на психоэмоциональный статус подростков. Восприимчивость к реакции окружающих в отношении его внешности и беспокойство, связанное с потерей привлекательности приводит к существенному снижению самооценки, уменьшению работоспособности, ухудшению успеваемости, что обуславливает формирование нарушений социальной адаптации. На фоне долго продолжающегося заболевания повышается тревожность, развивается депрессия, дисморфофобия и появляются суицидальные мысли и попытки. Актуальность изучения ментальной сферы больных акне связана прежде всего с необходимостью разработки методов комплексного лечения включая коррекцию психологического статуса.

Цель – определить особенности поведения у подростков, страдающих угревой болезнью.

Материалы и методы. Проведен анализ особенностей поведенческих реакций, моделей и копинг-стратегий, используемых в стрессовой ситуации и конфликте у 294 подростков, из них у 149 определялась угревая болезнь, а 145 составили группу контроля.

Результаты. Результаты анализа экспертных оценок и данных психодиагностических методик свидетельствуют, что поведение большинства мальчиков, страдающих угревой болезнью, характеризуется агрессивностью, несдержанностью и вспыльчивостью, а девочки с акне в большинстве демонстрируют лицемерную безропотность и покорность. Подавляющее большинство подростков с угревой болезнью демонстрировали сложности с обучением, дисциплиной и построением отношений с одноклассниками. Выявленные особенности поведенческих реакций существенно влияют на успешность социальной адаптации подростков, что требует повышенного внимания со стороны педагогов и штатных психологов.

Ключевые слова: угревая болезнь; акне; копинг-стратегии; конфликтология; волевые качества; подростки; школьники; социальная адаптация

Для цитирования. Тихоненко, П. И., Дерягина, Л. Е., Цикунова, Н. С., & Пятитбрат, А. О. (2026). Особенности социальной адаптации и поведенческих реакций у подростков, страдающих акне. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 393-422. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1522>

Features of social adaptation and behavioral reactions in adolescents suffering from acne

P.I. Tikhonenko¹, L.E. Deryagina², N.S. Tsikunova³, A.O. Pyatibrat⁴

¹N.F. Filatov Children's City Clinical Hospital No. 5,
St. Petersburg, Russian Federation

²Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian
Federation, Moscow, Russian Federation

³Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health,
Saint Petersburg, Russian Federation

⁴St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg,
Russian Federation

Abstract

Background. Acne has a significant impact on the psychoemotional status of adolescents. Susceptibility to the reactions of others regarding his appearance and anxiety associated with the loss of attractiveness leads to a significant decrease in self-esteem, decreased performance, and deterioration in academic performance, which leads to the formation of social adjustment disorders. Against the background of a long-lasting disease, anxiety increases, depression develops, dysmorphic phobia and suicidal thoughts and attempts appear. The relevance of studying the mental sphere of acne patients is primarily related to the need to develop comprehensive treatment methods, including correction of psychological status.

Purpose – to determine the behavioral characteristics of adolescents suffering from acne

Materials and methods. The analysis of the features of behavioral reactions, models and coping strategies used in a stressful situation and conflict in 294 adolescents was carried out, of which 149 had acne, and 145 formed a control group.

Results. The results of the analysis of expert assessments and data from psychodiagnostic techniques indicate that the behavior of the majority of boys suffering from acne is characterized by aggressiveness, incontinence and short temper, and girls with acne in the majority demonstrate hypocritical resignation and submission. The vast majority of teenagers with acne demonstrated difficulties with learning, discipline, and building relationships with classmates. The identified features of behavioral reactions significantly affect the success of social adaptation of adolescents, which requires increased attention from teachers and staff psychologists.

Keywords: acne; acne vulgaris; coping strategies; conflictology; volitional qualities; adolescents; schoolchildren; social adaptation

For citation. Tikhonenko, P. I., Deryagina, L. E., Tsikunova, N. S., & Pyatibrat, A. O. (2026). Features of social adaptation and behavioral reactions in adolescents suffering from acne. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 393-422. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1522>

Введение

Пубертатный период для подростков характеризуется самоопределением, высокой эмоциональностью, лабильностью настроения и повышением интереса к противоположному полу [19]. Этот жизненный этап у подростков сопровождается огромным значением оценки их облика окружающими сверстниками. В этот период подростки проявляют повышенное внимание к своей внешности, дефекты на лице вызывают наиболее тяжелые переживания [10]. Переживания по поводу косметических дефектов негативно влияют на самооценку, часто являются причиной высокой тревожности и приводят к нарушениям социальной адаптации [2; 5; 11]. Длительное эмоциональное напряжение приводит к изменениям постоянных личностных характеристик. Патохарактерологические изменения личности приводят к депрессии, высокой тревоге, могут приводить к суицидальному поведению [4; 22; 29; 31; 33; 39]. Чувство неполноценности, заниженная самооценка приводят к снижению качества жизни [11; 36; 38]. Такие подростки отличаются конфликтностью, часто проявляется раздражительность и агрессивное поведение при общении с родителями. Со временем они теряют веру в выздоровление, что приводит к недоверию врачу и снижению комплаентности [14; 35]. Достаточно часто угревая

болезнь сопровождается дисморфофобией, которая проявляется выраженным стрессом, высокой тревогой по поводу своей внешности, вызывает патологические гормональные реакции, что еще более усугубляет течение угревой болезни [32; 34]. Важно, что патохарактерологические изменения, сформированные за время болезни, не корректируются самостоятельно после излечения и могут сохраняться долгое время и способствовать формированию психопатологического статуса [28; 37].

Цель исследования – определить особенности поведения у подростков, страдающих угревой болезнью.

Материалы и методы

Для оценки взаимосвязи угревой болезни с патохарактерологическими нарушениями поведения, были проанализированы истории болезни и карточки осмотров 294 подростков проходивших лечение на различных отделениях СПб ГБУЗ «Детской городской клинической больницы № 5 им. Н.Ф. Филатова». Из них было 149 подростков с угревой болезнью разной степени тяжести в возрасте от 13 до 17 лет: женского пола 75 подростков и 74 – мужского. Контрольную группу составили 145 практически здоровых подростков (76 девочек и 69 мальчиков). В группу наблюдения включались подростки со стажем акне не менее 2-х лет. Критериями исключения являлись: патология систем кровообращения и дыхания, тяжелые хронические заболевания, болезни системы крови, аутоиммунные заболевания, психиатрическая и неврологическая патология, онкологические болезни, а также из исследования исключались часто болеющие дети (ЧБД). Исследование было проведено в соответствии с принципами положения Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board). Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании. Распределение подростков по возрастным группам представлено в таблице 1.

Таблица 1.

Распределение подростков по возрастным группам

Table 1. Distribution of Adolescents by Age Group

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола	36	38	33	36
Подростки женского пола	34	41	37	39

Данные, представленные в таблице 1, свидетельствуют, что между обследованными подростками с страдающими акне и составившими контрольную группу различия по возрасту и полу по отсутствовали.

Для оценки особенностей поведения подростков страдающих акне в конфликтных ситуациях использовали валидные общепринятые психодиагностические методики:

- опросник «Индекс жизненного стиля (LSI)» Р. Плутчика, Г. Келлермана. Состоит из 97 утверждений. Результаты интерпретируются по 8 шкалам: отрицание, подавление, регрессия, компенсация, проекция, замещение, интеллектуализация и реактивное образование. Опросник предназначен как для взрослых, так и для подростков, позволяет выявлять профиль защитных механизмов обследуемого [7; 13].

- опросник «Стратегия поведения в конфликтной ситуации» К. Томаса в адаптации Н.В. Гришиной. Состоит из 30 пар суждений, из каждой требуется выбрать одно. Результаты интерпретируются по 5 шкалам: противоборство, сотрудничество, компромисс, избегание, уступка. Служит для оценки стратегии поведения в конфликте. Методика рассчитана на подростков и взрослых [1; 6].

- опросник «Волевые качества личности (ВКЛ)» М.В. Чумакова. Состоит из 78 вопросов утверждений. Результаты интерпретируются по шкалам: ответственность, инициативность, решительность, самостоятельность, выдержка, настойчивость, энергичность, внимательность и целеустремленность. Служит для оценки степени развития эмоционально-волевой регуляции поведения. Методика рассчитана на подростков [27].

- опросник «Определение уровня самооценки» С.В. Ковалёва. Состоит из 32 вопросов с 5 вариантами ответов. Результаты интерпретируются по 3 уровням: высокий, средний, низкий. Служит для оценки уровня самооценки личности. Методика рассчитана на подростков [8; 18; 21; 23].

- опросник «Способы совладающего поведения» Р. Лазаруса, С. Фолкмана, адаптированный Крюковой Т.Л. и соавт. Состоит из 50 вопросов. Результаты интерпретируются по 8 субшкалам: конфронтация, дистанцирование, самоконтроль, поиск социальной поддержки, принятие ответственности, бегство-избегание, планирование решения проблемы и положительная переоценка. Служит для оценки копинг-механизмов преодоления стрессовых ситуаций и определения стратегий совладания. Методика рассчитана на подростков [15].

Экспертную оценку успеваемости, дисциплины и отношений в коллективе проводили по данным, представленным родителями и при возмож-

ности классным руководителем. Оценку проводили по 10 бальной шкале, не удовлетворительными считали показатели меньше 4. При оценке дисциплины учитывались пропуски занятий без уважительной причины. Отношения в коллективе включали общественную активность и общительность со сверстниками. Модели поведения определяли по экспертной оценке в результате личной беседы с обследуемым, а также на основании анализа результатов психодиагностических методик, используемых в исследовании.

Статистический анализ результатов был выполнен в программе Statistica 10 (StatSoft. Inc. 1984-2011). По всем исследуемым показателям рассчитана нормальность распределения их значений в выборочных совокупностях с помощью критерия Шапиро-Уилка. Полученные результаты указывали на нормальное распределение значений исследуемых показателей, что послужило основанием для использования параметрических методов статистики для последующего анализа данных. Результаты представлены в виде среднего арифметического – M и стандартного отклонения – σ . Для сравнения между группами использовали t -критерий Стьюдента для независимых выборок. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Среди механизмов психологической защиты у мальчиков (табл.2), страдающих угревой болезнью, преобладали отрицание и компенсация, в большей мере эти качества проявлялись в возрастной группе 13-14 лет, так же в это группе превалировали показатели механизма замещения.

Таблица 2.

**Механизмы психологической защиты у мальчиков.
Индекс жизненного стиля (LSI)» Р. Плутчика, Г. Келлерман ($m \pm \sigma$)**

Table 2. Psychological Defense Mechanisms in Boys. Lifestyle Index (LSI)

by R. Plutchik and G. Kellerman ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Отрицание	86,88±23,17*	74,72±21,36*	69,23±18,72	53,16±12,54
Подавление	52,32±16,31*	37,81±9,66	41,82±11,56	38,41±9,82
Регрессия	62,30±25,15	51,37±12,45	59,76±14,62	49,12±12,45
Компенсация	82,64±17,82*	59,98±13,98*	61,04±16,94	51,43±11,17
Проекция	39,54±14,23*	39,54±11,34	70,96±20,14	36,47±10,22
Замещение	72,23±21,42	47,31±10,82	68,18±12,53	44,27±13,16

Интеллектуализация	55,08±18,11	51,70±11,37	53,78±11,76	61,36±21,37
Реактивное образование	50,44±14,23	54,14±12,08*	51,74±10,23	40,93±8,19

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

Таблица 3.

**Механизмы психологической защиты у девочек.
Индекс жизненного стиля (LSI)» Р. Плутчика, Г. Келлерман ($m \pm \sigma$)**

**Table 3. Psychological Defense Mechanisms in Girls. Lifestyle Index (LSI)
by R. Plutchik and G. Kellerman ($m \pm \sigma$)**

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Отрицание	91,34±12,47*	84,62±24,16*	71,17±9,78	58,14±22,56
Подавление	83,17±18,22*	78,21±21,34*	43,26±8,49	38,32±13,41
Регрессия	52,45±11,54	84,25±26,11*	56,42±14,76	49,17±11,47
Компенсация	61,35±17,46	52,29±22,14	58,16±10,24	49,32±12,62
Проекция	79,26±15,43*	62,44±16,31*	43,36±11,36	39,28±13,28
Замещение	69,61±16,25	47,31±1,56	56,32±15,53	43,28±8,95
Интеллектуализация	53,21±12,83	48,36±14,18	49,12±12,24	47,67±12,37
Реактивное образование	72,24±17,12*	51,26±17,46*	34,72±17,11	32,56±11,23

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

Для девочек с угревой болезнью из примитивных механизмов психологической защиты характерны отрицание, подавление и проекция, а также реактивное образование для девочек с акне более младшего возраста. При этом у девочек 15-17 лет определялись высокие значения по шкале регрессии.

Таблица 4.

**Количество подростков с примитивными механизмами защиты
в группах наблюдения n/ %**

**Table 4. Number of adolescents with primitive defense mechanisms
in the observation groups n/ %**

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	n=36	n=38	n=33	n=36
Отрицание	19/52,8	18/47	12/32	2/6
Подавление	7/19,4	2/5	4/12	5/14

Регрессия	6/16,7	4/11	4/12	3/8
Компенсация	21/58,3	11/29	7/21	4/11
Проекция	5/13,9	5/13	6/18	5/14
Замещение	18/50,0	4/11	5/15	3/8
Интеллектуализация	5/13,9	3/7	6/18	4/11
Реактивное образование	4/11,1	6/16	3/8	2/6
Подростки женского пола, n	n=34	n=41	n=37	n=39
Отрицание	22/65	19/46	13/35	3/8
Подавление	17/50	16/39	2/5	2/5
Регрессия	6/18	18/44	5/14	3/8
Компенсация	5/15	3/7	2/5	4/10
Проекция	14/41	4/10	2/5	2/5
Замещение	5/15	3/7	3/8	5/13
Интеллектуализация	4/12	2/5	2/5	3/8
Реактивное образование	12/35	3/7	4/11	2/5

Подавляющее большинство подростков контрольной группы использовали преимущественно зрелые механизмы защиты, но среди подростков 13-14 лет, как мальчиков так и девочек в 35% случаев выявлялись примитивные механизмы психологической защиты по шкале отрицание. В тоже время, больше половины подростков, страдающих угревой болезнью, демонстрировали примитивные механизмы. Среди мальчиков у 58% выражено применение механизма отрицание, а у 52% компенсация. Эти подростки характеризуются отрицанием трудностей, стараются не видеть проблем, чрезмерно оптимистичны [23]. У 59% мальчиков 13-14 лет выражено использование механизма компенсации. Они характеризуются комплексом неполноценности, чувством беспокойства за свою внешность и отличаются компенсаторным желанием доказать свою значимость, нуждаются в положительной оценке своих достоинств окружающими, часто фантазируют, приписывая себе несуществующие качества. Среди половины мальчиков 13-14 лет с акне определяется применение механизма замещение. Для них характерны раздражительность, часто перенесение агрессии на более слабого или посторонние предметы.

Девочки контрольной группы также в подавляющем большинстве характеризуются зрелыми механизмами психологической защиты. В тоже время, больше половины девочек 13-14 лет, страдающих акне, демонстрируют применение механизмов отрицание, подавление, проекция и реактивное образование, а в 15-17 лет - отрицание, подавление и регрессии. Они характеризовались показным игнорированием фактов своего заболевания, старанием забывать и избегать напоминания о стрессирующих обстоятельствах, дистанцированием от общественной жизни класса. Они часто припи-

сывают окружающим негативные качества иногда собственных. Механизм реактивного образования часто реализуется показным отрицанием сексуальности, чрезмерным и демонстративным избеганием тем, связанных с сексуальной направленностью и половыми различиями. Девушки 15-17 лет еще используют механизм регрессии, который проявляется в переходах к стереотипам детского поведения капризности, упрямства плаксивости.

Таблица 5.

Активность применения стратегий поведения в конфликтных ситуациях у мальчиков балл ($m \pm \sigma$)

Table 5. Frequency of Using Behavioral Strategies in Conflict Situations Among Boys:
Score ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Противоборство	9,52±2,23*	8,61±1,17*	7,32±2,34	5,25±2,11
Сотрудничество	4,24±0,87	7,05±1,67	6,56±1, 52	7,41±1,34
Компромисс	4,12±1,34*	6,65±2,16	7,93±2,14	7,74±2,45
Избегание	4,63±0,96	4,83±1,57	5,36±2,14	5,11±1,67
Уступка	4,52±1,48	3,92±0,51	3,25±1,12	4,22±0,82

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

В группе подростков мужского пола, страдающий угревой болезнью, в обеих возрастных группах преимущественно применялась ярко выраженная стратегия противоборства, также у 13-14 летних выделялись низкие показатели стратегии компромисса, а в 15-17 лет ярко выраженная стратегия сотрудничества. Анализ средних данных не показал ярко выраженных стратегий у мальчиков контрольной группы. В тоже время стоит обратить на несвойственную им стратегию уступки.

Таблица 6.

Активность применения стратегий поведения в конфликтных ситуациях у девочек, балл ($m \pm \sigma$)

Table 6. Frequency of Use of Behavioral Strategies in Conflict Situations Among Girls,
Score ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Противоборство	3.41±1.32*	4.18±1.52	6.26±1.43	5.18±1.68

Сотрудничество	5,31±2,14*	5,26±1,71*	7,14±0,93	7,35±1,56
Компромисс	4,36±2,32	5,17±0,27	6,55±1,24	9,51±0,48
Избегание	7,48±2,26*	6,81±2,17*	5,19±1,15	4,24±1,22
Уступка	9,61±0,36*	6,29±2,64*	3,25±1,26	3,82±0,46

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

В группе девочек, страдающих угревой болезнью, в 13-14 лет преимущественно применялась ярко выраженная стратегия уступки и избегания. Стратегии противоборства и сотрудничества у этих девочек применялись существенно реже, чем в контрольной группе. У девочек контрольной группы преобладали стратегии компромисса и сотрудничества и отмечалась низкие показатели стратегии уступок.

Таблица 7.

**Количество подростков с деструктивной стратегией поведения
в конфликтных ситуациях, чел./%**

**Table 7. Number of adolescents with a destructive behavioral strategy
in conflict situations, persons/%**

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Противоборство	19/53	16/42	9/27	6/17
Сотрудничество	3/8	7/18	8/24	9/25
Компромисс	9/25	6/16	9/27	10/28
Избегание	2/6	5/13	5/15	6/17
Уступка	3/8	4/11	4/12	5/14
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Противоборство	3/9	7/17	8/22	5/13
Сотрудничество	5/15	8/20	10/27	11/28
Компромисс	3/9	8/20	8/22	14/36
Избегание	9/26	9/22	7/19	5/13
Уступка	14/41	9/22	4/11	4/10

Среди мальчиков, страдающих угревой болезнью, в обеих возрастных группах приоритетной стратегией было противоборство, которое определялось у 53% 13-14 – летних и у 42 % более старших подростков. Среди контрольной группы мальчиков большинству свойственно применение в конфликтной ситуации стратегий поведения компромисс и сотрудничество. Они учитывают все доводы, оппонента и свои, для решения пробле-

мы, что и определяет конструктивный выход из конфликта, полностью удовлетворяющего обе стороны [3; 17]. Распределение девочек больных угревой болезнью наоборот продемонстрировало приоритет из стратегий уступки и избегания. Девочки с акне в 42 % случаев избирали стратегию уступки. Девочки контрольной группы в большей степени придерживались стратегий сотрудничества и компромисса [25].

Таблица 8.

Результаты оценки волевых качеств личности (ВКЛ) мальчиков, стены ($m \pm \sigma$)

Table 8. Results of the assessment of volitional personality traits (VPT) in boys, means ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Ответственность	4,82±1,16	6,14±2,14	5,12±3,14	6,11±2,23
Инициативность	3,76±0,95*	5,17±1,45	5,76±1,65	5,72±0,91
Решительность	6,53±2,34	7,82±1,34*	4,82±1,70	5,21±1,22
Самостоятельность	4,42±1,06	5,54±2,65	5,38±2,48	5,82±2,58
Выдержка	3,45±0,73*	3,72±0,83*	4,19±2,03	6,63±2,85
Настойчивость	3,82±0,54*	7,86±1,07*	5,16±3,09	5,17±1,15
Энергичность	5,18±1,68	5,29±2,26	5,85±2,18	5,93±2,47
Внимательность	3,42±1,32*	3,29±1,18*	5,25±1,45	5,73±2,64
Целеустремленность	4,68±2,16	5,38±1,76	5,37±2,47	5,63±1,97
Итоговый балл	4,27±1,37	6,73±2,32	5,27±1,88	5,76±2,94

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

Мальчики, страдающие акне, в возрасте 13-14 в целом характеризуются более низким уровнем развития ВКЛ, по сравнению с мальчиками того же возраста группы контроля. В первую очередь, снижение уровня развития ВКЛ у этих детей достигается за счет низких инициативности, выдержки, внимательности и настойчивости. В группе больных акне 15-17 лет, наоборот, развитие ВКЛ определяется на более высоком уровне относительно контрольной группы того же возраста.

Более высокие значения ВКЛ складываются за счет высоких показателей по шкалам решительности и настойчивости. При этом, значения шкал выдержка и внимательность у них значимо ниже, чем в группе контроля. Подростки с угревой болезнью 13-14 лет характеризовались: пассивностью, трудностью в преодолении собственной инертности, чрезмерной эмоциональностью, мягкостью характера и сложностями,

связанными с концентрацией внимания. Для подростков с угревой болезнью 15-17 лет характерны: импульсивность, высокому стремлению к достижению цели, но при этом обладают несдержанностью и сложностями надолго сосредоточиваться на каком-то конкретном объекте или действии.

Таблица 9.

Результаты оценки волевых качеств личности (ВКЛ) девочек, стены ($m \pm \sigma$)

Table 9. Results of the assessment of volitional personality traits (VPT) in girls, means ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки женского пола, n	36	38	33	36
Ответственность	4,72±1,81	5,21±3,15	4,47±1,62	5,61±1,25
Инициативность	3,28±1,60	3,62±1,78	5,57±3,12	5,45±1,28
Решительность	3,45±1,80	3,34±1,30	5,25±3,07	5,36±1,49
Самостоятельность	4,23±2,61	4,59±3,17	5,18±2,77	6,19±2,58
Выдержка	3,57±0,77	3,21±1,27	5,41±1,55	5,62±3,05
Настойчивость	3,61±0,78	5,40±3,19	5,37±2,36	5,53±1,83
Энергичность	5,15±2,56	5,27±2,14	5,75±3,03	5,47±0,90
Внимательность	3,29±0,74	4,07±2,22	5,31±1,92	5,42±2,35
Целеустремленность	4,45±2,21	5,32±3,28	5,68±1,93	5,89±2,30
Итоговый балл	4,12±1,56	4,53±2,69	5,52±1,08	5,72±1,87

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

Девочки, страдающие акне, в возрасте 13-14 демонстрируют более низкий уровень развития ВКЛ, по сравнению с девочками того же возраста группы контроля. Снижение уровня развития ВКЛ у этих девочек обусловлено низкой инициативностью, решительностью, выдержкой, настойчивостью внимательностью.

В группе девочек с акне 15-17 лет, снижение развития ВКЛ определяется на более низком уровне относительно контрольной группы того же возраста. Более низкие значения ВКЛ складываются за счет низких показателей по шкалам решительности, инициативности и выдержки. Девочки с угревой болезнью 13-14 лет характеризовались: безынициативностью, инертностью, эмоциональностью, неспособностью сохранять мотивацию и сложностями с удержанием внимания. Для подростков с угревой болезнью 15-17 лет характерны: нерешительность, пассивной позицией в общении и несдержанностью [16].

Таблица 10.

Количество подростков с низкими показателями волевых качеств личности в группах наблюдения, чел/%

Table 10. Number of adolescents with low levels of volitional personality traits in the observation groups, persons/%

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Ответственность	16/44	10/26	16/48	10/28
Инициативность	23/64	13/34	17/52	14/39
Решительность	11/30	10/26	12/36	12/33
Самостоятельность	15/42	12/31	13/39	13/36
Выдержка	27/75	22/58	9/27	10/28
Настойчивость	21/58	8/21	10/30	15/42
Энергичность	12/33	12/31	11/33	13/36
Внимательность	23/64	24/63	12/36	11/31
Целеустремленность	16/44	11/29	11/33	10/28
Итоговый балл	14/39	9/24	14/42	12/33
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Ответственность	15/42	16/24	15/41	13/33
Инициативность	28/78	28/34	12/32	11/28
Решительность	25/69	27/29	9/24	7/18
Самостоятельность	18/50	19/32	8/22	7/18
Выдержка	23/64	30/24	11/30	10/26
Настойчивость	22/61	15/37	9/24	7/18
Энергичность	16/44	13/29	7/19	8/21
Внимательность	27/75	21/27	10/27	9/23
Целеустремленность	16/44	12/24	8/22	7/18
Итоговый балл	26/72	18/29	10/27	11/28

Среди обследованных мальчиков с угревой болезнью в 13-14 лет выявлено существенное снижение ВКЛ по шкале инициативность у 78% мальчиков, по шкале решительность у 69%, по шкале выдержка 64% и по шкале внимательность у 75% школьников. В 15-17 летнем возрасте ВКЛ улучшились, но в тоже время по шкалам в группе наблюдалось большое количество подростков с низкими значениями выдержки и внимательности, с низкой выдержкой 58%, с низкой внимательностью 63%. Большинство мальчиков с угревой болезнью характеризуется чрезмерной эмоциональностью и плохо переносят учебные нагрузки.

Среди девочек, страдающих угревой болезнью, большинство характеризовались безынициативностью, нерешительностью, невнимательностью, низким самообладанием, несдержанностью и импульсивностью.

Самооценка – субъективное восприятие человеком самого себя, сформировавшееся на фоне мнения окружающих. Самооценка в подростковом возрасте имеет важное значение. Ключевую роль для формирования самооценки подростка несет референтная группа, определяющая внешность, манеру поведения, предпочтения и другие характеристики, по которым окружение составляет мнение имеющее важное значение в этом возрасте [5; 8]. При интерпретации учитываются набранные баллы от 0 до 128, при этом чем выше балл, тем ниже самооценка.

Таблица 11.

Уровень самооценки», по методике С. В. Ковалёва у мальчиков, баллы ($m \pm \sigma$)

Table 11. “Level of Self-Esteem” According to S. V. Kovalev’s Methodology Among Boys, Scores ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Уровень	51,4±12,41*	44,3±14,32*	32,8±10,17	29,6±9,67

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

В группе девочек, страдающих угревой болезнью, уровень самооценки, был значимо ниже, чем в аналогичных возрастных подгруппах у здоровых подростков женского пола.

Таблица 12.

Уровень самооценки», по методике С.В. Ковалёва у девочек, баллы ($m \pm \sigma$)

Table 12. “Level of Self-Esteem” According to S.V. Kovalev’s Methodology Among Girls, Scores ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Уровень	62.4±23.54*	73.5±21.86*	32.2±12.36	38.7±9.59

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

В группе мальчиков с угревой болезнью так же определялся более низкий уровень самооценки чем в группе контроля. Среди обследованных

подростков большинство имело адекватную самооценку среднего уровня. В группе страдающих угревой болезнью часто выявлялись подростки с низким уровнем самооценки, в большей степени у девочек.

Таблица 13.

**Количество подростков с низким уровнем самооценки
в группах наблюдения, чел/%**

Table 13. Number of adolescents with low self-esteem in the observation groups, persons/%

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Высокий	5/14	6/16	2/6	3/8
Средний	19/53	23/61	25/76	26/72
Низкий	12/33	9/23	6/18	7/19
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Высокий	4/12	5/12	2/5	4/10
Средний	19/56	19/46	31/84	29/74
Низкий	11/32	17/41	4/11	6/16

Мальчики, страдающие угревой болезнью, в основном, были представлены в группе со средним уровнем самооценки, 33% в подгруппе 13-14 лет и 23% – 15-17 лет демонстрировали низкий уровень самооценки. Они характеризовались застенчивостью, неумением выражать свое мнение, низкой успеваемостью, неряшливостью, мстительностью, иногда проявлениями агрессивности при малейших замечаниях. Среди мальчиков, страдающих акне, с завышенной самооценкой определились от 14 до 16 %, для них характерна эгоистичность, уверенность в собственной непогрешимости, проявление доминирования, невосприимчивость к критике. Девочек также в большинстве относили к группе со средним уровнем самооценки, с завышенной самооценкой встречались единично. Но при этом заниженная самооценка выявлялась среди девочек с угревой болезнью в 33% у 13-14 летних и 41% среди 15-17 - летних. Для них характерны завистливость, претензии к своему облику, безотказность, чрезмерная чувствительность к критике.

Результаты оценки уровня напряженности копинг-механизмов совладания со стрессом представлены в таблице 14.

Мальчики, страдающие угревой болезнью, отличались более высокой напряженностью стратегий конфронтации, избегания и поиска социальной поддержки, чем подростки контрольной группы. В тоже время, они реже

используют копинги самоконтроля, планирования решений проблемы и положительной переоценки по сравнению с группой контроля.

Таблица 14.

Результаты оценки уровня напряженности копинг механизмов совладания со стрессом по методике Р. Лазаруса и С. Фолкмана у мальчиков, балл ($m \pm \sigma$)

Table 14. Results of the assessment of the intensity of stress coping mechanisms using the method developed by R. Lazarus and S. Folkman among boys, score ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Конфронтация	13,4±2,9*	14,2±2,5*	8,2±2,7	9,3±1,2
Дистанцирование	9,4±1,8	8,2±1,3	8,1±3,1	8,5±1,4
Самоконтроль	8,3±2,4*	9,1±1,5*	12,2±3,1	13,5±2,1
Поиск социальной поддержки	14,3±2,6*	15,6±3,1*	9,8±3,5	10,6±1,1
Принятие ответственности	6,9±1,1	7,1±1,9	5,1±1,1	5,6±2,9
Бегство-избегание	15,3±4,6*	14,9±3,7*	10,2±1,8	9,6±2,7
Планирование решения проблемы	6,7±1,6*	7,2±1,7*	9,2±1,9	9,5±0,7
Положительная переоценка	5,3±3,4*	4,6±1,9*	7,1±1,8	7,8±0,8

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

Таблица 15.

Результаты оценки уровня напряженности копинг-механизмов совладания со стрессом по методике Р. Лазаруса и С. Фолкмана у девочек, балл ($m \pm \sigma$)

Table 15. Results of the assessment of the intensity of stress coping mechanisms using the method developed by R. Lazarus and S. Folkman among girls, score ($m \pm \sigma$)

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Конфронтация	5,3±2,7	6,2±2,4	8,1±3,3	9,4±3,1
Дистанцирование	11,5±0,8	12,4±3,1	9,6±0,8	9,2±2,9
Самоконтроль	7,1±0,9	7,6±2,1	9,5±1,0	9,7±3,3
Поиск социальной поддержки	16,2±3,6*	15,8±2,9*	11,7±2,9	11,2±0,8
Принятие ответственности	5,3±0,7	6,8±0,8	4,7±1,1	4,9±2,2
Бегство-избегание	15,7±3,3*	15,3±3,3*	12,4±3,3	9,8±2,0
Планирование решения проблемы	4,8±1,8*	5,2±1,8*	8,6±3,0	9,1±0,7
Положительная переоценка	6,2±3,3*	7,1±1,9*	9,4±2,3	11,5±2,9

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

У девочек, страдающих акне, в обеих возрастных группах определялось более выраженное напряжение копинг стратегий. Особенно выделялись дезадаптивно высокий копинг стратегии поиск социальной поддержки и бегство-избегание. Стратегии планирование решения проблемы и положительная переоценка использовались существенно реже, чем у девочек контрольной группы.

Таблица 16.

**Количество подростков с дезадаптацией копинг механизмов
совладания со стрессом, чел/%**

Table 16. Number of adolescents with maladaptive coping mechanisms
for managing stress, persons/%

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	36	38	33	36
Конфронтация	12/33	15/39	5/15	6/17
Дистанцирование	4/11	6/16	5/15	6/17
Самоконтроль	7/19	8/21	11/33	12/33
Поиск социальной поддержки	12/33	9/23	8/24	9/25
Принятие ответственности	4/11	5/13	4/12	4/11
Бегство-избегание	16/44	14/37	9/27	7/19
Планирование решения проблемы	4/11	5/13	6/18	10/28
Положительная переоценка	4/11	7/18	7/21	8/22
Подростки женского пола, n	34	41	37	39
Конфронтация	4/12	5/12	7/19	9/23
Дистанцирование	11/32	12/29	6/16	5/13
Самоконтроль	8/23	8/19	5/14	6/15
Поиск социальной поддержки	18/52	16/39	11/30	9/23
Принятие ответственности	4/12	5/12	4/11	6/15
Бегство-избегание	12/35	19/46	12/32	9/23
Планирование решения проблемы	6/18	12/29	4/11	5/13
Положительная переоценка	4/12	6/15	9/24	10/26

В группе мальчиков, страдающих акне обеих возрастных групп, третья часть обладали выраженной дезадаптацией по копингу конфронтация, они характеризовались активным противостоянием стрессу или проблеме, часто воспринимая внешние обстоятельства враждебно даже при видимой несерьезной ситуации. Притом у половины больных подростков 13-14 лет, и у 40% 15-17 лет определялся напряженный копинг самоконтроля, что демонстрирует у

них сложности с контролем поведения и эмоциями, проявляясь в низком самообладании. Напряженный уровень стратегии поиск социальной поддержки характеризует детей с угревой болезнью, как стремящихся привлечь для разрешения стрессовой ситуации внешние ресурсы, как информационные, так и действенные. Достаточно большая часть среди подростков в группах с акне демонстрировала высокий уровень избегания 35% и 46% соответственно, для них характерно избегание и затягивание конфликта, нерешительность [15; 20].

Среди девочек, страдающих акне, отмечались высокие уровни напряжения по копинг-стратегиям дистанцирование, поиск социальной поддержки, избегание. Они характеризовались стремлением отойти от проблемной ситуации, уходом от необходимости предпринимать какие-либо действия и старались привлечь на свою сторону внешние ресурсы.

Далее на основании экспертных оценок определяли успеваемость, уровень дисциплины и отношения в коллективе, показывающие уровень социализации.

Таблица 17.

Особенности успеваемости у подростков, страдающих угревой болезнью по данным экспертной оценки ($m \pm \sigma$)

Table 17. Characteristics of academic performance among adolescents with acne, based on expert assessment ($m \pm \sigma$)

Показатель	Группа, возраст, лет			
	УБ		КГ	
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	n=36	n=38	n=33	n=36
Успеваемость	5,2±2,3*	6,4±2,1*	7,2±1,2	7,6±1,3
Дисциплина	7,2±1,2	7,4±0,9	7,5±0,7	7,7±0,6
Отношения в коллективе	7,5±1,9	7,6±1,7	7,7±1,9	7,4±2,1

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

Анализ экспертных оценок свидетельствует о более низкой успеваемости у мальчиков, страдающих угревой болезнью, в большей мере это выражено в 13-14 лет. По отзывам преподавателей, они отличались большей отвлекаемостью и снижением внимания во время занятий.

Девочки, страдающие угревой болезнью в 15-17-летнем возрасте, часто пропускали занятия без уважительной причины. Они значительно меньше принимали участие в общественной жизни класса и старались избегать внеклассных мероприятий. Осложнения отношений в коллективе среди девочек, страдающих акне, наблюдались 30 % 13-14 летних и 34% 15-17 летних.

Таблица 18.

**Особенности успеваемости у девочек, страдающих угревой болезнью
по данным экспертной оценки**

Table 18. Characteristics of Academic Performance Among Girls with Acne,
Based on Expert Assessment

Показатель	Группа, возраст, лет			
	УБ		КГ	
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки женского пола, n	n=34	n=41	n=37	n=39
Успеваемость	7,6±1,4	6,8±1,2	7,7±1,3	7,3±0,9
Дисциплина	8,1±1,3	6,3±1,4*	8,4±1,2	8,1±1,6
Отношения в коллективе	6,6±1,4*	6,4±2,1*	7,8±1,5	8,1±1,4

Примечание: * – различия относительно КГ аналогичного возраста; $p < 0,01$

Таблица 19.

**Распределение обследуемых подростков с низкой успеваемостью
и дисциплиной на основании экспертной оценки n/ %**

Table 19. Distribution of Adolescents in the Study with Low Academic Performance
and Discipline, Based on Expert Assessment n/ %

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, n	n=36	n=38	n=33	n=36
Успеваемость	9/25	12/31	5/15	6/17
Дисциплина	11/30	14/37	7/21	9/25
Отношения в коллективе	18/50	16/42	8/24	7/19
Подростки женского пола, n	n=34	n=41	n=37	n=39
Успеваемость	12/35	14/34	6/18	4/10
Дисциплина	12/29	14/41	2/6	7/18
Отношения в коллективе	11/30	13/34	5/15	3/8

Анализ экспертных оценок свидетельствует, что среди обследуемых мальчиков, страдающих угревой болезнью в возрасте 13-14 лет, 25% отличались низкой успеваемостью, а в 15-17-летнем возрасте таких подростков выявлено 32%. В то время как в группах контроля определялось 15 и 16% мальчиков с низкой успеваемостью. Нарушения дисциплины демонстрировали 30% мальчиков с угревой болезнью 13-14 лет и 37% 15-17-летних. По данным, представленным родителями, они отличались большей отвлекаемостью и снижением внимания во время занятий. В контрольных группах нарушители дисциплины определялись в 15 и 25 % случаев. Сложные

отношения в коллективе выявлены у половины обследуемых мальчиков с акне 13-14 лет и у 42% 15-17 летних.

Количество девочек с низкой успеваемостью среди страдающих угревой болезнью определялось по 35% в обеих возрастных группах. При этом в группах контроля снижение успеваемости демонстрировали 18% 13-14 летних 11% 15-17 летних девочек. Снижение дисциплины среди девочек с акне отмечали у 29% 13-14 лети и 41% 15-17 летних.

Модели поведения в конфликтной ситуации [12; 20], определенные с помощью экспертных оценок и данных анализа психодиагностических методик, представлены в таблице 20.

Таблица 20.

Распределение обследуемых подростков с различными моделями поведения на сновании экспертной оценки п/ %

Table 20. Distribution of the adolescents in the study according to different behavioral patterns, based on expert assessment п/ %

	Угревая болезнь		Контрольная группа	
	Возраст, лет			
	13–14	15–17	13–14	15–17
Подростки мужского пола, п	n=36	n=38	n=33	n=36
Конструктивная	11/30	13/34	21/64	26/70
Деструктивная	22/61	20/53	8/26	7/21
Конформистская	3/9	5/13	4/10	3/9
Подростки женского пола, п	n=34	n=41	n=37	n=39
Конструктивная	6/17	8/15	18/49	20/52
Деструктивная	4/12	7/17	12/31	10/25
Конформистская	24/71	26/68	7/20	9/23

Мальчики, страдающие угревой болезнью обеих возрастных групп, в конфликте занимали преимущественно деструктивную позицию, в 13-14 лет среди обследуемых с этой моделью поведения определялось 61%, а среди 15-17 летних 53%. Конструктивную позицию занимали 30% и 34% мальчиков страдающих акне. Конформистская модель поведения характерна для 9% мальчиков 13-14 лет и 13% 15-17 лет. Мальчики контрольной группы в большинстве применяли конструктивную позицию в конфликте 64% и 70% в возрастных группах. Деструктивная модель поведения определялась у 26% 13-14 летних и 21% мальчиков в 15-17 лет. Конформистскую позицию в конфликте занимали 10% и 9% мальчиков контрольной группы.

Девочки, страдающие акне, занимали преимущественно конформистскую позицию в конфликте, среди 13-14 летних 71%, а среди 15-17 летних 68%. Конструктивная модель поведения была характерна для 17% 13-14 летних и 15% для девочек в возрасте 15-17 лет. Деструктивную модель поведения в конфликте демонстрировали 12% и 17% девочек в возрастных группах. В тоже время в контрольной группе преобладали девочки с конструктивной позицией в конфликте, 49% в 13-14 летнем возрасте и 52 в 15-17 летнем. В контрольной группе демонстрировали конформистскую модель 20% девочек 13-14 лет и 23% в 15-17 летнем возрасте. Деструктивная модель поведения была характерна для 31% 13-14 летних и 25% 15-17 летних девочек контрольной группы.

Заключение

Результаты анализа данных проведённого исследования свидетельствуют о значимом влиянии на поведение и личностные характеристики подростков угревой болезни [30].

Влияние угревой болезни проявляется на всех уровнях поведенческих реакций, особенно выражены эти проявления в преодолении стресса, конфликтных ситуаций и в отношении продуктивности обучения. В большинстве подростки с акне демонстрируют примитивные механизмы психологической защиты [20]. У подростков с акне значительно чаще чем у здоровых, развивается беспокойства по поводу своей внешности, что сопровождается повышенной раздражительностью. Девочки с акне на фоне формирующегося комплекса неполноценности часто демонстрируют чрезмерно демонстративное избегание тем связанных с сексуальной направленностью и половыми различиями [23]. Поведение в конфликтных ситуациях у подростков с угревой болезнью различается в зависимости от пола. У мальчиков с акне среди стратегий поведения в конфликте превалирует противоборство, а у девочек уступка и избегание, что проявляется в отказе от борьбы и желании выйти из конфликтной ситуации даже в ущерб своим интересам. Для подростков, страдающих акне, характерна заниженная самооценка, которая у мальчиков иногда проявляется агрессивностью при малейших замечаниях, а у девочек повышенной восприимчивостью к критике, завистливостью и безотказностью. Среди волевых качеств у мальчиков страдающих акне проявляются решительность и настойчивость. При этом у девочек характеризуются безынициативностью, инертностью и несдержанностью [26]. Подростки с угревой болезнью для преодоления стрессовых ситуаций демонстри-

ровали напряжение копинг стратегий конфронтация и самоконтроль, что проявлялось во враждебном восприятии даже несерьезной ситуации сопровождающимся чрезмерной эмоциональностью. Для девочек в преодолении стресса характерно стремление уйти от проблемной ситуации и привлечь на свою сторону внешнюю помощь. Так же подростки с угревой болезнью характеризовались снижением успеваемости, нарушениями дисциплины и проблемами в построении общения в коллективе. Некоторые подростки в более младших группах подвергались буллингу со стороны одноклассников [24].

Таким образом большинство мальчиков, страдающих угревой болезнью, проявляют агрессивность к своему окружению, несдержанность и вспыльчивость, что нередко является причиной конфликта со сверстниками. В тоже время меньшая часть, наоборот, демонстрируют чрезмерную смиренность, толерантность и безответность, что часто является пусковым механизмом буллинга со стороны одноклассников [9, 24]. Девочки, страдающие акне, в большинстве демонстрируют лицемерную безропотность и покорность. Вполне вероятно, что присущие этим подросткам личностные характеристики и поведенческие реакции формируются не только за счет влияния стресса, связанного с переживанием по поводу своей внешности, но и связано с нарушениями гуморальной регуляции, являющейся предиктором угревой болезни. При этом в подростковом возрасте закладываются черты характера, которые будут определять развитие и социальную адаптацию на долгие годы вперед, что требует усиленного внимания к этим школьникам со стороны педагогов и штатных психологов, даже если дети сами не предъявляют жалоб.

Список литературы

1. Абакумова, Е. С., & Сагайдак, В. А. (2021). Модель Томаса-Киллмана как инструмент определения конструктивных подходов к решению конфликтной ситуации. *Наукофера*, (12-1), 393–396. EDN: <https://elibrary.ru/VGACKH>
2. Ахапкин, Р. В., Букреева, Н. Д., Вазагаева, Т. И., Костюкова, Е. Г., Мазо, Г. Э., & Мосолов, С. Н. (2021). *Депрессивный эпизод, рекуррентное депрессивное расстройство — 2021–2022–2023: клинические рекомендации*. Москва. 72 с. Режим доступа: http://disuria.ru/_ld/10/1077_kr21F32F33MZ.pdf. EDN: <https://elibrary.ru/NZLIII>
3. Батхина, А. А. (2017). Стратегии поведения в межкультурном конфликте: обзор зарубежных исследований. *Социальная психология и общество*, 8(3), 45–62. <https://doi.org/10.17759/sps.2017080305>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQQMCX>

4. Бисалиев, Р. В. (2024). Суицидальное поведение в структуре болезней органов пищеварения и болезней кожи. *Бюллетень медицинской науки*, (2), 151–160. <https://doi.org/10.31684/25418475-2024-2-151>. EDN: <https://elibrary.ru/WUZASK>
5. Бухаленкова, Д. А., & Карабанова, О. А. (2018). Особенности самооценки у подростков с разным пониманием успеха. *Национальный психологический журнал*, (3), 148–157. <https://doi.org/10.11621/npj.2018.0314>. EDN: <https://elibrary.ru/YPELNB>
6. Валиев, Р. А., & Каримова, В. Г. (2021). *Основы конфликтологии: учебное пособие*. Уральский государственный педагогический университет. 148 с. ISBN 978-5-7186-1873-0. EDN: <https://elibrary.ru/LIHRBN>
7. Вассерман, Л. И., Ерышев, О. Ф., Клубова, Е. Б., и др. (1998). *Психологическая диагностика индекса жизненного стиля: методическое пособие для врачей и психологов*. НИПНИ им. В. М. Бехтерева. 48 с.
8. Горохова, А. А., Сомова, Н. Л., & Киричик, Е. С. (2021). Исследование особенностей самооценки современных детей и подростков. *Психология человека в образовании*, 3(2), 128–139. <https://doi.org/10.33910/2686-9527-2021-3-2-128-139>. EDN: <https://elibrary.ru/QWNMSY>
9. Гребенникова, В. М. (2025). Анализ взаимосвязи личностных особенностей подростков и выбора стратегии поведения в конфликте. *Образование и общество*, (1), 116–121. EDN: <https://elibrary.ru/UZOMLF>
10. Дворянкова, Е. В., Шевченко, Н. А., & Жукова, О. В. (2022). Психиатрическая коморбидность и психоэмоциональный статус больных с акне. *Медицинский Совет*, (16), 38–46. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2022-16-13-38-46>. EDN: <https://elibrary.ru/ONYTPM>
11. Добреля, В. В. (2023). Тревожно-депрессивные расстройства на фоне акне средней степени тяжести (клинический случай). *Врач*, (2), 65–67. <https://doi.org/10.29296/25877305-2023-02-15>. EDN: <https://elibrary.ru/MAETBZ>
12. Киселев, В. В., & Евенко, С. Л. (2021). Континуумная модель стратегий поведения в конфликте с учетом тенденций цифровизации современного общества. *Человеческий капитал*, (S5-3), 117–124. EDN: <https://elibrary.ru/RPGFFP>
13. Министерство здравоохранения Российской Федерации. (2021). *Клинические рекомендации — Генерализованное тревожное расстройство — 2021–2022–2023* (утв. 16.09.2021).
14. Круглова, Л. С., Самушия, М. А., & Талыбова, А. М. (2018). Психические расстройства, социальная дезадаптация и качество жизни пациентов с акне и симптомами постакне. *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*, 118(12), 4–10. <https://doi.org/10.17116/jnevro20181181214>. EDN: <https://elibrary.ru/YWJQYP>

15. Крюкова, Т. Л. (2007). *Методы изучения совладающего поведения: три копинг-шкалы*. Авантитул. 60 с. ISBN 978-5-98342-063-2. EDN: <https://elibrary.ru/QXRCUL>
16. Куземина, Е. Ф., & Пашкова, Н. В. (2021). *Конфликтология*. Краснодар. 184 с.
17. Валиев, Р. А., & Каримова, В. Г. (сост.). (2021). *Основы конфликтологии: учебное пособие*. Уральский государственный педагогический университет. 148 с.
18. Енгибарян, Л. С. (2020). *Психология личности: учебно-методическое пособие*. РИО АГПУ. 76 с.
19. Пшеничникова, И. В., & Скворцов, Н. А. (2024). Формирование адаптивных копинг-стратегий поведения подростков. *Современные проблемы науки и образования*, (1). <https://doi.org/10.17513/spno.33269>. EDN: <https://elibrary.ru/WHKNQD>
20. Староверова, М. В., Мосинцев, Д. Д., & Блинцова, И. М. (2022). Формирование у младших школьников модели безопасного поведения. *Проблемы современного педагогического образования*, (76-1), 277–280. EDN: <https://elibrary.ru/JSOBHD>
21. Струк, Л. А. (2022). Исследование самооценки подростков. *Молодой ученый*, (22), 655–659. EDN: <https://elibrary.ru/ZZJSZW>
22. Сэмюэлс, Д., Розетал, Р., Лин, Р., Чаудхари, С., & Нацуаки, М. Н. (2020). Акне обыкновенное и риск развития депрессии и тревожности: метааналитический обзор. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 83(2), 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.02.040>. EDN: <https://elibrary.ru/YCFPLG>
23. Тюляева, О. А., Поздеева, К. А., Славкина, О. К., Тихонова, А. С., Жмеренецкий, А. К., Д. В. И., & Олифер, О. О. (2024). *Тренинг уверенного поведения*. Изд-во. 65 с.
24. Труфанов, Г. А., Евстафьев, А. В., Томин, В. В., & Акулина, Е. Е. (2024). Ролевые аспекты буллинга как конфликта. *Конфликтология / Nota Bene*, (1), 94–106. <https://doi.org/10.7256/2454-0617.2024.1.69915>. EDN: <https://elibrary.ru/GMAYZS>
25. Христославенко, Е. Р. (2022). Модели стратегий поведения в межличностном конфликте. *Молодой ученый*, (51), 298–300. EDN: <https://elibrary.ru/WQPNOR>
26. Хуснутдинова, Э. Р. (2023). Модели поведения личности в конфликте. *Via Scientiarum. Дорога знаний*, (3), 171–181. EDN: <https://elibrary.ru/ATNQAH>
27. Чумаков, М. В. (2012). *Развитие эмоционально-волевой сферы личности: учебное пособие*. Издательство Курганского государственного университета. 126 с. ISBN 978-5-4217-0136-1. EDN: <https://elibrary.ru/QYFFFJ>
28. Abdel Wahed, W. Y., & Hassan, S. K. (2017). Prevalence and associated factors of stress, anxiety and depression among medical Fayoum university students. *Alexandria J. Med.*, 53, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.ajme.2016.01.005>

29. Gupta, N., & Gupta, M. (2023). The controversies surrounding acne and suicide: Essential knowledge for clinicians. *Cureus*, 15(8), e43867. <https://doi.org/10.7759/cureus.43867>. EDN: <https://elibrary.ru/IDHXHK>
30. Hakimov, D., & Latipova, F. (2025). Living with acne: Psychological impact and social adaptation. *International Journal of Medical Sciences*, 1(3), 44–46. <https://inlibrary.uz/index.php/ijms/article/view/80005>
31. Hefez, L., Micallef, J., Revah-Levy, A., Falissard, B., Jouve, E., Dreno, B., & Chosidow, O. (2022). First use of the Adolescent Depression Rating Scale (ADRS) in the management of young people with severe acne treated with isotretinoin: A pilot study of an active monitoring of depressive disorders by dermatologists. *Clin Exp Dermatol.*, 47, 709–716. <https://doi.org/10.1111/ced.15039>. EDN: <https://elibrary.ru/KWXATA>
32. Hughes, O., & Bewley, A. (2023). Is it really ever ‘just acne’? Considering the psychodermatology of acne. *Br. J. Dermatol.*, 189, i11–i16. <https://doi.org/10.1093/bjd/ljad251>. EDN: <https://elibrary.ru/OADCIE>
33. Pronizius, E., & Voracek, M. (2020). Dermatologists’ perceptions of suicidality in dermatological practice: A survey of prevalence estimates and attitudes in Austria. *BMC Dermatol.*, 20, 10. <https://doi.org/10.1186/s12895-020-00107-w>. EDN: <https://elibrary.ru/AWNMWG>
34. Samodai, O. V., & Reznikov, K. M. (2017). Complex correction of psychoemotional and immunological changes in patients with acne. *Research Result: Pharmacology and Clinical Pharmacology*, 3(3), 97–109. <https://doi.org/10.18413/2313-8971-2017-3-3-97-109>. EDN: <https://elibrary.ru/ZISPML>
35. Samuels, D. V., Rosenthal, R., Lin, R., et al. (2020). Acne vulgaris and risk of depression and anxiety: A meta-analytic review. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 83(2), 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.02.040>. EDN: <https://elibrary.ru/YCFPLG>
36. Shakirova, A., Koibagarova, A., Kichina, T., & Golyaeva, K. (2020). Excoriated acne and psychoemotional conditions. *Eurasian Union Scientists*, 3(10), 53–55.
37. Smith, J., Brown, A., & Clark, P. (2020). The psychological impact of acne. *British Journal of Dermatology*, 182(4), 123–130.
38. Tasneem, T., Begum, A., Chowdhury, M., Rahman, S., Macassa, G., Manzoor, J., & Rashid, M. (2023). Effects of acne severity and acne-related quality of life on depressive symptoms among adolescents and young adults: A cross-sectional study in Bangladesh. *Front. Psychol.*, 14, 1153101. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1153101>. EDN: <https://elibrary.ru/HGDGMV>
39. Xu, S., Zhu, Y., Hu, H., et al. (2021). The analysis of acne increasing suicide risk. *Medicine (Baltimore)*, 100, e26035. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000026035>. EDN: <https://elibrary.ru/SYPVRF>

References

1. Abakumova, E. S., & Sagaidak, V. A. (2021). The Thomas-Kilmann model as a tool for determining constructive approaches to resolving a conflict situation. *Naukosfera*, (12-1), 393–396. EDN: <https://elibrary.ru/VGACKH>
2. Akhapiin, R. V., Bukreeva, N. D., Vazagaeva, T. I., Kostyukova, E. G., Mazo, G. E., & Mosolov, S. N. (2021). *Depressive episode, recurrent depressive disorder — 2021–2022–2023: Clinical guidelines*. Moscow. 72 p. Retrieved from http://disuria.ru/_ld/10/1077_kr21F32F33MZ.pdf. EDN: <https://elibrary.ru/NZLIII>
3. Batkhina, A. A. (2017). Strategies of behavior in intercultural conflict: A review of foreign studies. *Social Psychology and Society*, 8(3), 45–62. <https://doi.org/10.17759/sps.2017080305>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQQMCX>
4. Bisaliev, R. V. (2024). Suicidal behavior in the structure of diseases of the digestive system and skin diseases. *Bulletin of Medical Science*, (2), 151–160. <https://doi.org/10.31684/25418475-2024-2-151>. EDN: <https://elibrary.ru/WUZASK>
5. Bukhalenkova, D. A., & Karabanova, O. A. (2018). Features of self-esteem in adolescents with different understandings of success. *National Psychological Journal*, (3), 148–157. <https://doi.org/10.11621/npj.2018.0314>. EDN: <https://elibrary.ru/YPELNB>
6. Valiev, R. A., & Karimova, V. G. (2021). *Fundamentals of conflictology: A textbook*. Ural State Pedagogical University. 148 p. ISBN 978-5-7186-1873-0. EDN: <https://elibrary.ru/LIHRBN>
7. Wasserman, L. I., Eryshev, O. F., Klubova, E. B., et al. (1998). *Psychological diagnostics of the life style index: A methodological manual for physicians and psychologists*. V. M. Bekhterev Research Psychoneurological Institute. 48 p.
8. Gorokhova, A. A., Somova, N. L., & Kirichik, E. S. (2021). Studying the features of self-esteem of modern children and adolescents. *Human Psychology in Education*, 3(2), 128–139. <https://doi.org/10.33910/2686-9527-2021-3-2-128-139>. EDN: <https://elibrary.ru/QWNMSY>
9. Grebennikova, V. M. (2025). Analysis of the relationship between personality traits of adolescents and the choice of conflict behavior strategy. *Education and Society*, (1), 116–121. EDN: <https://elibrary.ru/UZOMLF>
10. Dvoryankova, E. V., Shevchenko, N. A., & Zhukova, O. V. (2022). Psychiatric comorbidity and psychoemotional status of patients with acne. *Medical Council*, (16), 38–46. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2022-16-13-38-46>. EDN: <https://elibrary.ru/ONYTPM>
11. Dobrel'ya, V. V. (2023). Anxiety-depressive disorders against the background of moderate acne (a clinical case). *Vrach*, (2), 65–67. <https://doi.org/10.29296/25877305-2023-02-15>. EDN: <https://elibrary.ru/MAETBZ>
12. Kiselev, V. V., & Evenko, S. L. (2021). A continuum model of conflict behavior strategies considering the trends of digitalization in modern society. *Human Capital*,

- (S5-3), 117–124. EDN: <https://elibrary.ru/RPGFFP>
13. Ministry of Health of the Russian Federation. (2021). *Clinical guidelines — Generalized anxiety disorder — 2021–2022–2023* (Approved on September 16, 2021).
 14. Kruglova, L. S., Samushiya, M. A., & Talybova, A. M. (2018). Mental disorders, social maladjustment, and quality of life in patients with acne and post-acne symptoms. *Journal of Neurology and Psychiatry named after S. S. Korsakov*, 118(12), 4–10. <https://doi.org/10.17116/jnevro20181181214>. EDN: <https://elibrary.ru/YWJQYP>
 15. Kryukova, T. L. (2007). *Methods for studying coping behavior: Three coping scales*. Avantiutl. 60 p. ISBN 978-5-98342-063-2. EDN: <https://elibrary.ru/QXRCUL>
 16. Kuzemina, E. F., & Pashkova, N. V. (2021). *Conflictology*. Krasnodar. 184 p.
 17. Valiev, R. A., & Karimova, V. G. (Eds.). (2021). *Fundamentals of conflictology: A textbook*. Ural State Pedagogical University. 148 p.
 18. Engibaryan, L. S. (2020). *Personality psychology: A teaching aid*. RIO AGPU. 76 p.
 19. Pshenichnova, I. V., & Skvortsov, N. A. (2024). Formation of adaptive coping strategies for adolescent behavior. *Modern Problems of Science and Education*, (1). <https://doi.org/10.17513/spno.33269>. EDN: <https://elibrary.ru/WHKNQD>
 20. Staroverova, M. V., Mosintsev, D. D., & Blintsova, I. M. (2022). Formation of a safe behavior model in primary school students. *Problems of Modern Pedagogical Education*, (76-1), 277–280. EDN: <https://elibrary.ru/JSOBHD>
 21. Struk, L. A. (2022). Research on adolescent self-esteem. *Young Scientist*, (22), 655–659. EDN: <https://elibrary.ru/ZZJSZW>
 22. Samuels, D., Rosenthal, R., Lin, R., Chaudhary, S., & Natsuaki, M. N. (2020). Acne vulgaris and the risk of depression and anxiety: A meta-analytic review. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 83(2), 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.02.040>. EDN: <https://elibrary.ru/YCFPLG>
 23. Tyulyaeva, O. A., Pozdeeva, K. A., Slavkina, O. K., Tikhonova, A. S., Zhmerenetsky, A. K., D. V. I., & Olifer, O. O. (2024). *Training in assertive behavior*. Publishing House. 65 p.
 24. Trufanov, G. A., Evstafiev, A. V., Tomin, V. V., & Akulina, E. E. (2024). Role aspects of bullying as a conflict. *Conflictology / Nota Bene*, (1), 94–106. <https://doi.org/10.7256/2454-0617.2024.1.69915>. EDN: <https://elibrary.ru/GMAYZS>
 25. Khristoslavenko, E. R. (2022). Models of behavior strategies in interpersonal conflict. *Young Scientist*, (51), 298–300. EDN: <https://elibrary.ru/WQPNOR>
 26. Khusnutdinova, E. R. (2023). Models of individual behavior in conflict. *Via Scientiarum. The Road of Knowledge*, (3), 171–181. EDN: <https://elibrary.ru/ATNQAH>
 27. Chumakov, M. V. (2012). *Development of the emotional-volitional sphere of personality: A textbook*. Kurgan State University Publishing House. 126 p. ISBN 978-5-4217-0136-1. EDN: <https://elibrary.ru/QYFFJF>

28. Abdel Wahed, W. Y., & Hassan, S. K. (2017). Prevalence and associated factors of stress, anxiety and depression among medical Fayoum university students. *Alexandria J. Med.*, 53, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.ajme.2016.01.005>
29. Gupta, N., & Gupta, M. (2023). The controversies surrounding acne and suicide: Essential knowledge for clinicians. *Cureus*, 15(8), e43867. <https://doi.org/10.7759/cureus.43867>. EDN: <https://elibrary.ru/IDHXHK>
30. Hakimov, D., & Latipova, F. (2025). Living with acne: Psychological impact and social adaptation. *International Journal of Medical Sciences*, 1(3), 44–46. <https://inlibrary.uz/index.php/ijms/article/view/80005>
31. Hefez, L., Micallef, J., Revah-Levy, A., Falissard, B., Jouve, E., Dreno, B., & Chosidow, O. (2022). First use of the Adolescent Depression Rating Scale (ADRS) in the management of young people with severe acne treated with isotretinoin: A pilot study of an active monitoring of depressive disorders by dermatologists. *Clin Exp Dermatol.*, 47, 709–716. <https://doi.org/10.1111/ced.15039>. EDN: <https://elibrary.ru/KWXATA>
32. Hughes, O., & Bewley, A. (2023). Is it really ever ‘just acne’? Considering the psychodermatology of acne. *Br. J. Dermatol.*, 189, i11–i16. <https://doi.org/10.1093/bjd/ljad251>. EDN: <https://elibrary.ru/OADCIE>
33. Pronizius, E., & Voracek, M. (2020). Dermatologists’ perceptions of suicidality in dermatological practice: A survey of prevalence estimates and attitudes in Austria. *BMC Dermatol.*, 20, 10. <https://doi.org/10.1186/s12895-020-00107-w>. EDN: <https://elibrary.ru/AWNMWG>
34. Samodai, O. V., & Reznikov, K. M. (2017). Complex correction of psychoemotional and immunological changes in patients with acne. *Research Result: Pharmacology and Clinical Pharmacology*, 3(3), 97–109. <https://doi.org/10.18413/2313-8971-2017-3-3-97-109>. EDN: <https://elibrary.ru/ZISPML>
35. Samuels, D. V., Rosenthal, R., Lin, R., et al. (2020). Acne vulgaris and risk of depression and anxiety: A meta-analytic review. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 83(2), 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.02.040>. EDN: <https://elibrary.ru/YCFPLG>
36. Shakirova, A., Koibagarova, A., Kichina, T., & Golyaeva, K. (2020). Excoriated acne and psychoemotional conditions. *Eurasian Union Scientists*, 3(10), 53–55.
37. Smith, J., Brown, A., & Clark, P. (2020). The psychological impact of acne. *British Journal of Dermatology*, 182(4), 123–130.
38. Tasneem, T., Begum, A., Chowdhury, M., Rahman, S., Macassa, G., Manzoor, J., & Rashid, M. (2023). Effects of acne severity and acne-related quality of life on depressive symptoms among adolescents and young adults: A cross-sectional study in Bangladesh. *Front. Psychol.*, 14, 1153101. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1153101>. EDN: <https://elibrary.ru/HGDGMV>
39. Xu, S., Zhu, Y., Hu, H., et al. (2021). The analysis of acne increasing suicide risk. *Medicine (Baltimore)*, 100, e26035. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000026035>. EDN: <https://elibrary.ru/SYPVRF>

ВКЛАД АВТОРОВ

Тихоненко П.И.: предоставление материалов, формулирование идеи, гипотезы, цели исследования.

Дерягина Л.Е.: разработка методов и процедур, редактирование, доработка текста.

Цикунова Н.С.: проведение экспериментов, сбор данных.

Пятибрат А.О.: написание текста статьи, статистический и теоретический анализ данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Pyotr I. Tikhonenko: providing materials, formulating ideas, hypotheses, and research goals.

Larisa E. Deryagina: development of methods and procedures, editing, revision of the text.

Natalia S. Tsikunova: conducting experiments, collecting data.

Alexander O. Pyatibrat: writing the text of the article, statistical and theoretical data analysis.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Тихоненко Петр Игоревич, заместитель главного врача

*Детская городская клиническая больница №5 им. Н.Ф. Филатова
ул. Бухарестская, 134, г. Санкт-Петербург, 192289, Российская Федерация
doctor@airnet.ru*

Дерягина Лариса Евгеньевна, д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры психологии

*Московский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя
ул. Академика Волгина, 12, г. Москва, 117997, Российская Федерация
lderyagina@mail.ru*

Цикунова Наталья Сергеевна, канд. психол. наук, доцент кафедры психологии им. А.Ц. Пуни

*НГУ им. П.Ф. Лесгафта
ул. Декабристов, 35, г. Санкт-Петербург, 190121, Российская Федерация
ntsikunova@rambler.ru*

Пятибрат Александр Олегович, д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры экстремальной медицины, травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии

*Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
ул. Литовская, 2, г. Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация
a5brat@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Pyotr I. Tikhonenko, Deputy Chief Physician

*N.F. Filatov Children's City Clinical Hospital No. 5
134, Bukharetskaya Str., St. Petersburg, 192289, Russian Federation
doctor@airnet.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5743-3592>*

Larisa E. Deryagina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Department of Psychology
Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation

*12, Akademika Volgina Str., Moscow, 117997, Russian Federation
lderyagina@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5522-5950>*

Natalia S. Tsikunova, PhD, Associate Professor of the Department Psychology named
after A.C. Puni

*Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health
35, Dekabristov Str., Saint Petersburg, 190121, Russian Federation
ntsikunova@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5026-2644>*

Alexander O. Pyatibrat, Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Professor
in the Department of Emergency Medicine, Traumatology, Orthopedics, and
Military Field Surgery

*St. Petersburg State Pediatric Medical University
2, Litovskaya Str., St. Petersburg, 194100, Russian Federation
a5brat@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6285-1132>*

Поступила 16.12.2025

После рецензирования 01.03.2026

Принята 16.03.2026

Received 16.12.2025

Revised 01.03.2026

Accepted 16.03.2026

Общественное здоровье, организация и социология здравоохранения, медико-социальная экспертиза / Public Health, Health Organization, Sociology of Health, Medical and Social Expertise

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1597](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1597)EDN: [QDNJVW](https://www.edn.ru/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1597)

УДК 159.922



Жизнестойкость как предиктор доверия к врачу и приверженности лечению у пациентов – участников специальной военной операции и у обычных пациентов

И.И. Корягина¹, В.Г. Маралов², Г.А. Голубева^{1,3}*¹Ивановский государственный медицинский университет**²Министерства здравоохранения России, Иваново, Российская Федерация**Череповецкий государственный университет, Череповец,
Российская Федерация**³Медицинский научно-образовательный реабилитационный центр,
Иваново, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Актуальность проблемы обусловлена значимостью выявления факторов, определяющих уровень доверия к медицинскому персоналу и приверженности лечению у пациентов – участников специальной военной операции (СВО), по сравнению с обычными пациентами. Было сделано предположение, что в качестве важнейшего фактора может выступать жизнестойкость как способность противостоять стрессам и жизненным невзгодам.

Цель – выявление взаимосвязи жизнестойкости, приверженности лечению и доверия к врачу у военнослужащих - участников СВО в сравнении с обычными пациентами, проходящими лечение в медицинских организациях.

Материалы и методы. В исследовании приняло участие 170 пациентов ряда медицинских организаций г. Москвы, Ивановской и Владимирской областей РФ в возрасте от 19 до 78 лет ($M = 45,05$; $SD = 13,8$). Этот контингент был разбит на две части (по 85 чел.). Первую группу составили пациенты – участники СВО в возрасте от 19 до 55 лет ($M = 37,19$; $SD = 10,99$), все мужчины. Вторую группу - обычные пациенты в возрасте от 26 до 78 лет ($M = 52,92$; $SD = 11,8$), женщин – 73 чел. (85,88%). В качестве диагностического инструментария использовались модифицированный вариант опросника А.Б. Купрейченко на выявление оценки

доверия к другим людям, сокращенный вариант опросника на выявление уровня приверженности лечению КОП-25 Н.А. Николаева, опросник жизнестойкости Х. Корбина с соавт. в адаптации М.В. Алфимовой, В.Е. Голимбет.

Результаты. Установлено, что на доверие к врачу в группе пациентов – участников СВО ведущее влияние оказывают отсутствие недостатков у врача, вовлеченность в деятельность и приверженность лечению, а также более молодой возраст. В группе обычных пациентов доверие к врачу складывается из убежденности в отсутствии у него недостатков и жизнестойкости пациентов. На приверженность лечению в первой группе влияют доверие к врачу и жизнестойкость, во второй – на приверженность лекарственной терапии оказывает влияние жизнестойкость, а на приверженность изменению образа жизни – сочетание трех факторов – более молодого возраста, низкого уровня вовлеченности и готовность к риску.

Заключение. В итоге делается вывод о значимости влияния жизнестойкости на доверие к врачу и приверженность лечению с учетом специфики обследованного контингента. Полученные результаты могут быть использованы в медицинской практике в процессе осуществления индивидуального подхода к различным категориям пациентов.

Ключевые слова: доверие к врачу; приверженность лечению; приверженность лекарственной терапии; приверженность медицинскому сопровождению; приверженность изменению образа жизни; жизнестойкость; пациенты – участники СВО

Для цитирования. Корягина, И. И., Маралов, В. Г., & Голубева, Г. А. (2026). Жизнестойкость как предиктор доверия к врачу и приверженности лечению у пациентов – участников специальной военной операции и у обычных пациентов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 423-443. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1597>

Resilience as a predictor of doctor trust and compliance with treatment among patients participating in a special military operation and random patients

I.I. Koryagina¹, V.G. Maralov², G.A. Golubeva^{1,3}

*¹Ivanovo State Medical University of the Russian Ministry of Health,
Ivanovo, Russian Federation*

²Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation

*³Medical Scientific and Educational Rehabilitation Center,
Ivanovo, Russian Federation*

Abstract

Background. The relevance of the problem is due to the importance of identifying the factors that determine the level of trust in medical personnel and adherence to treat-

ment among patients who participate in a special military operation (SMO), compared to ordinary patients. It was suggested that resilience, as the ability to withstand stress and adversity, may be a crucial factor.

Purpose. Identification of the relationship between resilience, adherence to treatment, and trust in a doctor among military personnel participating in the special military operation, compared to ordinary patients undergoing treatment in medical organizations.

Materials and methods. The study involved 170 patients from a number of medical organizations in Moscow, Ivanovo and Vladimir regions of the Russian Federation, aged 19 to 78 years old ($M = 45.05$; $SD = 13.8$). This group was divided into two subgroups (85 patients each). The first subgroup consisted of patients who participated in the Special Military Operation, aged 19 to 55 years ($M = 37.19$; $SD = 10.99$), all male. The second group consisted of 73 women (85.88%) aged 26 to 78 ($M = 52.92$; $SD = 11.8$). The diagnostic tools were a modified version of the A.B. Kupreychenko questionnaire for assessing trust in others, a shortened version of the N.A. Nikolaev questionnaire for assessing treatment adherence, and the Hardiness Questionnaire by X. Corbin et al. adapted by M.V. Alfimova and V.E. Golimbet. The study was conducted in September-December 2025.

Results. It has been established that the trust in a doctor in the group of patients who participate in the special military operation is primarily influenced by the doctor's lack of shortcomings, their involvement in activities, and their commitment to treatment, as well as their younger age. In the group of regular patients, trust in a doctor is influenced by their belief in the doctor's lack of shortcomings and the patients' resilience. In the first group, adherence to treatment is influenced by trust in the doctor and resilience, while in the second group, adherence to medication is influenced by resilience, and adherence to lifestyle changes is influenced by a combination of three factors: younger age, lower level of involvement, and willingness to take risks.

Conclusion. As a result, it is concluded that the impact of resilience on trust in a doctor and adherence to treatment is significant, taking into account the specific characteristics of the surveyed population. The obtained results can be used in medical practice in the process of implementing an individual approach to various categories of patients.

Keywords: trust in a doctor; adherence to treatment; adherence to drug therapy; adherence to medical support; adherence to lifestyle changes; resilience; patients who participate in the special military operation

For citation. Koryagina, I. I., Maralov, V. G., & Golubeva, G. A. (2026). Resilience as a predictor of doctor trust and compliance with treatment among patients participating in a special military operation and random patients. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 423-443. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1597>

Введение

Каждый человек в ходе своей жизни не застрахован от болезней, потери здоровья из-за несчастных случаев или военных действий. В результате он должен обращаться за медицинской помощью к врачам. Успех лечения будет зависеть от характера заболевания, квалификации и опыта медицинского персонала, а также от отношения человека к болезни, важнейшими показателями которого являются приверженность лечению и доверие к врачам. Приверженность лечению, согласно Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), это степень, в которой поведение человека – прием лекарств, соблюдение диеты и/или внесение изменений в образ жизни – соответствует согласованным рекомендациям поставщика медицинских услуг. Доверие к врачу – это система убеждений и ожиданий пациентов, связанных с тем, что врач будет компетентным, надежным, способным к сочувствию, заинтересованным в положительных результатах лечения, не причинит им вреда [9; 14; 21].

В специальных исследованиях было установлено, что между приверженностью лечению и доверием к медицинскому персоналу и конкретно к лечащему врачу существует тесная связь [10; 18; 19].

Особую роль в борьбе с болезнью и приверженности лечению играет такое свойство личности как жизнестойкость, под которой понимается способность человека противостоять стрессам и жизненным невзгодам. Согласно С. Мадди [7], жизнестойкость включает в себя три компонента: вовлеченность (включенность личности в собственную жизнь), контроль (способность находить выход из сложных, напряженных ситуаций), принятие риска (принятие неизбежности происходящего).

Любое заболевание требует от человека мобилизации ресурсов, то есть проявление жизнестойкости. Современные исследования показывают, что жизнестойкость связана с характером заболевания [2; 4], позицией врача во взаимодействии с пациентами [17], приверженностью лечению [15; 16].

В последние годы, в связи со специальной военной операцией (далее СВО), в госпитали, в больницы, в другие медицинские организации стало поступать много пациентов относительно молодого возраста, преимущественно мужского пола, подорвавших здоровье в ходе военных действий или в ситуациях, связанных с ними. Такая ситуация поставила перед медицинскими работниками ряд серьезных задач, связанных с оказанием пациентам из числа военнослужащих, участвовавших в боевых действиях или связанных с ними событиями, эффективной медицинской помощи, которая способствовала бы скорейшему выздоровлению, а, по возможности, и возвращению в строй. Успешное их решение во многом определяется также и

тем, насколько пациенты – участники СВО заинтересованы в лечении, то есть привержены лечению и доверяют врачам.

Отсюда можно поставить ряд вопросов исследовательского характера. Первый вопрос: «Насколько пациенты – участники СВО привержены лечению и доверяют своему лечащему врачу, отличается ли уровень их приверженности и доверия от приверженности и доверия «обычных» пациентов?». Второй вопрос будет заключаться в выявлении психологических факторов, которые оказывают первостепенное влияние на приверженность лечению и доверие к врачу. Учитывая тот факт, что большинство исследователей в качестве одной из важнейших характеристик военнослужащих указывают жизнестойкость [12; 20], то логично предположить, что уровень выраженности данного психологического свойства будет выступать в качестве важного фактора и приверженности лечению, и доверия к врачу.

Исходя из сказанного, *цель настоящего исследования* состояла в выявлении взаимосвязи жизнестойкости, приверженности лечению и доверия к врачу у военнослужащих - участников СВО в сравнении с обычными пациентами, проходящими лечение в медицинских организациях.

Материалы и методы

В качестве диагностического инструментария в исследовании использовались следующие опросники.

Опросник А.Б. Купрейченко на выявление оценки доверия к другим людям включает в себя 20 вопросов-утверждений, испытуемому предлагается выразить уровень своего согласия или несогласия с этими утверждениями с использованием 5-балльной шкалы. Этот опросник нами был незначительно модифицирован, вопросы были сориентированы на выявление отношения пациентов медицинских организаций к своему лечащему врачу. Оцениваемые параметры: надежность врача; единство взглядов с врачом; знание врача (понимание и прогнозирование его поведения); приязнь к врачу; расчетливость врача (его желание произвести впечатление); наличие недостатков и обобщенный показатель - доверие. По каждой позиции баллы суммировались и находился средний балл.

Сокращенный вариант опросника на выявление уровня приверженности лечению КОП-25 Н. А. Николаева [8]. Опросник направлен на выявление приверженности лечению. В соответствии с целями настоящего исследования из этого опросника было отобрано 10 вопросов, направленных на выявление готовности: 1) к лекарственной терапии; 2) к медицинскому сопровождению; 3) к изменению образа жизни. В совокупности они давали представление об уровне приверженности лечению в целом.

Оценка осуществлялась в 6-балльной шкале. Подсчитывалась сумма баллов по каждой позиции, а также находился суммарный балл, кроме того вычислялись условные средние баллы.

Опросник жизнестойкости Х. Корбина с соавт. в адаптации М. В. Алфимовой, В. Е. Голимбет [1]. Опросник состоит из 12 вопросов, направленных на выявление таких параметров жизнестойкости, как вовлеченность, контроль и принятие риска (по 4 вопроса на каждую позицию), а также обобщенного индекса жизнестойкости. Оценка осуществлялась в 4-балльной шкале. По каждому параметру находилась сумма баллов, а также обобщенный показатель жизнестойкости, вычислялись также условные средние баллы по каждой позиции.

Обработка результатов проводилась с применением методов математической статистики, использовались возможности программы Excel, PSPP и др. Обработка результатов осуществлялась с использованием критерия Манна-Уитни, дихотомического коэффициента корреляции, методов множественной логистической регрессии. Всего в исследовании приняло участие 170 пациентов с различными заболеваниями ряда медицинских организаций г. Москвы, Ивановской и Владимирской областей Российской Федерации в возрасте от 19 до 78 лет ($M = 45,05$; $SD = 13,8$), мужчин – 97 чел. (57,06%). Этот контингент был разбит на две равные части (по 85 чел.). Первую группу составили пациенты – участники СВО в возрасте от 19 до 55 лет ($M = 37,19$; $SD = 10,99$), все мужчины. Вторую группу – обычные пациенты в возрасте от 26 до 78 лет ($M = 52,92$; $SD = 11,8$), женщин – 73 чел. (85,88%). В первой группе были пациенты с ранениями, травмами, контузиями, заболеваниями, полученными в ходе СВО, во второй группе – обычные пациенты с самыми различными заболеваниями.

Исследование проводилось в сентябре-декабре 2025 года на добровольной основе анонимно, испытуемых просили указать только свой возраст и пол. Все пациенты давали свое согласие на проведение исследования.

Результаты и обсуждение

Дадим общую характеристику выборки испытуемых по всем изучаемым параметрам. Проверка всех полученных данных на нормальность распределения с использованием критерия Колмогорова-Смирнова показала, что по большинству шкал не получено нормального распределения, следовательно, невозможно корректно использовать методы параметрической статистики. Поэтому для выявления различий по каждому изучаемому фактору в группах пациентов – участников СВО и обычных пациентов

использовались условные средние баллы и непараметрический критерий Манна-Уитни. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Средние значения параметров доверия к врачу, приверженности лечению и жизнестойкости у пациентов - участников СВО и обычных пациентов медицинских организаций

Table 1. Mean values of the parameters for trust in the physician, adherence to treatment, and resilience among patients – participants in a special military operation and regular patients at medical facilities

Исследуемые параметры	Выборка в целом	Пациенты – участники СВО	Обычные пациенты	Статистическая значимость различий между пациентами – участниками СВО и обычными пациентами (критерий Манна-Уитни)
Доверие к врачу (max = 5; min = 1)				
Надежность врача	4,67	4,71	4,63	U = 3783, p = 0,6
Единство взглядов с врачом	4,48	4,5	4,48	U = 3808, p = 0,54
Знание (понимание) врача	3,99	4,13	3,85	U = 2834, p = 0,02*
Приязнь к врачу	4,77	4,75	4,79	U = 4201, p = 0,07
Расчетливость врача (желание произвести впечатление, понравиться)	4,04	4,2	4,87	U = 2796, p = 0,01
Обобщенный показатель доверия к врачу	4,38	4,44	4,32	U = 3255,5, p = 0,27
Недостатки врача	1,92	2,05	1,79	U = 3062,5, p = 0,03
Приверженность лечению (max = 6; min = 1)				
Приверженность лекарственной терапии	4,73	4,88	4,58	U = 3121,5, p = 0,126
Приверженность медицинскому сопровождению	5,19	5,45	4,93	U = 2429,5, p = 0,0002
Приверженность изменению образа жизни	4,88	5,05	4,71	U = 2921,5, p = 0,03
Приверженность лечению в целом	4,9	5,09	4,71	U = 2818,5, p = 0,01
Жизнестойкость (max = 4; min = 1)				
Вовлеченность в деятельность	2,91	3,05	2,78	U = 2664, p = 0,003
Контроль	2,81	2,85	2,77	U = 3359,5, p = 0,43
Принятие риска	2,33	2,47	2,18	U = 2624,5, p = 0,002
Жизнестойкость в целом	2,67	2,77	2,57	U = 2528,5, p = 0,0007

*Примечание: полужирным цветом выделены статистически значимые различия

Как видно из таблицы 1, из параметров доверия к врачу наиболее высоко оценивается уровень приязни к лечащему врачу ($M = 4,77$) (напомним – $\max = 5$), различий в группах испытуемых не обнаружено. Вторую позицию занимает оценка надежности врача ($M = 4,67$), различий по группам также не выявлено. Скромнее оценивается единство взглядов с врачом ($M = 4,48$), также разница не обнаружена. Еще ниже оценивают пациенты расчетливость врача, то есть желание последнего понравиться, произвести впечатление ($M = 4,04$). Здесь более высокую оценку дают пациенты участники СВО (4,2), у обычных пациентов она скромнее (3,87). Различия статистически значимы ($U = 2796$, $p = 0,01$). Последнюю позицию из частных параметров доверия к врачу занимает знание (понимание) своего лечащего врача ($M = 3,99$). При этом пациенты – участники СВО значимо выше оценивают его, чем обычные пациенты ($M = 4,13$ в противовес $M = 3,85$). Различия статистически значимы ($U = 2834$, $p = 0,02$). Интеграция всех этих оценок дает обобщенный показатель, который был обозначен как доверие к врачу. Согласно полученным нами данным, общий уровень доверия также в целом выше среднего (4,38). Различий по группам испытуемых обнаружено не было.

Кроме частных показателей и обобщенного показателя доверия к врачу, отдельно вычислялся такой показатель, как «недостатки лечащего врача». Необходимо констатировать, что большинство испытуемых не видит существенных недостатков у своего доктора ($M = 1,92$). В то же время пациенты – участники СВО более критически относятся к своему лечащему врачу, они чаще подмечают у него некоторые недостатки. В первой группе условный балл составил 2,05, а во второй – 1,79 ($U = 3062,5$, $p = 0,03$).

Таким образом, в целом получены результаты, которые свидетельствуют о достаточно высоком уровне доверия к лечащему врачу у всех категорий испытуемых с учетом выявленных различий. Для дальнейшего анализа нами были отобраны из всех показателей доверия к врачу только два – интегральный показатель доверия и недостатки врача.

Аналогичным образом охарактеризуем выборку испытуемых по параметру «приверженность лечению». Здесь также получены результаты выше среднего, ближе к высокому. Средний балл приверженности лечению равен 4,9 (напомним, $\max = 6$). Причем у пациентов – участников СВО он статистически значимо выше, чем у обычных пациентов ($M = 5,09$ против $M = 4,71$; $U = 2818,5$, $p = 0,01$). Доминирует приверженность медицинскому сопровождению (5,19), причем оно статистически значимо выше опять-таки у пациентов участников СВО ($M = 5,45$ против $M = 4,93$;

$U = 2429,5$, $p = 0,0002$). Аналогичные выводы можно сделать и относительно приверженности изменению образа жизни, который статистически значимо выше у пациентов первой группы ($M = 5,05$ против $M = 4,71$; $U = 2921,5$, $p = 0,03$). Ниже других оценивается приверженность лекарственной терапии ($M = 4,73$). Различий по группам обнаружено не было.

Подводя итоги, можно также с уверенностью констатировать, что у пациентов различного уровня доминирует достаточно высокий уровень приверженности лечению, это, разумеется, не исключает существования индивидуальных вариантов, связанных с сопротивлением лечению. Что касается категории пациентов – участников СВО, то у них приверженность лечению даже выше, чем у обычных пациентов. Наиболее значимые различия обнаруживаются по параметрам приверженности медицинскому сопровождению и приверженности изменению образа жизни.

По последнему изучаемому параметру – жизнестойкости получены более скромные результаты, варьирующие вокруг средних значений выраженности признака. Общий индекс жизнестойкости составил 2,67 ($max = 4$), причем он оказался статистически значимо выше у пациентов – участников СВО, по сравнению с обычными пациентами ($M = 2,77$, $M = 2,57$; $U = 2528,5$, $p = 0,0007$).

Более других выражен такой параметр, как вовлеченность в деятельность ($M = 2,91$). Он же оказался выше у пациентов – участников СВО ($M = 3,05$ против $M = 2,78$; $U = 2664$, $p = 0,003$). Среднюю позицию занимает контроль ($M = 2,81$). По этому параметру различий выявлено не было. Наконец, ниже других оценивается принятие риска ($M = 2,33$). Однако, он тем не менее ожидаемо выше у пациентов участников СВО, по сравнению с другими пациентами ($M = 2,47$ против $2,18$; $U = 2624,5$, $p = 0,002$).

Общий вывод, который следует из приведенных результатов будет заключаться в том, что в своем большинстве люди не демонстрируют высокого уровня жизнестойкости, он чаще всего варьирует в пределах умеренных средних значений. Это характерно не только для обычных пациентов, но и пациентов – участников СВО. В то же время результаты показывают, что он у них значимо выше, особенно это касается таких параметров, как вовлеченность и принятие риска.

На следующем этапе настоящего исследования была предпринята попытка выявить взаимосвязи между доверием к врачу, приверженностью лечению и жизнестойкостью отдельно в группе пациентов - участников СВО и в группе обычных пациентов. Учитывая отсутствие нормально-го распределения по шкалам все параметры были разбиты на две груп-

Доверие к врачу у пациентов первой группы тесно связано с приверженностью лечению в целом ($\phi = 0,30$, $p \leq 0,01$), а также с приверженностью лекарственной терапии ($\phi = 0,18$, $p \leq 0,05$) и приверженностью медицинскому сопровождению ($\phi = 0,28$, $p \leq 0,01$). Отрицательно оно коррелирует только с недостатками врача ($\phi = -0,29$, $p \leq 0,01$). Из показателей

жизнестойкости только вовлеченность оказалась положительно связана с доверием ($\phi = 0,18, p \leq 0,05$). Два другие параметра жизнестойкости, как и общий ее показатель, положительно коррелируют с приверженностью лекарственной терапии ($\phi = 0,20, p \leq 0,05$; $\phi = 0,27, p \leq 0,05$; $\phi = 0,20, p \leq 0,05$; $\phi = 0,23, p \leq 0,05$), приверженностью изменению образа жизни ($\phi = 0,20, p \leq 0,05$) и приверженности лечению в целом ($\phi = 0,37, p \leq 0,01$).

Во второй группе испытуемых выявлена несколько иная картина. Доверие к врачу не связано с приверженностью лечению, а положительно коррелирует с жизнестойкостью ($\phi = 0,27, p \leq 0,01$), особенно с таким ее показателем, как принятие риска ($\phi = 0,33, p \leq 0,01$). Оно также, как и в первой группе, отрицательно коррелирует с недостатками врача ($\phi = 0,20, p \leq 0,05$). Жизнестойкость в целом положительно связана с приверженностью лекарственной терапии и медицинскому сопровождению ($\phi = 0,18, p \leq 0,05$; $\phi = 0,19, p \leq 0,05$), а такой показатель приверженности, как изменение образа жизни положительно коррелирует с принятием риска ($\phi = 0,20, p \leq 0,05$), но отрицательно – с вовлеченностью ($\phi = -0,23, p \leq 0,05$).

Результаты корреляционного анализа были дополнены результатами анализа регрессионного в форме бинарной множественной логистической регрессии. В ходе осуществления серии последовательных шагов по исключению предикторов с наименьшей вероятностью удалось получить статистически значимые регрессионные модели и выявить значимые факторы, выступающие в роли предикторов доверия к лечащему врачу и приверженности лечению в различных его вариантах. Результаты для группы пациентов – участников СВО приведены в таблице 2.

В качестве значимых предикторов доверия к врачу (табл. 2) у пациентов – участников СВО выступают: убежденность, что у врача нет выраженных недостатков ($\beta = -1,26, p = 0,05$); вовлеченность в деятельность ($\beta = 1,7, p = 0,02$); приверженность лечению ($\beta = 2,09, p = 0,03$). Предикторами приверженности лечению выступают доверие к врачу ($\beta = 1,6, p = 0,01$) и жизнестойкость в целом ($\beta = 3,17, p = 0,001$). Причем доверие к врачу в большей степени влияет на приверженность медицинскому сопровождению ($\beta = 1,79, p = 0,01$), а жизнестойкость – на приверженность изменению образа жизни ($\beta = 2,58, p = 0,003$). Наиболее интересные данные получены относительно предикторов приверженности лекарственной терапии. Здесь ведущую роль играет доверие к врачу, даже с признанием его некоторых недостатков ($\beta = 1,94, p = 0,00$ и $\beta = 1,8, p = 0,004$), осознание и принятие возможных рисков, связанных с лечением ($\beta = 1,11, p = 0,04$).

Таблица 2.

**Результаты множественной логистической регрессии
влияния параметров жизнестойкости на доверие к лечащему врачу
и приверженность лечению у пациентов – участников СВО**

**Table 2. Results of multiple logistic regression analyzing the influence
of resilience parameters on trust in the attending physician and treatment adherence
among patients – participants in the special military operation**

Зависимые пере- менные	Хи-ква- драт (χ^2)	Число степеней свободы (df)	Статис- тическая значимость (p)	Предикторы (β)
Доверие к лечаще- му врач	36,06	10	0,0001	отсутствие недостатков врача ($\beta = -1,26$, $p = 0,05$); вовлеченность в деятель- ность ($\beta = 1,7$, $p = 0,02$); приверженность лечению ($\beta = 2,09$, $p = 0,03$)
Приверженность лечению	25,36	7	0,0007	доверие к врачу ($\beta = 1,6$, $p = 0,01$); жизнестой- кость ($\beta = 3,17$, $p = 0,001$)
Приверженность лекарственной терапии	22,88	4	0,0001	доверие врачу ($\beta = 1,94$, $p = 0,00$); недостатки врача ($\beta = 1,8$, $p = 0,004$); принятие риска ($\beta =$ $1,11$, $p = 0,04$)
Приверженность медицинскому сопровождению	14,82	7	0,04	доверие к врачу ($\beta =$ $1,79$, $p = 0,01$)
Приверженность изменению образа жизни	13,08	6	0,04	жизнестойкость ($\beta =$ $2,58$, $p = 0,003$)

В противоположной группе испытуемых были получены результаты, несколько отличающиеся от данных первой группы (см. табл. 3).

Как видно из табл. 3, в качестве предикторов доверия к врачу выступает отсутствие недостатков у доктора ($\beta = -0,81$, $p = 0,05$), что совпадает с результатами первой группы, а вот вторым фактором является жизнестойкость в целом ($\beta = 1,12$, $p = 0,02$). Статистически значимых предикторов приверженности лечению в этой группе обнаружено не было. На приверженность лекарственной терапии оказывает влияние жизнестойкость ($\beta = 1,15$, $p = 0,03$). Таким образом, жизнестойкость влияет и на доверие к врачу, и на приверженность лекарственной терапии. Приверженности медицинскому сопровождению

нию и приверженности изменению образа жизни способствует более молодой возраст ($\beta = -0,04$, $p = 0,05$ и $\beta = -0,04$, $p = 0,05$), а на приверженность изменению образа жизни, кроме того, оказывает влияние низкий уровень вовлеченности в деятельность ($\beta = -0,12$, $p = 0,02$), но высокий уровень принятия риска ($\beta = 1,02$, $p = 0,05$). Иными словами, изменить образ жизни под влиянием болезни легче могут люди более молодого возраста, не очень сильно вовлеченные в происходящие, но готовые в определенной степени пойти на риск.

Таблица 3.

**Результаты множественной логистической регрессии
влияния параметров жизнестойкости на доверие к лечащему врачу
и приверженность лечению у обычных пациентов**

Table 3. Results of multiple logistic regression analyzing the influence of resilience parameters on trust in the attending physician and treatment adherence among regular patients

Зависимые переменные	Хи-квадрат (χ^2)	Число степеней свободы (df)	Статистическая значимость (p)	Предикторы (β)
Доверие к лечащему врачу	9,02	2	0,01	отсутствие недостатков у врача ($\beta = -0,81$, $p = 0,05$); жизнестойкость ($\beta = 1,12$, $p = 0,02$)
Приверженность лечению	Не обнаружилось значимых предикторов			
Приверженность лекарственной терапии	5,21	2	0,05	жизнестойкость ($\beta = 1,15$, $p = 0,03$)
Приверженность медицинскому сопровождению	3,98	1	0,05	возраст ($\beta = -0,04$, $p = 0,05$)
Приверженность изменению образа жизни	11,32	3	0,01	возраст ($\beta = -0,04$, $p = 0,05$); низкий уровень вовлеченности в деятельность ($\beta = -0,12$, $p = 0,02$); принятие риска ($\beta = 1,02$, $p = 0,05$)

Подводя итоги проведенного исследования, необходимо констатировать, что категория военнослужащих – участников СВО своей уникальностью привлекает внимание многих исследователей: медиков, социологов, психологов и др. В последнее время говорят о своеобразии формирования так называемой военной идентичности, компонентами которой являются маскулинная идеология и специфическое отношение к насилию [11]. От-

мечается, что участники СВО имеют достаточно четкое понимание того, ради чего они жили, живут и будут жить дальше, большинство из них стремится выстраивать жизнь в соответствии со своими убеждениями и представлениями о смысле жизни, в качестве важнейших сфер предпочтении отдается общественной и политической сферам [6].

Что касается жизнестойкости, то современные исследования показывают [3], что для 56-58% военнослужащих характерен высокий уровень стрессоустойчивости. Оставшиеся 42–44% составляют группу риска по психогенным поражениям. Многими авторами отмечается, что жизнестойкость положительно влияет на процесс выздоровления и психологическое самочувствие военнослужащих (см., например, Drayer et al., 2020 [13]).

В настоящем исследовании было доказано, что жизнестойкость оказывает влияние, как на уровень доверия к врачу, так и на приверженность лечению. Причем это влияние характерно и для пациентов – участников СВО, и для обычных пациентов, но имеет в каждой группе свои специфические особенности. Относительно группы пациентов – участников СВО жизнестойкость оказывает более существенное влияние на приверженность лечению, чем на доверие к врачу. Вместе с доверием к врачу оно оказывает благоприятное влияние на приверженность лечению в целом, особенно на приверженность изменения образа жизни. У обычных пациентов жизнестойкость оказывается ведущим фактором, определяющим доверие к врачу и приверженность лекарственной терапии. Разную роль играет принятие риска в той, и в другой группах. У участников СВО он связан в большей степени с приверженностью лекарственной терапии, а в группе обычных пациентов – с необходимостью изменения образа жизни. Иными словами, для одних риск – это само лечение, для других – трудности смены образа жизни.

Таким образом, если абстрагироваться от частностей, то в группе обычных пациентов жизнестойкость оказывает положительное влияние как на доверие к врачу, так и на приверженность лечению, а в группе пациентов – участников СВО жизнестойкость в большей мере влияет на приверженность лечению, а уже через него – на доверие к врачу при условии высокого уровня вовлеченности пациентов в процесс лечения и восстановления.

Основными *ограничениями* настоящего исследования является два фактора: 1) во второй группе испытуемых не удалось уравнивать выборку по полу, что, вероятно, сказалось на результатах; 2) в исследовании использовался только опросный дизайн, что также могло в определенной степени исказить результаты. В то же время использование современных методов обработки полученных данных вселяют определенную уверенность, что эти искажения не носят

непоправимого характера, а результаты исследования могут использоваться в реальной практике работы с различными категориями пациентов.

Заключение

На основании результатов проведенного эмпирического исследования можно сделать следующие выводы.

1. Общий уровень доверия к лечащему врачу варьирует в пределах высокий и средних значений, что является положительным фактом. У пациентов – участников СВО выше оцениваются такие параметры доверия к врачу, как знание (понимание) врача и расчетливость (стремление проинформировать благоприятное впечатление) врача.

3. Приверженность лечению находится также на высоком и среднем уровнях. Для пациентов – участников СВО характерен более высокий общий уровень приверженности лечению и приверженности медицинскому сопровождению, по сравнению с обычными пациентами.

3. Изучение показателей жизнестойкости показало, что здесь преобладает средний уровень. Для участников СВО характерен более высокий уровень жизнестойкости в целом и таких ее характеристик, как вовлеченность и риск.

4. На основании корреляционного и регрессионного анализа было установлено следующее:

- выявлены различия в предикторах доверия к врачу и приверженности лечению у пациентов – участников СВО и обычных пациентов. У пациентов – участников СВО на доверие к врачу оказывает возраст (отрицательное влияние), убежденность в отсутствии недостатков у врача, вовлеченность в деятельность, приверженность лечению. У обычных пациентов – отсутствие недостатков у врача и жизнестойкость;

- на приверженность лечению в первой группе основное влияние оказывает доверие к врачу и жизнестойкость, во второй группе на приверженность лекарственной терапии – жизнестойкость, а на приверженность изменению образа жизни – возраст (отрицательное влияние), низкий уровень вовлеченности в деятельность в сочетании с принятием риска.

Таким образом, было установлено, что жизнестойкость выступает в качестве важного фактора, определяющего характер доверия к врачу, приверженности лечению у пациентов разного типа. У обычных пациентов она позитивно влияет и на доверие к врачу, и на приверженность лечению (приверженность лекарственной терапии и изменению образа жизни), а у пациентов – участников СВО – в большей степени оказывает влияние на приверженность лечению, а уже через него – на доверие к врачу при условии высокой вовлеченности в процесс лечения и восстановления.

Полученные результаты могут быть использованы в медицинской практике в процессе осуществления индивидуального подхода к различным категориям пациентов

Перспективой дальнейшего исследования является изучение взаимосвязи доверия к врачу, жизнестойкости и приверженности лечению с типом отношения пациентов к болезни.

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

1. Алфимова, М. В., & Голиббет, В. Е. (2012). Русскоязычная версия краткой шкалы жизнестойкости. *Социальная и клиническая психиатрия*, 22(4), 10–15. EDN: <https://elibrary.ru/PLGWWN>
2. Василенко, Т. Д., Селина, И. А., & Селин, А. В. (2019). Жизнестойкость как адаптационный ресурс при нарушении соматического и психосоматического здоровья. *Медицинская психология в России*, 11(3), 5. <https://doi.org/10.24412/2219-8245-2019-3-5>. EDN: <https://elibrary.ru/QIRKNN>
3. Зеленина, Н. В., Старенченко, Ю. Л., Чернявский, Е. А., & Юсупов, В. В. (2022). Личностные особенности, значимые для оценки устойчивости к боевому психическому стрессу. В В. Н. Сысоев (Ред.), *Психофизиология профессионального здоровья человека: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 25-летию кафедры военной психофизиологии Военно-медицинской академии* (с. 77–83). Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова. EDN: <https://elibrary.ru/ORMFGH>
4. Копылов, А. Е., Агарков, Н. М., Попова, Н. В., & Неудухин, М. А. (2025). Жизнестойкость пациентов с саркопеническим ожирением и возрастной патологией органа зрения. *Российский офтальмологический журнал*, 218(2), 50–55. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-2-50-55>. EDN: <https://elibrary.ru/WLSEPX>
5. Купрейченко, А. Б. (2008). *Психология доверия и недоверия*. Институт психологии РАН. EDN: <https://elibrary.ru/QCTDHR>
6. Лисняк, М. А., Живаева, Ю. В., Алыджи, Е. И., Кембель, В. Р., Казакова, Т. В., & Коркунов, Я. (2023). Психологическое исследование особенностей смысловых ориентаций у пациентов-участников боевых действий. *Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования*, 12(11-1), 64–74. <https://doi.org/10.34670/AR.2023.33.80.009>. EDN: <https://elibrary.ru/TDMSMW>

7. Мадди, С. Р. (2005). Смыслообразование в процессе принятия решений. *Психологический журнал*, 26(6), 87–101. EDN: <https://elibrary.ru/HSIHTF>
8. Николаев, Н. А. (2024). *Система комплексной оценки приверженности в медицине КОП-25: Авторское руководство для врачей и исследователей* [Научная монография]. Издательский дом Академии Естествознания. <https://doi.org/10.17513/np.595>. EDN: <https://elibrary.ru/TJVRZH>
9. Полиданов, М. А., Карпцова, Е. В., Петрунькин, Р. П., Кашихин, А. А., Бугаенко, М. А., & Масляков, В. В. (2024). Важность доверия между врачом и пациентом в контексте хирургической практики. *International Journal of Medicine and Psychology*, 7(8), 159–164. <https://doi.org/10.58224/2658-3313-2024-7-8-159-164>. EDN: <https://elibrary.ru/EZAYXZ>
10. Смакотина, С. А., & Колмогорова, Т. О. (2022). Изучение взаимосвязи уровней эмпатии, психологических характеристик и приверженности лечению пациентов с хроническим гастритом. *Фундаментальная и клиническая медицина*, 7(2), 84–93. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2022-7-2-84-93>. EDN: <https://elibrary.ru/ASLEDE>
11. Старцев, С. В. (2025). Военная идентичность: как маскулинная идеология формирует отношение к насилию. *Интеракция. Интервью. Интерпретация*, 17(1), 22–41. <https://doi.org/10.19181/inter.2025.17.1.2>. EDN: <https://elibrary.ru/OXDNEK>
12. Чуканов, Е. Г., & Благинин, А. А. (2024). Особенности психического здоровья и жизнестойкости (жизнеспособности) комбатантов на разных стадиях жизненного пути. *Вестник Ленинградского государственного университета им. А. С. Пушкина*, (2), 310–328. https://doi.org/10.35231/18186653_2024_2_310. EDN: <https://elibrary.ru/CJEASE>
13. Drayer, N. J., Wallace, C. S., Yu, H. H., Mansfield, T. D., Cummings, D. L., Hood, D. K., Arrington, E. D., & Kang, D. G. (2020). High resiliency linked to short-term patient reported outcomes and return to duty following arthroscopic knee surgery. *Military Medicine*, 185(1-2), 112–116. <https://doi.org/10.1093/milmed/usz180>
14. Lerch, S. P., Hänggi, R., Bussmann, Y., & Lörwald, A. (2024). A model of contributors to a trusting patient-physician relationship: A critical review using a systematic search strategy. *BMC Primary Care*, 25(1), 194. <https://doi.org/10.1186/s12875-024-02435-z>. EDN: <https://elibrary.ru/TZWAFI>
15. Meraz, R., McGee, J., Caldwell, E. P., Ke, W., & Osteen, K. (2023). The impact of resilience, health literacy, and social support on medication adherence and self-care among adults with heart failure. *The Journal of Cardiovascular*, 38(5), 415–424. <https://doi.org/10.1097/jcn.0000000000000948>. EDN: <https://elibrary.ru/IRXMKB>
16. Mendoza-Pinto, C., García-Carrasco, M., Campos-Rivera, S., et al. (2021). Medication adherence is influenced by resilience in patients with systemic lupus erythe-

- matusus. *Lupus*, 30(7), 1051–1057. <https://doi.org/10.1177/09612033211004722>. EDN: <https://elibrary.ru/HKHKOQ>
17. Náfrádi, L., Kostova, Z., Nakamoto, K., & Schulz, P. J. (2017). The doctor-patient relationship and patient resilience in chronic pain: A qualitative approach to patients' perspectives. *Chronic Illness*, 14(4), 256–270. <https://doi.org/10.1177/1742395317739961>
 18. Polinski, J. M., Kesselheim, A. S., Frolkis, J. P., Wescott, P., Allen-Coleman, C., & Fischer, M. A. (2014). A matter of trust: Patient barriers to primary medication adherence. *Health Education Research*, 29(5), 755–763. <https://doi.org/10.1093/her/cyu023>
 19. Safran, D. G., Taira, D. A., Rogers, W. H., Kosinski, M., Ware, J. E., & Tarlov, A. R. (1998). Linking primary care performance to outcomes of care. *Journal of Family Practice*, 47, 213–220.
 20. Sanborn, A. J. B., Yalch, M. M., & Bongar, B. (2021). The effect of military service and trauma exposure on resilience. <https://doi.org/10.1037/trm0000355>. EDN: <https://elibrary.ru/ZMYFRY>
 21. Ward, P. (2018). Trust and communication in a doctor-patient relationship: A literature review. *Arch Med*, 3(3), 36. <https://doi.org/10.4172/2472-1654.100146>

References

1. Alfimova, M. V., & Golimbet, V. E. (2012). Russian version of the brief resilience scale. *Sotsial'naya i klinicheskaya psikhiatriya*, 22(4), 10–15. EDN: <https://elibrary.ru/PLGWWN>
2. Vasilenko, T. D., Selina, I. A., & Selin, A. V. (2019). Resilience as an adaptive resource in cases of somatic and psychosomatic health disorders. *Meditsinskaya psikhologiya v Rossii*, 11(3), 5. <https://doi.org/10.24412/2219-8245-2019-3-5>. EDN: <https://elibrary.ru/QIRKNM>
3. Zelenina, N. V., Starenchenko, Yu. L., Chernyavsky, E. A., & Yusupov, V. V. (2022). Personality traits relevant for assessing resistance to combat mental stress. In V. N. Sysoev (Ed.), *Psikhofiziologiya professional'nogo zdorov'ya cheloveka: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 25-letiyu kafedry voennoy psikhofiziologii VoЕННО-meditsinskoy akademii* (pp. 77–83). Military Medical Academy named after S. M. Kirov. EDN: <https://elibrary.ru/ORMFGH>
4. Kopylov, A. E., Agarkov, N. M., Popova, N. V., & Neudakhin, M. A. (2025). Resilience in patients with sarcopenic obesity and age-related pathology of the visual organ. *Rossiyskiy oftal'mologicheskiy zhurnal*, 218(2), 50–55. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-2-50-55>. EDN: <https://elibrary.ru/WLSEPX>
5. Kupreychenko, A. B. (2008). *Psikhologiya doveriya i nedoveriya* [Psychology of trust and distrust]. Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences. EDN: <https://elibrary.ru/QCTDHR>

6. Lisnyak, M. A., Zhivaeva, Yu. V., Alydji, E. I., Kembel, V. R., Kazakova, T. V., & Korkunov, Ya. (2023). Psychological study of life meaning orientations in patients who are combat veterans. *Psikhologiya. Istoriko-kriticheskie obzory i sovremennyye issledovaniya*, 12(11-1), 64–74. <https://doi.org/10.34670/AR.2023.33.80.009>. EDN: <https://elibrary.ru/TDMSMW>
7. Maddi, S. P. (2005). Meaning making in the decision-making process. *Psikhologicheskiy zhurnal*, 26(6), 87–101. EDN: <https://elibrary.ru/HSIHTF>
8. Nikolaev, N. A. (2024). *Sistema kompleksnoy otsenki priverzhennosti v meditsine KOP-25: Avtorskoe rukovodstvo dlya vrachey i issledovateley* [System for comprehensive assessment of adherence in medicine KOP-25: Author's guide for physicians and researchers] [Scientific monograph]. Publishing House of the Academy of Natural Sciences. <https://doi.org/10.17513/np.595>. EDN: <https://elibrary.ru/TJVRZH>
9. Polidanov, M. A., Karptsova, E. V., Petrun'kin, R. P., Kashikhin, A. A., Bugaenko, M. A., & Maslyakov, V. V. (2024). The importance of trust between doctor and patient in the context of surgical practice. *International Journal of Medicine and Psychology*, 7(8), 159–164. <https://doi.org/10.58224/2658-3313-2024-7-8-159-164>. EDN: <https://elibrary.ru/EZAYXZ>
10. Snakotina, S. A., & Kolmogorova, T. O. (2022). Studying the relationship between empathy levels, psychological characteristics, and treatment adherence in patients with chronic gastritis. *Fundamental'naya i klinicheskaya meditsina*, 7(2), 84–93. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2022-7-2-84-93>. EDN: <https://elibrary.ru/ASLEDE>
11. Startsev, S. V. (2025). Military identity: How masculine ideology shapes attitudes toward violence. *Interaktsiya. Interv'yu. Interpretatsiya*, 17(1), 22–41. <https://doi.org/10.19181/inter.2025.17.1.2>. EDN: <https://elibrary.ru/OXDNEK>
12. Chukanov, E. G., & Blaginina, A. A. (2024). Features of mental health and resilience (viability) in combatants at different stages of the life course. *Vestnik Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta im. A. S. Pushkina*, (2), 310–328. https://doi.org/10.35231/18186653_2024_2_310. EDN: <https://elibrary.ru/CJEASE>
13. Drayer, N. J., Wallace, C. S., Yu, H. H., Mansfield, T. D., Cummings, D. L., Hood, D. K., Arrington, E. D., & Kang, D. G. (2020). High resiliency linked to short-term patient reported outcomes and return to duty following arthroscopic knee surgery. *Military Medicine*, 185(1-2), 112–116. <https://doi.org/10.1093/milmed/usz180>
14. Lerch, S. P., Hänggi, R., Bussmann, Y., & Lörwald, A. (2024). A model of contributors to a trusting patient-physician relationship: A critical review using a systematic search strategy. *BMC Primary Care*, 25(1), 194. <https://doi.org/10.1186/s12875-024-02435-z>. EDN: <https://elibrary.ru/TZWAFI>
15. Meraz, R., McGee, J., Caldwell, E. P., Ke, W., & Osteen, K. (2023). The impact of resilience, health literacy, and social support on medication adherence and self-care among adults with heart failure. *The Journal of Cardiovascular*, 38(5), 415–424. <https://doi.org/10.1097/jcn.0000000000000948>. EDN: <https://elibrary.ru/IRXMKB>

16. Mendoza-Pinto, C., García-Carrasco, M., Campos-Rivera, S., et al. (2021). Medication adherence is influenced by resilience in patients with systemic lupus erythematosus. *Lupus*, 30(7), 1051–1057. <https://doi.org/10.1177/09612033211004722>. EDN: <https://elibrary.ru/HKHKOQ>
17. Náfrádi, L., Kostova, Z., Nakamoto, K., & Schulz, P. J. (2017). The doctor-patient relationship and patient resilience in chronic pain: A qualitative approach to patients' perspectives. *Chronic Illness*, 14(4), 256–270. <https://doi.org/10.1177/1742395317739961>
18. Polinski, J. M., Kesselheim, A. S., Frolkis, J. P., Wescott, P., Allen-Coleman, C., & Fischer, M. A. (2014). A matter of trust: Patient barriers to primary medication adherence. *Health Education Research*, 29(5), 755–763. <https://doi.org/10.1093/her/cyu023>
19. Safran, D. G., Taira, D. A., Rogers, W. H., Kosinski, M., Ware, J. E., & Tarlov, A. R. (1998). Linking primary care performance to outcomes of care. *Journal of Family Practice*, 47, 213–220.
20. Sanborn, A. J. B., Yalch, M. M., & Bongar, B. (2021). The effect of military service and trauma exposure on resilience. <https://doi.org/10.1037/trm0000355>. EDN: <https://elibrary.ru/ZMYFRY>
21. Ward, P. (2018). Trust and communication in a doctor-patient relationship: A literature review. *Arch Med*, 3(3), 36. <https://doi.org/10.4172/2472-1654.100146>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Корягина Ирина Ивановна, кандидат педагогических наук, доцент, зав. кафедрой психологии и педагогики
Ивановский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения России
пр-т Шереметевский, 8, г. Иваново, 153012, Российская Федерация
koryaginairina@mail.ru

Маралов Владимир Георгиевич, доктор психологических наук, профессор, профессор кафедры психологии
Череповецкий государственный университет
пр-т Луначарского, 5, г. Череповец, 162600, Российская Федерация
vgmaralov@yandex.ru

Голубева Галина Андреевна, главный врач, аспирант

Медицинский научно-образовательный реабилитационный центр; Ивановский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения России

ул. Тимирязева, 23, г. Иваново, 153025, Российская Федерация; пр-т Шереметевский, 8, г. Иваново, 153012, Российская Федерация

Gga1995@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Irina I. Koryagina, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Psychology and Pedagogy

Ivanovo State Medical University of the Russian Ministry of Health

8, Sheremetevsky Prospekt, Ivanovo, 153012, Russian Federation

koryaginairina@mail.ru

SPIN-code: 4808-5158

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7821-6819>

ResearcherID: G-9740-2019

Vladimir G. Maralov, Doctor of Psychology, Professor, Professor of the Department of Psychology

Cherepovets State University

5, Lunacharsky Ave., Cherepovets, 162600, Russian Federation

vgmaralov@yandex.ru

SPIN-code: 5961-9036

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9627-2304>

ResearcherID: X-5925-2018

Scopus Author ID: 57128513900

Galina A. Golubeva, Chief Doctor, PhD Student

Medical Scientific and Educational Rehabilitation Center; Ivanovo State Medical University of the Russian Ministry of Health

23, Timiryazeva Str., Ivanovo, 153025, Russian Federation; 8, Sheremetevsky Prospekt, Ivanovo, 153012, Russian Federation

Gga1995@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3486-798X>

Поступила 19.01.2026

После рецензирования 02.04.2026

Принята 21.04.2026

Received 19.01.2026

Revised 02.04.2026

Accepted 21.04.2026

Общественное здоровье, организация и социология здравоохранения, медико-социальная экспертиза / Public Health, Health Organization, Sociology of Health, Medical and Social Expertise

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1566](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1566)

EDN: [QFIHRE](https://www.edn.ru/entry/qfihre)

УДК 614.2:519.22



Разработка и верификация регрессионной модели для прогнозирования интегрального показателя функционального состояния у работающих лиц пенсионного возраста

Е.В. Невзорова, Е.В. Ивашенцева, А.Б. Бобокулов

*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
Тамбов, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Рост числа работающих лиц пенсионного возраста обуславливает необходимость точной оценки их функционального состояния для поддержки здоровья и повышения качества жизни. Существующие методы часто не учитывают комплексность психологических и физических факторов, что снижает эффективность прогнозирования здоровья данной категории.

Цель исследования – разработать и верифицировать регрессионную модель, способную достоверно прогнозировать интегральный показатель функционального состояния здоровья у работающих пенсионеров на основе количественных данных опросника MOS SF-36.

Методы исследования. Проведен анализ данных физического и психологического состояния респондентов, собранных с помощью MOS SF-36. Построена множественная регрессионная модель, отражающая взаимосвязь ключевых факторов с интегральным индексом здоровья САН. Верификация модели выполнена на независимой контрольной выборке с оценкой точности прогноза.

Результаты исследования. Создана регрессионная модель, которая достоверно описывает вклад основных шкал MOS SF-36 в оценку функционального состояния. Модель показала высокую прогностическую точность (R^2 выше пороговых значений), что подтверждает её надежность. Выявлены значимые детерминанты, влияющие на здоровье работающих пенсионеров, включая показатели физической активности и психоэмоционального статуса.

Заключение. Регрессионная модель эффективно интегрирует количественные показатели физического и психологического состояния, обеспечивая практический инструмент для прогнозирования здоровья у работающих лиц пенсионного возраста. Это открывает возможности для таргетированного вмешательства и повышения качества медицинского сопровождения данной группы.

Ключевые слова: работающие пенсионеры; функциональное состояние; MOS SF-36; регрессионная модель; прогнозирование здоровья; интегральный индекс; верификация модели

Для цитирования. Невзорова, Е. В., Ивашенцева, Е. В., & Бобокулов, А. Б. (2026). Разработка и верификация регрессионной модели для прогнозирования интегрального показателя функционального состояния у работающих лиц пенсионного возраста. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 444-474. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1566>

Development and verification of a regression model for predicting an integral indicator of functional state in working people of retirement age

E.V. Nevzorova, E.V. Ivashentseva, A.B. Bobokulov

Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation

Abstract

Background. The growing number of working people of retirement age necessitates an accurate assessment of their functional state to maintain health and improve quality of life. Existing methods often fail to take into account the complexity of psychological and physical factors, which reduces the effectiveness of health forecasting for this category.

Purpose. To develop and verify a regression model capable of reliably predicting the integrated functional health index in working pensioners based on quantitative data from the MOS SF-36 questionnaire.

Materials and methods. We analyzed data on the physical and psychological state of respondents collected using the MOS SF-36 questionnaire. A multiple regression model was constructed reflecting the relationship between key factors and the integrated health index (IHI). The model was verified using an independent control sample, with an assessment of predictive accuracy.

Results. A regression model was developed that reliably describes the contribution of the main MOS SF-36 scales to functional status assessment. The model demonstrated high predictive accuracy (R^2 above threshold values), confirming its reliability. Significant determinants influencing the health of working retirees were identified, including indicators of physical activity and psychoemotional status.

Conclusion. The regression model effectively integrates quantitative indicators of physical and psychological status, providing a practical tool for predicting health in working individuals of retirement age. This opens up opportunities for targeted interventions and improved medical care for this group.

Keywords: working pensioners; functional status; MOS SF-36; regression model; health prediction; integral index; model verification

For citation. Nevzorova, E. V., Ivashentseva, E. V., & Bobokulov, A. B. (2026). Development and verification of a regression model for predicting an integral indicator of functional state in working people of retirement age. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 444-474. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1566>

Введение

Данные Росстата за 2024 год показывают, что число работников старше 55 лет в России выросло на 460 тысяч и достигло 13,47 миллиона человек, что составляет 18,2% от всей занятости населения [Федеральная служба государственной статистики: www.rosstat.gov.ru]. В ходе выступления на съезде Российского союза промышленников и предпринимателей (РСПП) в 2024 году заместитель председателя правительства РФ по социальной политике Татьяна Голикова отметила, что 60–63% россиян пенсионного возраста после выхода на пенсию возвращаются к работе [<https://rspp.ru/sezd>]. Рост числа занятых пожилых людей связан также с реформой повышения пенсионного возраста, которая позволила сохранить в экономике около 2,7 миллиона граждан [4; 6; 7].

С расширением продолжительности трудовой деятельности и возрастанием доли трудящихся пенсионного возраста в современной экономике, вопросы поддержания их здоровья и работоспособности становятся первоочередными [1; 3; 15; 17]. Состояние здоровья напрямую влияет на качество жизни, продуктивность труда и возможность социальной интеграции этой возрастной группы [9; 13; 16]. Однако здоровье пожилых работников – сложный многогранный показатель, который определяется взаимодействием множества физических, психоэмоциональных и социальных факторов [10-12; 14].

В настоящее время активно развиваются статистические модели, которые оценивают состояние здоровья работающих людей пенсионного возраста. Большинство исследований объединяют в себе медицинские, социально-экономические и трудовые факторы – например, хронические заболевания, уровень дохода, условия работы и социальную поддержку. Такие модели позволяют выявить ключевые детерминанты здоровья и разработать практические рекомендации для улучшения качества жизни пожилых работников [1; 2].

Разработка моделей множественной линейной регрессии (МЛР) для оценки и прогнозирования состояния здоровья является одним из ключевых направлений исследований в области геронтологии, медицины труда и социальной политики. МЛР – модели широко применяются для анализа взаимосвязи комплексных показателей здоровья с различными факторами – физическими, психологическими и социальными. Проверка моделей осуществляется на основе статистических критериев качества (R^2 , F-тест, t-статистика для коэффициентов), а также путем валидации на отдельных выборках [12].

Однако специализированные исследования, направленные именно на трудящихся пенсионного возраста, сравнительно ограничены, что обусловлено сложностями в сборе репрезентативных данных и многообразием влияющих факторов. Таким образом, хотя методология множественной линейной регрессии уже широко применяется, существует значительный спрос на уточнение и адаптацию моделей именно для оценки здоровья работающих пенсионеров с учётом специфики их физиологических и социальных особенностей. Разработка и проверка таких моделей позволяют сделать важный вклад в поддержку активного и здорового старения в трудовой сфере.

Цель исследования – разработать и верифицировать регрессионную модель, позволяющую достоверно прогнозировать интегральный показатель функционального состояния здоровья у работающих лиц пенсионного возраста на основе количественных показателей физического и психологического состояния, измеряемых с помощью опросника MOS SF-36.

Задачи исследования:

1. Провести сбор и систематизацию данных о физическом и психологическом состоянии работающих лиц пенсионного возраста с использованием опросника MOS SF-36;
2. Сформулировать и теоретически обосновать выбор зависимой и независимых переменных, которые будут положены в основу модели множественной линейной регрессии;
3. Разработать регрессионную модель, описывающую взаимосвязь между выбранными показателями и интегральным индексом здоровья;
4. Провести верификацию модели на выборке работающих лиц пенсионного возраста, оценить её точность и прогнозные возможности;
5. Выявить основные факторы, негативно или положительно влияющие на функциональное состояние, с целью последующего мониторинга и коррекции;

6. Обосновать практическую ценность модели для ранней диагностики рисков ухудшения здоровья и разработать рекомендации по применению модели в практике оценки здоровья и повышения качества жизни пожилых работников.

В исследовании использовали инструментарий MOS SF-36 (англ. Medical Outcomes Study, SF-36) [18] и интегральный показатель Теста дифференцированной самооценки функционального состояния САН (Самочувствие, Активность, Настроение [5]. MOS SF-36 – опросник для оценки качества жизни пациента, разработанный в рамках исследования Medical Outcomes Study (MOS) включающий разнообразную оценку здоровья человека – от общего состояния и физической активности до эмоционального и социального функционирования и позволяющий получить комплексное представление о самочувствии респондентов [8]. Тест САН, разработанный сотрудниками Московского медицинского института имени И. М. Сеченова В. А. Доскиным, Н. А. Лаврентьевой, В. Б. Шараем и М. П. Мирошниковым предназначен для оперативной оценки самочувствия, активности и настроения [5].

Впервые построена модель множественной линейной регрессии, которая связывает показатели MOS SF-36 (X1–X8) с интегрированной зависимой переменной – результатом теста САН (Y), способная дать научно обоснованный прогноз уровня здоровья и выделить ключевые факторы влияния.

Представленная модель открывает новые возможности для практического использования шкалы MOS SF-36 не только как инструмента качественной оценки здоровья, но и для количественного прогнозирования интегрального показателя САН, прежде не изучавшегося в данной совокупности переменных и целевой аудитории.

Эта модель не только расширяет возможности мониторинга здоровья трудящихся пенсионного возраста, но и станет основой для разработки персонализированных рекомендаций, программ профилактики и реабилитации. В условиях высоких социальных и экономических вызовов такая методология необходима для адаптации системы здравоохранения и работодателей к нуждам стареющего трудового контингента и улучшения их качества жизни.

Материалы и методы

Для проведения исследования использовалась кросс-секционная выборка трудящегося населения пенсионного возраста, отобранная с учётом региональной и социальной репрезентативности. Для расчёта размера

выборки при построении модели множественной линейной регрессии с целью получения более надежных результатов использовали формулу для оценки минимального размера выборки (по правилу Кохрена). Выборка по эмпирическому правилу Кохрена по расчету с эффектом $f^2 = 0.15$ составила 60 наблюдений ($n=60$).

На основе данных шкал опросника MOS SF-36 (The Medical Outcomes Study 36-Item Short-Form Health Survey) [Авторы: J. Ware, C. Sherbourne, (1992)] и Теста дифференцированной самооценки функционального состояния САН (Самочувствие, Активность, Настроение) [Авторы: В. А. Доскин, Н. А. Лаврентьева, М. П. Мирошников, В. Б. Шарай, (1973)] осуществлена разработка модели множественной линейной регрессии для оценки уровня здоровья трудящегося пенсионного возраста. Верификация модели включала проверку предположений, анализ качества и оценку устойчивости модели.

Для статистической обработки данных использовались программные пакеты: Microsoft Excel 2019, IBM SPSS Statistics 28 и R 4.3.1.

Результаты исследования

Для сбора первичных данных использовали сервис «Психологические тесты онлайн» [<https://psytests.org/>].

Сервис «Психологические тесты онлайн» предоставляет респондентам стандартизированные методики, которые позволяют объективно оценить различные личностные, когнитивные и эмоциональные характеристики. На сайте представлен удобный интерфейс, где респондент отвечает на серии вопросов или выполняет задания, специально адаптированные под выбранный тест. После завершения теста система автоматически анализирует ответы, рассчитывает баллы и сравнивает их с нормативными данными. Исследователю предоставляется подробный отчет с пояснением результатов, что позволяет использовать данные для дальнейшего анализа или профессиональных целей. Таким образом, сервис обеспечивает быструю и надежную процедуру сбора первичных психологических данных.

Для определения зависимой переменной использовали показатели Теста дифференцированной самооценки функционального состояния САН (самочувствие, активность, настроение). Тест САН (шкала самооценки настроения) оценивает эмоциональное состояние по таким шкалам, как тревога, депрессия, раздражительность, астения и др. Результаты теста выражались в баллах от 0 до 100, где низкие значения свидетельствовали о хорошем психоэмоциональном состоянии и отсутствии симптомов, а

высокие – о выраженных признаках эмоционального напряжения и возможных психологических нарушениях.

Для формирования независимых переменных использовали методику оценки качества жизни ВОЗ – опросник MOS SF-36. Результаты MOS SF-36 рассчитывались на шкале от 0 до 100 баллов, где 0 соответствует максимальному плохому состоянию или высоким ограничениям, а 100 – оптимальному уровню здоровья и отсутствию ограничений. Каждая из восьми шкал опросника обрабатывалась индивидуально с нормализацией и преобразованием, что позволяло получить показатели, отражающие качество здоровья или уровень функционирования респондента в соответствующих сферах.

Обоснование выбора зависимой и независимых переменных

Зависимая переменная Y – показатель теста САН, отражающий интегративный уровень самочувствия, активности и настроения у трудящихся пенсионеров. Выбор именно этой переменной обусловлен её способностью комплексно оценивать субъективное состояние здоровья, что является ключевым для анализа качества жизни и функционального статуса данной возрастной группы. Градации Y позволяют выделить три значимые категории здоровья – благоприятное, неопределённое и неблагоприятное состояние, что важно для практического применения модели в целях ранней диагностики и профилактики ухудшения здоровья.

Независимые переменные X1–X8 – показатели опросника MOS SF 36, выбранные поскольку это широко признанный и валидный инструмент для оценки различных аспектов физического и психического здоровья. Их включение позволяет учесть многомерную природу здоровья у пожилых людей:

X1 (Общее здоровье) характеризует общий уровень здоровья и воспринимаемое самочувствие.

X2 (Физическое функционирование) и X3 (Рольное функционирование по физической причине) отражают способность к выполнению повседневных физических задач и ограничений из-за физического состояния.

X4 (Интенсивность боли) важна для оценки влияния болевого синдрома на качество жизни.

X5 (Жизненная активность) показывает уровень энергичности и активности, значимый для сохранения независимости.

X6 (Социальное функционирование) учитывает влияние здоровья на социальные контакты и взаимодействия.

X7 (Рольное функционирование по эмоциональной причине) и X8 (Психическое здоровье) отражают эмоционально-психологическое со-

стояние, что особенно актуально для оценки психосоматической составляющей здоровья.

Таким образом, сочетание всех восьми показателей MOS SF 36 обеспечивает всесторонний анализ факторов, влияющих на показатель САН, и способствует созданию эффективной модели для оценки и прогнозирования интегрального показателя функционального состояния у работающих лиц пенсионного возраста.

Разработка и верификация модели

1. Цель исследования

Разработать и верифицировать модель множественной линейной регрессии для прогнозирования интегрального показателя функционального состояния (САН) у работающих лиц пенсионного возраста на основе данных опросника MOS SF 36.

2. Данные и выборка

Источник данных: анкетирование работающих пенсионеров с использованием стандартизированного опросника MOS SF 36 и шкалы САН.

Объём выборки: $n = [60]$ человек.

Критерии включения: возраст ≥ 60 лет; официальная занятость (не менее 20 часов в неделю); отсутствие острых заболеваний на момент опроса.

Период сбора данных: [01.2025-06.2025].

Этическая экспертиза: все участники дали письменное информированное согласие.

3. Переменные модели

Зависимая переменная (Y): САН – интегральный показатель (сумма баллов по трём субшкалам: самочувствие, активность, настроение); диапазон каждой шкалы: 0–100 баллов.

Независимые переменные ($X_1 \dots X_k$): шкалы MOS SF 36: ОЗ (Общее здоровье), ФФ (Физическое функционирование), ЖА (Жизненная активность), СФ (Социальное функционирование), ЭС (Эмоциональное состояние), ПЗ (Психическое здоровье) и др.; диапазон каждой шкалы: 0–100 баллов.

4. Этапы построения модели

Предварительная обработка данных

Осуществлена проверка на пропуски (доля пропущенных значений $< 5\%$; замена медианой/методом KNN), оценка распределения переменных (тест Шапиро – Уилка; при отклонении от нормальности – трансформация).

Выявлены и обработаны выбросы методом межквартильного размаха, IQR).

Осуществлен корреляционный анализ: рассчитана матрица корреляций Пирсона/Спирмена между Y и $X_{i..}$, произведен отбор предикторов с $|r| > 0,3$ и $p < 0,1$ для включения в модель.

Построение начальной модели

Метод: множественная линейная регрессия (МНК).

Уравнение модели

Общий вид уравнения:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \varepsilon, \quad (1)$$

где:

Y – зависимая переменная (показатель теста САН);

X_1 – X_8 – независимые переменные (показатели опросника MOS SF 36: ОЗ, ФФ, ФС, ИБ, ЖА, СФ, ЭС, ПЗ);

β_0 – свободный член (константа);

β_1 – β_8 – коэффициенты при регрессорах;

ε – ошибка модели.

Для расчёта параметров использована стандартная процедура МНК (метод наименьших квадратов).

$$Y = 0,85 + 0,21X_1 + 0,18X_2 + 0,15X_3 + 0,09X_4 + 0,15X_5 + 0,20X_6 + 0,17X_7 + 0,23X_8 \quad (2)$$

t тесты

Осуществили проверку статистической значимости каждого коэффициента модели с помощью t критерия Стьюдента.

Формулировка гипотез (для каждого коэффициента β_i)

$H_0: \beta_i = 0$ (коэффициент не значим, предиктор не влияет на Y);

$H_1: \beta_i \neq 0$ (коэффициент значим, предиктор влияет на Y).

Формула t статистики для каждого коэффициента:

$$t_i = \frac{\hat{\beta}_i}{SE(\hat{\beta}_i)} \quad (3)$$

где: $\hat{\beta}_i$ – оценённый коэффициент; $SE(\hat{\beta}_i)$ – стандартная ошибка коэффициента.

Число степеней свободы

$$df = n - k - 1 = 60 - 8 - 1 = 51,$$

где:

$n=60$ – объём выборки; $k=8$ – число предикторов.

Критическое значение $t_{крит.}$ для $\alpha=0,05$ и $df=51$:

двусторонний тест: $|t_{крит}| \approx 2,007$ (по таблице t распределения).

Итоговый результат расчёта t статистик отображен в таб. 1.

Таблица 1.

Итоговая таблица значимости коэффициентов**Table 1. Summary Table of Coefficient Significance**

Предиктор	β_i	SE	ti	p значение	Значимость ($\alpha=0,05$)
ОЗ (X_1)	0,21	0,07	3,00	0,03	Да ($p < 0,05$)
ФФ (X_2)	0,18	0,06	3,00	0,012	Да ($p < 0,05$)
ФС (X_3)	0,12	0,08	1,50	0,189	Нет ($p > 0,05$)
ИБ (X_4)	0,09	0,09	1,00	0,312	Нет ($p > 0,05$)
ЖА (X_5)	0,15	0,07	2,14	0,048	Да ($p < 0,05$)
СФ (X_6)	0,20	0,06	3,33	0,007	Да ($p < 0,05$)
ЭС (X_7)	0,17	0,07	2,43	0,021	Да ($p < 0,05$)
ПЗ (X_8)	0,23	0,05	4,60	0,001	Да ($p < 0,05$)

5. Верификация модели**1. Проверка предположений регрессии****1) Проверка нормальности распределения остатков****(тест Шапиро – Уилка)**

Тест Шапиро–Уилка (W) – это статистический метод, который проверяет нулевую гипотезу о том, что выборка (в нашем случае остатки) взята из нормально распределённой совокупности. Рассчитывается статистика W по формуле, которая учитывает упорядоченные значения выборки и фиксированные коэффициенты, зависящие от размера выборки:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

где: $x_{(i)}$ – i-е по величине значение в выборке; $\bar{x}$ – среднее значение выборки; a_i – коэффициенты, которые зависят от ожидаемых значений порядковых статистик для стандартного нормального распределения.

Расчет теста Шапиро-Уилка

Нулевая гипотеза (H_0): остатки модели распределены нормально.

Альтернативная гипотеза (H_1): остатки не распределены нормально.

Для выборки из 60 наблюдений ($n = 60$) получены следующие результаты: Статистика теста $W = 0,982$; p значение $p = 0,543$.

Вывод по тесту: поскольку p значение ($0,543$) > уровня значимости $\alpha = 0,05$, не отвергаем H_0 . Нет статистически значимых доказательств отклонения от нормальности. Остатки модели соответствуют нормальному распределению.

Графическая диагностика теста Шапиро-Уилка

1) Гистограмма остатков показывает распределение частот остатков (разностей между наблюдаемыми и предсказанными значениями $\hat{Y}$). Фор-

ма гистограммы сравнивается с кривой нормального распределения (колоколообразная форма).

Описание гистограммы. Гистограмма имеет симметричную форму, близкую к колоколу. Максимум сосредоточен около 0 (среднее остатков ≈ 0).

«Хвосты» распределения примерно равны слева и справа. Нет явных выбросов или аномальных пиков.

Интерпретация. Гистограмма подтверждает результаты теста Шапиро – Уилка – остатки распределены приблизительно нормально.

2) QQ график (квантиль квантиль) показывает сопоставление квантилей эмпирического распределения остатков с квантилями стандартного нормального распределения. Если точки лежат на прямой линии (под углом 45°), остатки нормальны.

QQ графика. Точки плотно прилегают к диагональной линии (теоретической прямой). Незначительные отклонения наблюдаются лишь на крайних квантилях (концах графика), но они не критичны. Нет систематических изгибов или «ступенек», которые указывали бы на асимметрию или тяжёлые хвосты.

Интерпретация. QQ график подтверждает нормальность остатков. Отклонения минимальны и не нарушают предположений модели.

Итоговый вывод статистического теста (Шапиро-Уилка)

$W = 0,982$, $p = 0,543 > 0,05 \rightarrow$ нормальность не отвергается.

Гистограмма: симметричная колоколообразная форма, среднее $\approx 0 \rightarrow$ соответствует нормальности.

QQ график: точки близки к диагонали $\rightarrow$ нет значимых отклонений от нормальности.

Общий вывод о нормальности остатков

Предположение о нормальности остатков выполняется. Доверительные интервалы для коэффициентов β_i надёжны. Результаты t теста корректны. Модель удовлетворяет ключевым требованиям линейной регрессии. Нет необходимости в преобразованиях данных (например, логарифмировании) или использовании робастных методов. Модель можно использовать для интерпретации и прогнозирования.

2) Проверка гомоскедастичности остатков (тест Уайта)

Тест Уайта (LM) – формальный статистический тест для проверки гомоскедастичности (постоянства дисперсии) остатков регрессионной модели.

H_0 (нулевая гипотеза): остатки гомоскедастичны (дисперсия постоянна).

H_1 (альтернативная гипотеза): присутствует гетероскедастичность (дисперсия непостоянна).

Тест строит вспомогательную регрессию квадратов остатков на исходные предикторы, их квадраты и попарные произведения. Статистика LM вычисляется по формуле:

$$LM = n \cdot R_{\text{вспом}}^2 \quad (5)$$

где: $n=60$ – объём выборки; $R_{\text{вспом}}^2$ – коэффициент детерминации вспомогательной регрессии.

LM статистика имеет распределение χ^2 с числом степеней свободы, равным числу регрессоров во вспомогательной модели (без константы).

Расчет теста Уайта

Для модели с 8 предикторами (X_1 – X_8) вспомогательная регрессия включает: линейные члены: $X_1, \dots, X_8$; квадратичные члены: $X_{12}, \dots, X_{82}$; попарные взаимодействия (частично, для сокращения числа параметров).

Статистика теста:

$R_{\text{вспом}}^2 = 0,092$; $LM = 60 \cdot 0,092 = 5,52$; число степеней свободы: $df = 15$ (приблизительное значение для сокращённой спецификации); p значение: $p = 0,921$.

Вывод по тесту Уайта. Поскольку $p = 0,921 > 0,05$, не отвергаем H_0 . Нет статистических доказательств гетероскедастичности. Остатки модели гомоскедастичны.

Графическая диагностика теста Уайта

Для визуальной проверки гомоскедастичности построили следующие графики.

1) График остатков vs предсказанных значений ($\hat{Y}$), который показывает:

По оси x – предсказанные значения зависимой переменной Y .

По оси y – остатки $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$.

При гомоскедастичности точки должны равномерно рассеиваться вокруг нуля без видимых паттернов.

Описание графика. Точки распределены равномерно вдоль горизонтальной линии $e=0$. Нет «веерообразного» расширения или сужения разброса остатков при росте $\hat{Y}$. Отсутствуют кластеры или систематические отклонения.

Интерпретация. График подтверждает гомоскедастичность – дисперсия остатков не зависит от уровня предсказанных значений.

2) График остатков vs каждого предиктора (X_j).

Для каждого предиктора X_j строили отдельный график: e_i vs X_j . При гомоскедастичности остатки должны случайно колебаться вокруг нуля без трендов или изгибов.

Описание графика (для всех X_j). На всех графиках остатки равномерно распределены относительно горизонтальной линии $e=0$. Нет линейных

или нелинейных зависимостей между e_i и X_j . Разброс точек примерно одинаков по всему диапазону X_j .

Интерпретация. Отсутствие систематических паттернов на графиках подтверждает, что дисперсия остатков не связана с отдельными предикторами.

3) График масштаба местоположения (Scale Location Plot).

По оси $x - Y$; По оси $y - |e_i|$ (квадратный корень из абсолютных остатков). Позволяет лучше увидеть изменения дисперсии при больших $|e_i|$.

Описание графика. Точки равномерно распределены вдоль сглаженной линии. Линия практически горизонтальна, без подъёма или спада. Нет явных выбросов или зон с повышенной дисперсией.

Интерпретация. График подтверждает, что масштаб остатков не меняется в зависимости от $Y^{\wedge}$, что согласуется с гомоскедастичностью.

Итоговый вывод по тесту Уайта

Статистический тест (Уайта):

$LM = 5,52, p = 0,921 > 0,05 \rightarrow$ гомоскедастичность не отвергается.

Графики остатков vs $Y^{\wedge}$: Равномерный разброс точек $\rightarrow$ нет гетероскедастичности.

Графики остатков vs X_j : Отсутствие трендов $\rightarrow$ дисперсия не зависит от предикторов.

Scale Location Plot: Горизонтальная линия $\rightarrow$ постоянный масштаб остатков.

Общий вывод о гомоскедастичности

Предположение о гомоскедастичности остатков выполняется. Стандартные ошибки коэффициентов β_i надёжны. Доверительные интервалы и p значения корректны. Модель удовлетворяет ключевым требованиям линейной регрессии. Модель можно использовать для выводов и прогнозов.

3) Проверка гетероскедастичности: тест Бройша – Пагана

Тест Бройша – Пагана (BP) проверяет гомоскедастичность остатков линейной регрессии.

H_0 : дисперсия остатков постоянна (гомоскедастичность).

H_1 : дисперсия остатков зависит от предикторов (гетероскедастичность).

Для этого оценивается исходная модель и вычисляются остатки e_i . Квадраты остатков e_i^2 репрессируются на исходные предикторы. Статистика BP вычисляется по формуле:

$$BP = n \cdot R_{\text{вспом}}^2 \quad (6)$$

где: BP – значение тестовой статистики; n – объём выборки (60); $R_{\text{вспом}}^2$ – коэффициент детерминации вспомогательной регрессии e_i^2 на предикторы.

BP сравнивается с распределением $\chi^2(k)$, где k – число предикторов во вспомогательной регрессии.

Расчёт теста Бройша – Пагана (Breusch Pagan)

Получены остатки e_i из основной регрессии.

Построена вспомогательная регрессия: $e_i^2 = \gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \gamma_2 X_2 + \dots + \gamma_8 X_8 + e_i$.

Результаты вспомогательной регрессии: $R_{\text{вспом}}^2 = 0,084$.

Статистика теста:

$$BP = n \cdot R_{\text{вспом}}^2 = 60 \cdot 0,084 = 5,04;$$

p значение:

Число степеней свободы: $df = k = 8$.

Критическое значение $\chi^2(8)$ для $\alpha = 0,05$: $\chi_{\text{крит}}^2 = 15,51$.

p значение для $BP = 5,04$: $p = 0,753$.

Вывод по тесту Бройша – Пагана (Breusch Pagan)

Статистика $BP = 5,04$. p значение $= 0,753 > 0,05$.

Поскольку p значение превышает уровень значимости $\alpha = 0,05$, не отвергаем H_0 . Нет статистических доказательств гетероскедастичности. Остатки модели гомоскедастичны. Модель удовлетворяет предположению о постоянстве дисперсии остатков. Стандартные ошибки коэффициентов β_i надёжны, так как гетероскедастичность не искажает их. Доверительные интервалы и p значения для коэффициентов корректны. Нет необходимости в коррекции гетероскедастичности (например, в использовании робастных стандартных ошибок или взвешенной регрессии).

Сопоставление теста Бройша – Пагана (Breusch Pagan) с тестом Уайта

Тест Уайта (ранее): $p = 0,921 \rightarrow$ гомоскедастичность подтверждена.

Тест Бройша – Пагана: $p = 0,753 \rightarrow$ гомоскедастичность подтверждена.

Оба теста согласуются и указывают на отсутствие гетероскедастичности в модели.

Итоговый вывод по проверке гетероскедастичности

Тестовая статистика $BP = 5,04$, $p = 0,753$. Нет оснований отвергать H_0 о гомоскедастичности остатков. Модель удовлетворяет предположению о постоянстве дисперсии ошибок. Результаты регрессионного анализа (коэффициенты, p значения, доверительные интервалы) можно считать надёжными.

4) Проверка автокорреляции остатков: критерий Дарбина – Уотсона

Критерий Дарбина-Уотсона (DW) проверяет автокорреляцию первого порядка в остатках регрессионной модели.

H_0 : автокорреляция отсутствует (остатки независимы).

H_1 : присутствует положительная или отрицательная автокорреляция.

Статистика DW вычисляется по формуле:

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}, \quad (7)$$

где: e_t – остаток в момент времени t ; n – объём выборки.

Интерпретация DW:

DW $\approx$ 2 $\rightarrow$ автокорреляции нет;

DW < 2 $\rightarrow$ возможная положительная автокорреляция;

DW > 2 $\rightarrow$ возможная отрицательная автокорреляция.

Для вывода сравнивают DW с критическими значениями dL (нижняя граница) и dU (верхняя граница) для заданного n и числа предикторов k .

Расчёт критерия Дарбина – Уотсона (DW)

Вычисляли суммы:

$t=2 \sum 60(e_t - e_{t-1})^2 = 218,4$;

$t=1 \sum 60 e_t^2 = 112,8$.

Рассчитывали статистику DW:

DW = $112,8 / 218,4 \approx 1,937$.

Находили критические значения для $n = 60$, $k = 8$, $\alpha = 0,05$:

dL $\approx 1,32$;

dU $\approx 1,67$.

Анализ результатов расчёта критерия Дарбина – Уотсона (DW)

Сравнивали DW с критическими значениями:

Проверка на положительную автокорреляцию:

Если DW < dL, отвергаем H_0 (есть положительная автокорреляция).

Если dL $\leq$ DW $\leq$ dU, зона неопределённости.

Если DW > dU, не отвергаем H_0 .

$\rightarrow 1,937 > 1,67 \rightarrow$ нет положительной автокорреляции.

Проверка на отрицательную автокорреляцию:

Если (4 – DW) < dL, отвергаем H_0 (есть отрицательная автокорреляция).

Если dL $\leq$ (4 – DW) $\leq$ dU, зона неопределённости.

Если (4 – DW) > dU, не отвергаем H_0 .

$\rightarrow 4 - 1,937 = 2,063 > 1,67 \rightarrow$ нет отрицательной автокорреляции.

Интерпретация критерия Дарбина-Уотсона (DW)

DW = 1,937 близко к 2, что указывает на отсутствие автокорреляции.

Значение DW лежит вне критических зон для положительной и отрицательной автокорреляции. Остатки модели независимы (удовлетворяют предположению о некоррелированности ошибок).

Итоговый вывод по проверке автокорреляции остатков

Статистика DW = 1,937.

Критические значения: dL = 1,32, dU = 1,67.

Вывод: нет оснований отвергать $H_0 \rightarrow$ автокорреляция остатков отсутствует. Модель удовлетворяет предположению о независимости ошибок. Результаты регрессии (коэффициенты, стандартные ошибки, р значения) надёжны. Нет необходимости в коррекции автокорреляции (например, в использовании моделей с авторегрессионными ошибками). Можно использовать модель для интерпретации и прогнозирования без учёта автокорреляции.

5) Анализ мультиколлинеарности (VIF) для модели

VIF (Variance inflation factor) – коэффициент инфляции дисперсии, показывающий, насколько сильно связаны между собой независимые переменные (предикторы) модели.

Формула для расчёта VIF для каждого предиктора X_j :

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}, \quad (8)$$

где R_j^2 – коэффициент детерминации вспомогательной регрессии, в которой X_j выступает зависимой переменной, а остальные предикторы – независимыми.

Интерпретация значений VIF:

VIF = 1 – мультиколлинеарность отсутствует;

1 < VIF ≤ 5 – слабая/умеренная мультиколлинеарность (обычно приемлемо);

VIF > 5 – сильная мультиколлинеарность (требует внимания);

VIF > 10 – очень сильная мультиколлинеарность (модель ненадёжна).

На основе данных выборки (n = 60) и матрицы корреляций между предикторами получены следующие значения VIF для каждого предиктора (табл. 2).

Таблица 2.

Значения VIF для предикторов

Table 2. VIF Values for Predictors

Предиктор (переменная)	VIF	Интерпретация
X_1 (ОЗ)	1,92	Слабая мультиколлинеарность
X_2 (ФФ)	2,14	Слабая мультиколлинеарность
X_3 (ФС)	1,87	Слабая мультиколлинеарность
X_4 (ИБ)	2,31	Слабая мультиколлинеарность
X_5 (ЖА)	2,03	Слабая мультиколлинеарность
X_6 (СФ)	1,98	Слабая мультиколлинеарность
X_7 (ЭС)	2,25	Слабая мультиколлинеарность
X_8 (ПЗ)	2,40	Слабая мультиколлинеарность

Общий вывод по мультиколлинеарности

Все значения $VIF < 5$, что указывает на отсутствие сильной мультиколлинеарности в модели. Максимальные значения VIF ($\sim 2,4$) наблюдаются для X_4 (ИБ) и X_8 (ПЗ), но они остаются в пределах допустимого.

Дисперсия оценок коэффициентов не завышена критически из-за взаимосвязей предикторов. Таким образом, модель устойчива к эффектам мультиколлинеарности так как стандартные ошибки коэффициентов не чрезмерно велики; оценки β_i интерпретируемы; выводы о значимости коэффициентов (по t тестам) надёжны. Нет необходимости исключать предикторы из-за мультиколлинеарности; применять регуляризацию (Ridge/Lasso); объединять коррелированные переменные.

Итог: Модель не имеет проблем с мультиколлинеарностью. Значения VIF свидетельствуют о слабой взаимосвязи между предикторами, что не искажает результаты регрессии.

2. Оценка качества модели

1) Коэффициент детерминации R^2 и скорректированный R^2_{adj}

Коэффициент детерминации R^2 показывает долю дисперсии Y , объяснённую моделью. Значение: $R^2 \approx 0,89$ (89 %). Интерпретация: модель объясняет ~ 89 % вариации показателя САН.

Скорректированный R^2 учитывает число предикторов и предотвращает переоценку качества. Значение: $adj. R^2 \approx 0,87$ (87 %). Интерпретация: после поправки на число переменных модель объясняет ~ 87 % дисперсии Y .

2) Стандартная ошибка оценки (SEE)

Стандартная ошибка оценки (SEE) является мерой точности предсказаний модели. Стандартные ошибки коэффициентов β_i характеризуют точность оценки каждого коэффициента. Значение: $SEE \approx 1,85$. Интерпретация: средняя ошибка прогноза Y составляет $\sim 1,85$ балла.

3) F тест значимости модели (критерий Фишера)

1. Формулировка гипотез

H_0 (нулевая гипотеза): модель не значима, т. е. все коэффициенты при регрессорах равны нулю ($\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_8 = 0$). Это означает, что ни один из предикторов (показателей MOS SF 36) не влияет на зависимую переменную (САН).

H_1 (альтернативная гипотеза): модель значима, т. е. хотя бы один коэффициент $\beta_i \neq 0$. Следовательно, модель объясняет вариацию САН лучше, чем модель без предикторов.

2. Расчёт F статистики

Формула для F статистики в множественной регрессии:

$$F = \frac{R^2/k}{(1 - R^2)/(n - k - 1)}, \quad (9)$$

где: $R^2=0,89$ – коэффициент детерминации; $k=8$ – число независимых переменных (предикторов); $n=60$ – объём выборки; $n-k-1=60-8-1=51$ – число степеней свободы для остаточной суммы квадратов.

Расчет:

$$F = \frac{0,89/8}{(1 - 0,89)/51} = \frac{0,11125}{0,002157} \approx 51,58.$$

3. Определение критического значения F

Уровень значимости $\alpha=0,05$ (стандартный выбор).

Число степеней свободы:

$df1=k=8$ (для факторной суммы квадратов);

$df2=n-k-1=51$ (для остаточной суммы квадратов).

Критическое значение $F_{\text{крит}}(8,51;0,05)$ находили по таблице F распределения или с помощью статистического ПО.

$F_{\text{крит}} \approx 2,10$ (для $df1=8$, $df2=50$; для $df2=51$ значение близко).

4. Сравнение F статистики с критическим значением

$F_{\text{расч}}=51,58$; $F_{\text{крит}} \approx 2,10$

Поскольку $51,58 > 2,10$, отвергли H_0 .

5. p значение для F статистики

p значение – вероятность получить такое или большее значение F при верности H_0 .

Для $F=51,58$, $df1=8$, $df2=51$: p значение крайне мало ($p < 0,0001$).

Это подтверждает статистическую значимость модели.

6. Вывод

1. Модель статистически значима на уровне $\alpha=0,05$.

2. Наблюдаемая связь между предикторами (показателями MOS SF 36) и зависимой переменной (САН) не является случайной.

3. Модель объясняет существенную долю дисперсии САН ($R^2=0,89$), и это объяснение значимо с точки зрения критерия Фишера.

7. Интерпретация F теста

Результаты F теста подтверждают, что совокупность показателей опросника MOS SF 36 (ОЗ, ФФ, ФС, ИБ, ЖА, СФ, ЭС, ПЗ) статистически значимо предсказывает уровень самочувствия, активности и настроения (САН) у трудящихся пенсионного возраста.

Даже если отдельные предикторы оказались незначимы (например, ФС, ИБ), их совместное влияние на САН значимо. Это подчёркивает важность комплексного учёта физического и психологического здоровья при оценке общего состояния.

Итог:

F статистика: 51,58

Критическое значение F ($\alpha=0,05$): ~2,10

p значение: <0,0001

Вывод: модель значима, H_0 отвергается.

3. Устойчивость прогноза

Анализ влияния выбросов (статистика Кука, $D < 1$).

Мера влияния наблюдения на все коэффициенты модели:

$$D_i = \frac{r_i^2}{k+1} \cdot \frac{h_i}{1-h_i}, \quad (10)$$

где k – число предикторов (8); h_{ii} – показатель влияния (leverage) i-го наблюдения (элемент на диагонали матрицы проекции);

Критерии:

$D_i > 1$ – сильное влияние;

$D_i > n/4$ (для $n=60$: $>0,067$) – потенциально влиятельное наблюдение.

Статистика теста:

Максимум $D_i=0,12$ (1 наблюдение);

Ещё 2 наблюдения с $D_i \in [0,07; 0,11]$.

Вывод: 3 наблюдения оказывают умеренное влияние на модель.

График статистики Кука

Что показывает: влияние наблюдений на модель в целом.

Результат: 3 точки имеют $D_i > 0,067$ (умеренное влияние).

Вывод: эти наблюдения требуют проверки, но не искажают модель кардинально.

Общее заключение по модели множественной линейной регрессии

Итоговое уравнение модели

На основании статистически значимых коэффициентов ($p < 0,05$) финальное уравнение множественной линейной регрессии принимает вид:

$$\text{САН} = \beta_0 + 0,21 \cdot \text{ОЗ} + 0,18 \cdot \text{ФФ} + 0,15 \cdot \text{ЖА} + 0,20 \cdot \text{СФ} + 0,17 \cdot \text{ЭС} + 0,23 \cdot \text{ПЗ}, \quad (11)$$

где:

САН – прогнозируемое значение показателя «Самочувствие, активность, настроение»;

β_0 – свободный член (константа) модели;

предикторы и их коэффициенты:

ОЗ (Общее здоровье): $\beta_1=0,21$;

ФФ (Физическое функционирование): $\beta_2=0,18$;

ЖА (Жизненная активность): $\beta_5=0,15$;

СФ (Социальное функционирование): $\beta_6=0,20$;

ЭС (Эмоциональное состояние): $\beta_7=0,17$;

ПЗ (Психическое здоровье): $\beta_8=0,23$.

Интерпретация коэффициентов

Каждый коэффициент β_j показывает, на сколько баллов в среднем изменится САН при увеличении соответствующего предиктора на 1 балл (при фиксированных значениях остальных предикторов):

ОЗ (+1 балл) $\rightarrow$ САН $\uparrow$ на 0,21 балла;

ФФ (+1 балл) $\rightarrow$ САН $\uparrow$ на 0,18 балла;

ЖА (+1 балл) $\rightarrow$ САН $\uparrow$ на 0,15 балла;

СФ (+1 балл) $\rightarrow$ САН $\uparrow$ на 0,20 балла;

ЭС (+1 балл) $\rightarrow$ САН $\uparrow$ на 0,17 балла;

ПЗ (+1 балл) $\rightarrow$ САН $\uparrow$ на 0,23 балла.

Пример прогноза по модели САН

Исходное уравнение модели:

$\text{САН} = 0,85 + 0,21 \cdot \text{ОЗ} + 0,18 \cdot \text{ФФ} + 0,15 \cdot \text{ЖА} + 0,20 \cdot \text{СФ} + 0,17 \cdot \text{ЭС} + 0,23 \cdot \text{ПЗ}$,

где: САН – прогнозируемый уровень «Самочувствия, активности, настроения» (в баллах); ОЗ, ФФ, ЖА, СФ, ЭС, ПЗ – значения шкал MOS SF-36 (от 0 до 100 баллов).

Исходные данные для прогноза:

Респондент Н. (трудоустроенный пенсионер)

Зафиксированы следующие показатели по шкалам опросника:

ОЗ (Общее здоровье) = 70 баллов;

ФФ (Физическое функционирование) = 65 баллов;

ЖА (Жизненная активность) = 55 баллов;

СФ (Социальное функционирование) = 80 баллов;

ЭС (Эмоциональное состояние) = 60 баллов;

ПЗ (Психическое здоровье) = 75 баллов.

Подстановка значений в уравнение:

$\text{САН} = 0,85 + 0,21 \cdot 70 + 0,18 \cdot 65 + 0,15 \cdot 55 + 0,20 \cdot 80 + 0,17 \cdot 60 + 0,23 \cdot 75$.

$\text{САН} = 0,85 + 78,1 = 78,95$.

Итоговый прогноз

Прогнозируемый уровень САН: 78,95 балла (из 100 возможных).

Интерпретация результата

78,95 балла – это расчётное значение САН при заданных показателях здоровья и активности. Чем выше балл, тем лучше самочувствие, выше активность и настроение. Вклад отдельных факторов (как они «набрали» 78,1 балла до добавления константы):

ПЗ (Психическое здоровье): 17,25 балла (наибольший вклад);

СФ (Социальное функционирование): 16,0 балла;

ОЗ (Общее здоровье): 14,7 балла;

ФФ (Физическое функционирование): 11,7 балла;

ЭС (Эмоциональное состояние): 10,2 балла;

ЖА (Жизненная активность): 8,25 балла.

Роль свободного члена (0,85)

Добавляет «базовый» уровень САН, не зависящий от шкал.

Точность прогноза

Стандартная ошибка оценки модели SEE = 1,85 балла.

С вероятностью ~95 % реальное значение САН будет в интервале:

$78,95 \pm 2 \cdot 1,85 \Rightarrow [75,25; 82,65]$.

Практический вывод

У данного респондента высокий уровень САН (близко к 80 из 100), что обусловлено:

хорошим психическим здоровьем (ПЗ = 75);

высокой социальной активностью (СФ = 80);

удовлетворительным общим здоровьем (ОЗ = 70).

Для дальнейшего повышения САН можно сосредоточиться на:

увеличении жизненной активности (ЖА = 55 – самый низкий показатель);

поддержке эмоционального состояния (ЭС = 60).

Примечание: Прогноз не учитывает индивидуальные особенности (например, хронические заболевания), не отражённые в шкалах SF-36. Модель построена на выборке трудящихся пенсионеров – её применимость к другим группам требует проверки. Прогноз является средним ожидаемым значением – реальное САН может варьироваться в пределах доверительного интервала.

Обсуждение

Общее заключение по модели

1. Качество и надёжность модели.

Объясняющая способность: модель объясняет 89 % дисперсии зависимой переменной ($R^2=0,89$). Скорректированный коэффициент детерминации $\text{Radj}^2=0,87$ подтверждает высокую предсказательную силу с учётом числа предикторов.

Стандартная ошибка оценки SEE=1,85 указывает, что средняя ошибка прогноза составляет ~1,85 балла по шкале САН.

Предположения регрессии соблюдены:

- остатки нормально распределены (тест Шапиро – Уилка: $p=0,543>0,05$);

- дисперсия остатков постоянна (гомоскедастичность: тесты Уайта и Бройша – Пагана, $p > 0,05$);
- отсутствует автокорреляция остатков (критерий Дарбина – Уотсона: $DW = 1,937$);
- мультиколлинеарность незначительна (все $VIF < 2,5$).
- Влияние выбросов минимально: 2 наблюдения статистически значимы как выбросы, но не искажают коэффициенты критично.

2. Значимые предикторы и их вклад.

В модель вошли 6 статистически значимых предикторов ($p < 0,05$), каждый из которых вносит существенный вклад в прогноз САН:

ПЗ (Психическое здоровье) ($\beta = 0,23$) – наиболее сильный предиктор. Увеличение ПЗ на 1 балл связано с ростом САН на 0,23 балла. Отражает критическую роль эмоционального благополучия и отсутствия тревоги.

ОЗ (Общее здоровье) ($\beta = 0,21$) – второй по силе влияния. Рост ОЗ на 1 балл повышает САН на 0,21 балла. Подчеркивает значение субъективной оценки собственного здоровья.

СФ (Социальное функционирование) ($\beta = 0,20$) – улучшение СФ на 1 балл ведёт к увеличению САН на 0,20 балла. Показывает важность социальных связей и ролей.

ФФ (Физическое функционирование) ($\beta = 0,18$) – повышение ФФ на 1 балл увеличивает САН на 0,18 балла. Отражает вклад физической активности и мобильности.

ЭС (Эмоциональное состояние) ($\beta = 0,17$) – рост ЭС на 1 балл связан с увеличением САН на 0,17 балла. Подчеркивает роль стабильности эмоций.

ЖА (Жизненная активность) ($\beta = 0,15$) – увеличение ЖА на 1 балл повышает САН на 0,15 балла. Отражает значение энергичности и бодрости.

Исключённые предикторы ($p > 0,05$):

ФС (Физическая роль);

ИБ (Интенсивность боли).

Их влияние на САН статистически не подтверждено.

3. Интерпретация связей.

Модель демонстрирует, что САН у трудящихся пенсионеров формируется под комплексным влиянием:

Психоэмоциональных факторов (ПЗ, ЭС) – определяют внутреннее состояние, устойчивость к стрессу, позитивный настрой.

Физического здоровья (ОЗ, ФФ) – обеспечивают энергию и способность к повседневной активности.

Социального функционирования (СФ) – поддерживают вовлечённость в жизнь общества и чувство значимости.

Жизненной активности (ЖА) – отражают субъективный ресурс сил и мотивации.

Наиболее весомы психическое здоровье (ПЗ) и общее здоровье (ОЗ), но остальные предикторы также значимы и не могут быть проигнорированы.

4. Практическая значимость.

Модель позволяет:

- Прогнозировать САН на основе шкал MOS SF 36 с высокой точностью.
- Выявлять «узкие места» (например, низкий ПЗ или СФ) для адресной коррекции программ поддержки.
- Оценивать эффективность вмешательств – изменение значимых предикторов должно вести к изменению САН.
- Планировать интервенции с фокусом на укрепление психического здоровья; поддержку социальной активности; улучшение субъективного восприятия здоровья.

Рекомендации

Рекомендуется использовать эту модель как инструмент для скрининга и мониторинга здоровья трудящихся пенсионеров. Итогом является надёжная и легко интерпретируемая модель, которая помогает выявить главные драйверы самочувствия – психическое здоровье, общее здоровье и социальное функционирование, формирующие уровень активности, настроения и самочувствия в данной группе.

Итог: модель надёжна, интерпретируема и полезна для понимания факторов, формирующих САН у трудящихся пенсионеров. Её можно применять как для научных исследований, так и для практической работы по поддержке здоровья данной группы населения.

Обоснование практической ценности модели для ранней диагностики рисков ухудшения здоровья и выработки рекомендаций по поддержке трудоспособности пенсионеров

Разработанная модель множественной линейной регрессии представляет собой инструмент комплексной оценки уровня здоровья трудящегося пенсионного возраста, объединяющий объективные показатели качества жизни и эмоционального состояния. Практическая ценность данной модели обусловлена несколькими ключевыми аспектами.

Во-первых, модель способствует ранней диагностике факторов, предшествующих значительному ухудшению здоровья, путем выявления скрытых взаимосвязей между качеством жизни, психоэмоциональным состоянием и общим уровнем здоровья пенсионеров. Это позволяет вы-

являть группы повышенного риска до проявления выраженной клинической симптоматики.

Во-вторых, точечная оценка влияния различных независимых переменных на здоровье способствует формированию индивидуализированных рекомендаций по коррекции образа жизни, профилактическим и реабилитационным мерам, направленным на сохранение и продление трудоспособности.

В-третьих, модель может служить эффективным инструментом в системе мониторинга состояния здоровья и оценки эффективности реализуемых программ социальной поддержки и здравоохранения для пенсионеров, что повышает качество принимаемых управленческих решений.

Таким образом, практическая значимость модели выражается в возможности своевременного выявления потенциальных проблем со здоровьем и разработке адресных профилактических стратегий, способствующих улучшению качества жизни и сохранению активности трудящихся пенсионеров.

Заключение

Разработанная модель множественной линейной регрессии наглядно демонстрирует, что уровень показателя САН у трудящихся пенсионеров зависит от комплексного взаимодействия психосоциальных и физических факторов. Среди них ключевую роль играет психическое здоровье (ПЗ) – эмоциональная стабильность, отсутствие тревоги и депрессии оказывают прямое влияние на позитивное самочувствие и активность. Существенное влияние оказывает и общее здоровье (ОЗ) – субъективная оценка собственного состояния напрямую коррелирует с ежедневным тонусом. Социальное функционирование (СФ), отражающее способность поддерживать социальные связи и выполнять общественные роли, является критическим фактором общего благополучия. Физическое функционирование (ФФ), связанное с физическими нагрузками и активностью, поддерживает энергию и настроение. Также важно эмоциональное состояние (ЭС), которое способствует сохранению высокой самооценки и стабильности в самочувствии.

Интенсивность боли (ИБ) и физическая роль (ФС) могут тесно коррелировать с другими предикторами в модели (например, с общим здоровьем (ОЗ) или социальным функционированием (СФ)). В этом случае их уникальный вклад в объяснение вариабельности САН становится незначимым, так как информация, которую они несут, уже учитывается другими факторами. Более того, в некоторых случаях влияние боли или физической активности на САН может проявляться только в определённых подгруппах (например, при хронических болях или у людей с определённым уровнем

физической подготовки), но в общей выборке этот эффект «размывается». Также Боль и Физическая роль могут влиять на САН не напрямую, а через промежуточные факторы, которые уже учтены в модели. Например, боль может усиливать тревогу или депрессию, а эти состояния, в свою очередь, снижать САН. Если в модели уже есть переменные, связанные с эмоциональным состоянием (например, ЭС – эмоциональное состояние), эффект ИБ может быть «поглощён» ими. Таким образом, хотя статистический анализ не выявил значимого влияния ИБ и ФС на САН в вашей модели, это не противоречит общепризнанным представлениям о связи боли и физической активности с психологическим состоянием.

Таким образом, разработанная модель представляет собой эффективный и достоверный инструмент прогнозирования здоровья работающих лиц пенсионного возраста. Верификация показала ее применимость в практической медико-социальной оценке, что может способствовать более адресной профилактике и развитию программ поддержки здоровья работающих пенсионеров.

Заключение комитета по этике. Исследование было проведено в соответствии с принципами положения Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board).

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании. Письменное информированное согласие было получено от пациентов на публикацию этой статьи.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Данное исследование выполнено в рамках реализации Конкурса Державинских грантов на поддержку малых студенческих научных коллективов во главе с научным руководителем на 2025-2026 учебный год.

Список литературы

1. Анищенко, Е. Б., Траньковская, Л. В., Важенина, А. А., & Тарасенко, Г. А. (2022). Состояние здоровья как фактор, влияющий на трудовую деятельность работающих лиц пожилого возраста. *Медицина труда и промышленная экология*, (5), 311–321. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-5-311-321>. EDN: <https://elibrary.ru/BRJTNQ>

2. Гантман, А. А., Горблянский, Ю. Ю., Конторович, Е. П., & Понамарева, О. П. (2022). Концепция здорового старения на работе. *Медицинский вестник Юга России*, 13(4), 5–13. <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2022-13-4-5-13>. EDN: <https://elibrary.ru/WOOENJ>
3. Григорьева, Н. С., & Чубарова, Т. В. (2025). Охрана здоровья работающих пенсионеров в фокусе здравоохранительной политики. *Народонаселение*, (4), 212–226. <https://doi.org/10.24412/1561-7785-2025-4-212-226>. EDN: <https://elibrary.ru/YINSOI>
4. Данилова, А. А., Забелина, Е. В., Телицына, А. Ю., & Честюнина, Ю. В. (2023). Факторы субъективного здоровья: структурная модель на этапе поздней социализации. *Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены*, (6), 144–170. <https://doi.org/10.14515/monitoring.2023.6.2399>. EDN: <https://elibrary.ru/IKBQQI>
5. Доскин, В. А., Лаврентьева, Н. А., Мирошников, М. П., & Шарай, В. Б. (1973). Тест дифференцированной самооценки функционального состояния. *Вопросы психологии*, (6). EDN: <https://elibrary.ru/SMPXND>
6. Елютина, М. Э., Темаев, Т. В., Суркова, И. Ю., & Богомолова, Т. А. (2025). Анализ факторов, влияющих на принятие решения о пролонгировании профессионально-трудовой деятельности рабочих промышленных производств. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*, 33(S1), 826–833. <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2025-33-s1-826-833>. EDN: <https://elibrary.ru/CAEUZF>
7. Красовский, В. О. (2020). Количественные оценки и анализ вероятностей расстройств здоровья работающих в исследованиях по промышленной гигиене. *Наукофера*, (11(2)), 68–76. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4312858>. EDN: <https://elibrary.ru/BJNCKW>
8. Линс, Л., & Карвальо, Ф. М. (2016). Общий балл SF-36 как единый показатель качества жизни, связанного со здоровьем: обзор Scoping. *SAGE Open Med.* <https://doi.org/10.1177/2050312116671725>
9. Липатова, Л. Н. (2024). Методологические подходы к оценке качества жизни пожилых людей в России. *Вопросы статистики*, 31(1), 55–71. <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2024-31-1-55-71>. EDN: <https://elibrary.ru/SGRSKN>
10. Невзоров, Е. Ю., Невзорова, Е. В., Киселев, А. М., & Козачук, И. В. (2024). Метод оценки уровня здоровья и работоспособности социальной (по возрасту) группы. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*, 101(3-2), 136. EDN: <https://elibrary.ru/QTAXDO>
11. Павлова, Н. С., & Сергиенко, Е. А. (2020). Субъективное качество жизни, психологическое благополучие, отношение к временной перспективе и возрасту у пенсионеров, ведущих разный образ жизни. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета*, 66(1), 100–105. EDN: <https://elibrary.ru/STXQYI>

- бургского университета. *Психология*, 10(4), 384–401. <https://doi.org/10.21638/spbu16.2020.401>. EDN: <https://elibrary.ru/VWHIGV>
12. Печеркина, А. А., & Борисов, Г. И. (2021). Структура профессионального здоровья людей пожилого возраста. *Мир науки. Педагогика и психология*, 9(6). EDN: <https://elibrary.ru/XBAFEA>
 13. Ходакова, О. В., & Кошечая, Н. В. (2019). Самооценка здоровья, как элемент самосохранительного поведения и приверженности к диспансеризации взрослого населения. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, (4), 309–326. <https://doi.org/10.24411/2312-2935-2019-10099>. EDN: <https://elibrary.ru/NAEBKI>
 14. Фуряева, Т. В., [и др.]. (2021). Инклюзивный подход в работе с пожилыми людьми. Модели преодоления геронтологического эйджизма. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(1), 297–314. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-1-297-314>. EDN: <https://elibrary.ru/ETHRWV>
 15. Bautmans, I., Knoop, V., Amuthavalli Thiyagarajan, J., et al. (2022). WHO working definition of vitality capacity for healthy longevity monitoring; WHO Working Group on Vitality Capacity. *Lancet Healthy Longev*, 3(11), e789–e796. [https://doi.org/10.1016/s2666-7568\(22\)00200-8](https://doi.org/10.1016/s2666-7568(22)00200-8). EDN: <https://elibrary.ru/GNFSCS>
 16. Hasselhorn, H. M., Leinonen, T., Bültmann, U., Mehlum, I. S., du Prel, J.-B., Kiran, S., Majery, N., Solovieva, S., & de Wind, A. (2022). The differentiated roles of health in the transition from work to retirement — conceptual and methodological challenges and avenues for future research. *Scand J Work Environ Health*, 48(4), 312–321. <https://doi.org/10.5271/sjweh.4017>. EDN: <https://elibrary.ru/DITCFJ>
 17. Rudnicka, E., Napierała, P., Podfigurna, A., Męczekalski, B., Smolarczyk, R., & Grymowicz, M. (2020). The World Health Organization (WHO) approach to healthy ageing. *Maturitas*, 139, 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2020.05.018>. EDN: <https://elibrary.ru/WCKJTM>
 18. Ware, J. E., & Sherbourne, C. D. (1992). The MOS 36-item short-form health survey (SF-36): I. Conceptual framework and item selection. *Medical Care*, 30(6), 473–483. <https://doi.org/10.1097/00005650-199206000-00002>

References

1. Anishchenko, E. B., Trankovskaya, L. V., Vazhenina, A. A., & Tarasenko, G. A. (2022). The state of health as a factor affecting the labor activity of elderly workers. *Occupational Medicine and Industrial Ecology*, (5), 311–321. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-5-311-321>. EDN: <https://elibrary.ru/BRJTNG>
2. Gantman, A. A., Gorblyansky, Y. Y., Kontorovich, E. P., & Ponamareva, O. P. (2022). The concept of healthy aging at work. *Medical Bulletin of the South of Russia*, 13(4),

- 5–13. <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2022-13-4-5-13>. EDN: <https://elibrary.ru/WOOEHJ>
3. Grigorieva, N. S., & Chubarova, T. V. (2025). Health protection of working pensioners in the focus of health policy. *Population*, (4), 212–226. <https://doi.org/10.24412/1561-7785-2025-4-212-226>. EDN: <https://elibrary.ru/YINSOI>
 4. Danilova, A. A., Zabelina, E. V., Telitsyna, A. Y., & Chestyunina, Y. V. (2023). Factors of subjective health: A structural model at the stage of late socialization. *Monitoring of Public Opinion: Economic and Social Changes*, (6), 144–170. <https://doi.org/10.14515/monitoring.2023.6.2399>. EDN: <https://elibrary.ru/IKBQQI>
 5. Doskin, V. A., Lavrentyeva, N. A., Miroshnikov, M. P., & Sharay, V. B. (1973). Test of differentiated self-assessment of functional state. *Voprosy Psikhologii* [Questions of Psychology], (6). EDN: <https://elibrary.ru/SMPXND>
 6. Elyutina, M. E., Temaev, T. V., Surkova, I. Y., & Bogomolova, T. A. (2025). Analysis of factors influencing the decision to prolong professional and labor activity of industrial workers. *Problems of Social Hygiene, Healthcare and History of Medicine*, 33(S1), 826–833. <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2025-33-s1-826-833>. EDN: <https://elibrary.ru/CAEUZF>
 7. Krasovsky, V. O. (2020). Quantitative assessments and analysis of the probabilities of health disorders among workers in industrial hygiene studies. *Naukosfera*, (11(2)), 68–76. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4312858>. EDN: <https://elibrary.ru/BJNCKW>
 8. Lins, L., & Carvalho, F. M. (2016). The SF-36 total score as a unified indicator of health-related quality of life: A scoping review. *SAGE Open Med*. <https://doi.org/10.1177/2050312116671725>
 9. Lipatova, L. N. (2024). Methodological approaches to assessing the quality of life of older people in Russia. *Voprosy Statistiki* [Questions of Statistics], 31(1), 55–71. <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2024-31-1-55-71>. EDN: <https://elibrary.ru/SGRSKN>
 10. Nevzorov, E. Y., Nevzorova, E. V., Kiselev, A. M., & Kozachuk, I. V. (2024). A method for assessing the level of health and working capacity of a social (age-based) group. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy*, 101(3-2), 136. EDN: <https://elibrary.ru/QTAXDO>
 11. Pavlova, N. S., & Sergienko, E. A. (2020). Subjective quality of life, psychological well-being, and attitudes toward time perspective and age among pensioners with different lifestyles. *Vestnik of Saint Petersburg University. Psychology*, 10(4), 384–401. <https://doi.org/10.21638/spbu16.2020.401>. EDN: <https://elibrary.ru/VWHIGV>
 12. Pecherkina, A. A., & Borisov, G. I. (2021). The structure of professional health in older adults. *World of Science. Pedagogy and Psychology*, 9(6). EDN: <https://elibrary.ru/XBAFEA>

13. Khodakova, O. V., & Koshevaya, N. V. (2019). Self-assessment of health as an element of self-preserving behavior and adherence to medical check-ups among the adult population. *Modern Problems of Healthcare and Medical Statistics*, (4), 309–326. <https://doi.org/10.24411/2312-2935-2019-10099>. EDN: <https://elibrary.ru/NAEBKI>
14. Furyaeva, T. V., et al. (2021). An inclusive approach to working with older people. Models for overcoming gerontological ageism. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(1), 297–314. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-1-297-314>. EDN: <https://elibrary.ru/ETHRWV>
15. Bautmans, I., Knoop, V., Amuthavalli Thiyagarajan, J., et al. (2022). WHO working definition of vitality capacity for healthy longevity monitoring; WHO Working Group on Vitality Capacity. *Lancet Healthy Longev*, 3(11), e789–e796. [https://doi.org/10.1016/s2666-7568\(22\)00200-8](https://doi.org/10.1016/s2666-7568(22)00200-8). EDN: <https://elibrary.ru/GNFSCS>
16. Hasselhorn, H. M., Leinonen, T., Bültmann, U., Mehlum, I. S., du Prel, J.-B., Kiran, S., Majery, N., Solovieva, S., & de Wind, A. (2022). The differentiated roles of health in the transition from work to retirement — conceptual and methodological challenges and avenues for future research. *Scand J Work Environ Health*, 48(4), 312–321. <https://doi.org/10.5271/sjweh.4017>. EDN: <https://elibrary.ru/DITCFJ>
17. Rudnicka, E., Napierała, P., Podfigurna, A., Męczekalski, B., Smolarczyk, R., & Grymowicz, M. (2020). The World Health Organization (WHO) approach to healthy ageing. *Maturitas*, 139, 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2020.05.018>. EDN: <https://elibrary.ru/WCKJTM>
18. Ware, J. E., & Sherbourne, C. D. (1992). The MOS 36-item short-form health survey (SF-36): I. Conceptual framework and item selection. *Medical Care*, 30(6), 473–483. <https://doi.org/10.1097/00005650-199206000-00002>

ВКЛАД АВТОРОВ

- Невзорова Е.В.:** формулирование основной концепции исследования, научное руководство, статистическая обработка эмпирических данных, проведение критического анализа материалов и формирование выводов, подготовка текста статьи.
- Бобокулов А. Б.** поиск аналитических материалов в отечественных и зарубежных источниках, подготовка литературного обзора.
- Ивашенцева Е.В.:** проведение экспериментов, оформление таблиц с результатами исследования, оформление результатов исследования в графиках.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

- Elena V. Nevzorova:** formulation of the main research concept; scientific supervision; statistical analysis of empirical data; critical analysis of materials and formulation of conclusions; preparation of the article text.

Abdunazar B. Bobokulov: searching for analytical materials in domestic and foreign sources; preparing the literature review.

Evgeniya V. Ivashentseva: conducting experiments; compiling tables with research results; presenting research results in graphs.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Невзорова Елена Владимировна, профессор кафедры медицинской биологии; доктор биологических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392036, Российская Федерация
evnevzorova@yandex.ru

Ивашенцева Евгения Владимировна, студентка Института медицины и здоровьесбережения
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392036, Российская Федерация
ev.ivashentseva@yandex.ru

Бобокулов Абдуназар Бахридинович, студент Института медицины и здоровьесбережения
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392036, Российская Федерация
nazar.bobokulov@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Nevzorova, Professor, Department of Medical Biology; Doctor of Biological Sciences, Associate Professor
Derzhavin Tambov State University
33, Internatsionalnaya Str., Tambov, 392036, Russian Federation
evnevzorova@yandex.ru
SPIN-code: 2067-6425
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3229-0738>

Evgeniya V. Ivashentseva, student at the Institute of Medicine and Health Promotion
Derzhavin Tambov State University

33, Internatsionalnaya Str., Tambov, 392036, Russian Federation

ev.ivashentseva@yandex.ru

SPIN-code: 5677-0260

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9278-4042>

Abdunazar B. Bobokulov, student at the Institute of Medicine and Health Promotion

Derzhavin Tambov State University

33, Internatsionalnaya Str., Tambov, 392036, Russian Federation

nazar.bobokulov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8634-1169>

Поступила 29.12.2025

После рецензирования 02.03.2026

Принята 16.03.2026

Received 29.12.2025

Revised 02.03.2026

Accepted 16.03.2026

Общественное здоровье, организация и социология здравоохранения, медико-социальная экспертиза / Public Health, Health Organization, Sociology of Health, Medical and Social Expertise

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1824](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1824)EDN: [ZDQHCE](https://www.edn.ru/1824)

УДК 614.253.8



Формирование коммуникативной компетенции будущих иностранных врачей средствами видеоресурсов

М.П. Бердина, О.В. Макарова*Тюменский государственный медицинский университет,
Тюмень, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения уровня коммуникативных навыков иностранных врачей, существенно влияющих на качество медицинской помощи. Проблема состоит в недостаточном внимании к формированию этико-речевых компетенций у иностранных студентов, изучающих русский язык не как средство клинического мышления, а как систему лексико-грамматических правил.

Цель – создание методической модели, способствующей развитию навыков эффективной коммуникации будущих врачей. Считаем, что подобный подход способствует интеграции знаний профессиональной лексики в медицинский дискурс, а также развитию осознанного навыка ведения дискуссии на сложные этические темы и выработке эффективных коммуникативных стратегий в паре «врач-пациент».

Материалы и методы. Фактический материал основан на отборе 48 эпизодов сериала «Доктор Хаус», имеющих проблемный образовательный потенциал для организации дискуссии.

Методы исследования: контент-анализ видеофрагментов и отбор материала; разработка интерактивных упражнений, ориентированных на освоение терминов, отработку лексико-грамматических структур; фиксация словесных реакций обучающихся в процессе просмотра «проблемных» видео; сравнительный анализ результатов освоения студентами оценки коммуникативных стратегий врача; качественный анализ данных, позволяющий выявить закономерности в восприятии обучающимися особенностей ролевой коммуникации.

Результаты. В работе представлены два этапа реализации методической модели: 1) преддемонстрационный этап, включающий отработку вводимой профессиональной лексики, упражнения по ее семантизации и особенностям употребления; 2) демонстрационный этап, состоящий из оценки базовых коммуникативных навыков врача с опорой на чек-лист; определения коммуникативных стратегий участников диалога; анализа ситуации по двум параметрам: эффективности и соответствию нормам речевого этикета; коррекции неэффективных стратегий в виде высказываний, соответствующих принципам пациентоцентричной коммуникации. Исследование показало, что данная методика повышает мотивацию иностранных студентов к обучению, обогащает их активный словарь профессиональной лексики и формирует основу этико-речевых компетенций в виде кейсов, предлагаемых к использованию на занятиях.

Ключевые слова: иностранные врачи; коммуникативные навыки; пациентоцентричная коммуникация; видеоресурс; методическая модель

Для цитирования. Бердина, М. П., & Макарова, О. В. (2026). Формирование коммуникативной компетенции будущих иностранных врачей средствами видеоресурсов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 475-493. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1824>

Developing communicative competence of future foreign doctors using video resources

M.P. Berdina, O.V. Makarova

Tyumen State Medical University, Tyumen, Russian Federation

Abstract

Background. The relevance of this study is determined by the need to enhance communication skills among foreign medical professionals, as language proficiency significantly impacts treatment outcomes. The problem lies in insufficient attention given to developing ethical-communicative competencies among international students studying Russian not merely as a system of lexical and grammatical rules but rather as an instrument for clinical reasoning.

Purpose. The aim of this research is to create a methodological model that promotes effective communication skills development for future physicians. We argue that such an approach enables learners to integrate professional vocabulary into medical discourse, fosters their ability to engage in discussions on complex ethical issues, and develops efficient communicative strategies within the doctor-patient dyad.

Materials and methods. The empirical material consists of selected episodes from the TV series “Dr. House” (48 episodes) with educational potential for discussing phy-

sician's communication strategies. Research methods include content analysis of video fragments, design of interactive exercises focused on terminology acquisition and practice of lexico-grammatical structures, observation of verbal reactions during problematic video viewings, comparative analysis of students' progress in evaluating doctors' communication strategies, qualitative data analysis aimed at identifying patterns in participants' perception of role-based communication.

Results. This work presents two stages of implementing the methodical model: 1) pre-demonstration stage involving preparation and semanticization of introduced professional vocabulary through various exercises; 2) demonstration stage including evaluation of basic communication skills using checklists, identification of employed communication strategies, situation analysis according to two parameters (effectiveness and compliance with speech etiquette norms), correction of ineffective strategies via patient-centered formulations. The study demonstrates that this methodology increases motivation among foreign students, enriches their active professional vocabulary, and forms the basis of ethically competent communication.

Keywords: foreign physicians; communication skills; patient-centric communication; video resources; methodological model

For citation. Berdina, M. P., & Makarova, O. V. (2026). Developing communicative competence of future foreign doctors using video resources. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 475-493. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1824>

Введение

Актуальность исследования обусловлена значимостью формирования профессионально-коммуникативных компетенций у иностранных студентов-медиков, обучающихся в российских вузах. Несмотря на образовательные практики, существующие в высших учебных заведениях Министерства здравоохранения РФ и направленные на развитие грамотной, осознанной коммуникации врача с пациентом, вопрос развития навыков общения у будущего врача - иностранного гражданина - до конца не решен. Сегодня уже доказано, что ошибки в коммуникации врача и пациента оказывают значительное влияние на качество медицинской помощи и исход лечения. Так, с проблемами коммуникации связан уровень удовлетворенности пациентов качеством взаимодействия с врачом. Согласно исследованию Сандакова Я.П. и его соавторов, [14], около 30% пациентов выражают неудовлетворенность медицинским обслуживанием в связи с недостаточной информированностью пациента. Кроме этого, 15% пациентов считают, что плохая коммуникация ведет к увеличению частоты вра-

чебных ошибок и неблагоприятных исходов [8]. Отметим, что к «плохой» коммуникации с больным вполне относятся ситуации, когда иностранный врач неправильно понимает информацию в процессе сбора анамнеза [6]; ставит ошибочный диагноз вследствие психологических барьеров в межкультурной коммуникации [7] или непонимания этнокультурных особенностей [15], нюансов разговорной речи российских пациентов и др. [9]. Исследования также показывают, что недостаточное общение врача с пациентом удлинляет сроки госпитализации примерно на 10% [1]. Как видим, приведённые выше данные свидетельствуют о влиянии ошибок в коммуникации врача и пациента на показатели эффективности медицинского обслуживания иностранными врачами, в том числе.

Мы едины во мнении с исследователями [16], что современная медицинская среда характеризуется высоким уровнем требований к коммуникации в паре «врач-пациент». Это обусловлено развитием культуры здравоохранения и увеличением роли межкультурного взаимодействия. В связи с чем наша работа посвящена вопросам методики формирования профессионально значимых речевых компетенций посредством использования неаутентичных видеоматериалов.

Использование видеофрагментов позволяет воссоздавать на занятиях реальные клинические ситуации, вовлекать студентов в осмысление нравственно-этических аспектов врачебной практики и закреплять полученные теоретические знания на конкретных примерах. Применение видеоресурса способствует также преодолению трудностей, возникающих при изучении специфической терминологии и особенностей коммуникации в медицинской сфере, в безопасной среде, что немаловажно для будущего врача.

Профессионально ориентированное обучение иностранному языку (LSP) обуславливает выход за рамки формирования сугубо лингвистических и шире – коммуникативных компетенций. Положение о том, что речевая деятельность представляет собой интеграцию как собственно лингвистических, так и экстралингвистических компонентов общения, давно стало классическим в теории и методике преподавания русского языка как иностранного. В контексте обучения иностранному языку студентов медицинских специальностей данное положение приобретает особую значимость, так как профессия врача является лингвоактивной [12]. В сфере подготовки будущих врачей, кроме усвоения ими сугубо понятийного аппарата в виде узкоспециальной медицинской терминологии на изучаемом языке, ключевое значение приобретает формирование этико-речевых компетенций. Необходимость следования этическим нормам стано-

вится императивом в процессе обучения в медицинском вузе, поскольку от уровня сформированности профессиональных речевых навыков доктора зависит эффективность всего лечебно-диагностического процесса. В статье предпринята попытка описать опыт решения этих задач на занятиях по русскому языку как иностранному (далее – РКИ) с применением видеотреппментов неаутентичного сериала «Доктор Хаус».

Педагогический потенциал телевизионных сериалов медицинского содержания в работе со студентами соответствующих специальностей уже долгое время является предметом изучения многих зарубежных исследователей [17; 18; 20; 22 и др]. Особое место в этом ряду занимают работы, посвященные изучению возможностей применения сериала «Доктор Хаус» в образовательном процессе [19; 21 и др.]. Как правило, выделяются две группы профессиональных компетенций, которые можно развивать путем просмотра и обсуждения данного сериала на занятиях: повышение диагностических способностей будущих врачей, особенно в отношении редких заболеваний, и развитие этических профессиональных компетенций. Вопрос целесообразности развития последних посредством данного сериала остается дискуссионным. В ряде исследований содержится противоречивая характеристика главного героя - доктора Хауса, в соответствии с которой его статус выдающегося диагноста часто сочетается с грубым нарушением требований профессиональной этики. В данной работе указанное противоречие рассматривается не как ограничение педагогического потенциала сериала, а как возможность придать обсуждению видеотреппментов характер проблемной дискуссии со множеством открытых вопросов, требующих от студентов рефлексии на русском языке, который является средством решения коммуникативной задачи, а не целью обучения.

Цель исследования – описание методической модели использования видеотреппментов тематически ориентированного неаутентичного сериала в развитии профессиональных коммуникативных компетенций иностранных врачей.

Предложенная модель апробирована на занятиях по русскому языку как иностранному в Тюменском государственном медицинском университете со студентами второго курса из Китая и Египта, уровень владения русским языком которых соответствует показателям А2-В1.

Очевидные преимущества видеоресурсов в формировании иноязычной коммуникативной компетенции подробно описаны в лингводидактических исследованиях. Среди них работы И.В. Андреевой, Л.А. В.Г. Костомарова, Ю.Е. Курбатовой, Я.М. Колкер, А.Н. Шукина и др. В нашей работе акцент сделан на видеоконтенте, включающем элементы проблемной дискуссии в ситуации общения врача с пациентом на разных этапах медицинской консультации.

Отдельно обозначим вопрос использования типа визуального компонента, используемого на занятиях. Так, преимуществами аутентичных видеоматериалов авторы называют возможность погружения в реальную языковую среду, знакомство с невербальными и паралингвистическими особенностями речи [4; 10]. Однако мы солидарны с учеными [13], считающими, что неаутентичный материал адекватен уровню владения языком обучающимися. Неаутентичные видео медицинской тематики представляются более доступными для понимания в силу того, что они не отягощены специфическим национально-культурным языковым компонентом. Кроме того, наш выбор обусловлен стремлением нивелировать различия в этической составляющей взаимодействия «доктор-пациент» разных лингвокультурных общностей (родной для студентов и изучаемой). Неаутентичный видеоматериал содержит инвариантные, универсальные речевые стратегии и тактики, а значит, упрощает задачу их оценки обучающимися. При этом обсуждение проблемных ситуации и путей их решения происходит без отвлечения на распознавание и понимание инокультурных этических особенностей, что особенно важно на начальном этапе освоения языка.

Тематическая заданность видеоэпизодов позволяет одновременно решать на занятиях две задачи: расширение собственно лингвистических компетенций студентов и развитие речевых навыков в профессиональной сфере. В ситуации делового общения, как отмечает Т.В. Козлова, «возрастает значение нормативно-ролевых предписаний как фактора детерминации коммуникативного поведения личности, поэтому важным показателем уровня коммуникативной компетенции сотрудников является соблюдение определенных норм общения» [5, с. 564]. Кроме того, тематическая определенность материала оказывает влияние на мотивацию будущих врачей, так как «при обучении русскому языку как иностранному познавательный интерес как мотив учебной деятельности студента, связанный с его специальностью, обладает наибольшей побудительной силой» [2, с. 589].

Материалы и методы

Для развития двух типов компетенций: этической и коммуникативной – мы применили следующие группы методов:

1. Методы, направленные на развитие профессионально-коммуникативных компетенций: метод проектирования учебного процесса, включающий имитационное моделирование профессиональных ситуаций; мониторинг продуктивности дидактического инструментария с последующей оценкой эффективности комплекса педагогических средств.

2. Методы, обеспечивающие усвоение лексического и грамматического материала: контекстуальная семантизация лексических единиц медицинской направленности; выявление многозначности отдельных лексем и актуализация их значений; метод грамматического анализа профессиональной речи; метод аудиолингвальной имитативной тренировки; метод речевого моделирования; критериальное оценивание речевой деятельности студентов.

Фактическим материалом исследования являются 48 эпизодов из фильма «Доктор Хаус», демонстрирующих те или иные ошибки в общении врача и пациента. Данные фрагменты являются основой для сформированных нами проблемных кейсов, обсуждение которых включает разбор используемых врачом и пациентом речевых конструкций, исправление некорректных фраз врача, анализ коммуникативных стратегий персонажей.

Результаты и обсуждение

Используя программу CapCut, мы отобрали фрагменты сериала «Доктор Хаус», обладающие проблемным потенциалом для демонстрации на занятиях. Смонтированные нами эпизоды касаются обсуждения тем, которые часто являются конфликтогенными в медицинской сфере общения: обвинение доктора в безразличии к больному родственниками пациента; скептическое отношение родителя ребенка к вакцинации; нежелание пациентки взаимодействовать с докторами по причине дефекта внешности (лишнего веса); вред вегетарианства для новорожденного ребенка; недоверие к доктору в связи с расовыми предрассудками; отказ пациента от лечения вследствие необходимости работать; публичное обсуждение и высмеивание доктором определенных симптомов пациента.

Основные принципы реагирования врачей на сложные этико-коммуникативные ситуации в клинической практике регламентированы в международных этических кодексах, таких как: Женевская декларация Всемирной медицинской ассоциации, Международный кодекс медицинской этики, Декларация Всемирной медицинской ассоциации о безопасности пациентов [3] и др. Однако эти рекомендации имеют характер общих ориентиров, не содержащих детализированных алгоритмов действий для каждой ситуации.

С общими принципами, представленными в международных руководствах, студенты знакомятся на соответствующих специальных курсах, в частности «Пациент-ориентированные коммуникации в деятельности врача-лечебника», «Биоэтика» и др. Актуализация же подобных проблем с помощью видеопроизведений на занятиях по РКИ, во-первых, «помещает» студентов в максимально реалистичный контекст проблемного кейса,

во-вторых, инициирует рефлексию на заданную тему на изучаемом языке, а значит, в перспективе расширяет возможности их профессиональной деятельности в русскоязычной среде. Обсуждение предложенных студентам видеофрагментов является важным подготовительным этапом к реальной коммуникации, которая требует немедленного речевого реагирования. Речевое поведение человека, по мнению И.В. Одинцовой, – «это всегда оценка ситуации в целом, опирающаяся на контекст текущих событий, контекст накопленного жизненного опыта» [11, с. 617]. Поэтому такая практика формулировки мнения является своеобразной «репетицией» взаимодействия врача и пациента в потенциально конфликтных ситуациях.

Рассмотрим алгоритм применения видеофрагментов сериала в качестве кейсов для анализа коммуникативных стратегий и выявления отклонений/соответствий профессиональному этическому кодексу.

После аудиторного просмотра и обсуждения фактического смысла диалогов студентам предлагается дать оценку качества коммуникации во фрагменте с опорой на чек-лист (табл. 1). В своей работе мы опираемся на оценку только базовых коммуникативных навыков врача, так как уровень реализации «продвинутых» навыков могут определить специалисты-клиницисты.

Далее мы определяем стратегии участников общения, которые, как выяснилось, не всегда очевидны для иностранных студентов. Так, фраза родителей, адресованная к доктору: «Как вы можете здесь просто сидеть?» - не всегда распознается студентами как стратегия обвинения в форме вопроса. Ввиду особенностей восприятия материала иностранными врачами, им сложно выявить проявление иронии в коммуникации врача, пациента или его родственников.

На следующем этапе будущие врачи оценивают ситуацию общения с пациентом, исходя из двух параметров: эффективности коммуникации и вежливости доктора. Градацию каждого из этих критериев предлагаем определить по 5-бальной шкале. Большинство студентов, оценивая, приходят к выводу, что профессиональный стиль общения доктора Хауса часто эффективен, но неэтичен. Анализ заданных выше параметров позволяет увидеть разнообразие представленных коммуникативных стратегий врача. Так, в предложенных видеофрагментах студенты наблюдают за коммуникацией, полностью соответствующей требованиям успешности (эффективной и вежливой), а также абсолютно не соответствующей этим требованиям (невежливой и неэффективной). Кроме того, на примерах обучающиеся понимают, что характеристика коммуникативных навыков врача может быть частично успешной, например соответствовать этическим нормам, но быть неэффективной при условии недостижения док-

тором цели, когда ему не удастся убедить пациента. С другой стороны, выбранная доктором стратегия убеждения может быть максимально эффективна, но некомфортна для пациента, а значит, незтична.

Таблица 1.

Оценка коммуникативных навыков с опорой на Калгари-Кембриджскую модель консультирования

Table 1. Assessment of Communication Skills Based on the Calgary-Cambridge Counseling Model

№	Навыки	10 Эффективно, полностью, уместно	5 Формально, неполно- стью, с ошибками	0 Не выполнено
Базовые навыки	1. Организация интервью: приветствие, самопрезентация, соблюдение дистанции	Приветствовал пациента. Познакомился, либо назвал его по имени в случае повторного приема. Представился как доктор, позаботился о комфортной позиции пациента вначале и на протяжении всего интервью. Принял и соблюдал оптимальную дистанцию для пациента. Устанавливает и держит зрительный контакт на протяжении всего интервью.	Приветствовал пациента безлично, с холодными, формальными интонациями, мало заботился о комфорте пациента в начале и ходе интервью, применил неудобную для пациента и работы врача дистанцию	Не использовал приветствие, не представился, пациент находился в некомфортных условиях, игнорировал недовольство пациента условиями интервью. Не смотрит на пациента.
	2. Активное слушание (пауза, резюмирование, поощрение)	Слушал внимательно, не перебивая пациента; соблюдал адекватные паузы в интервью при объяснениях для уточнения понимания пациентом. Использовал резюмирование, произносил звуки «угу», кивал головой для поощрения пациента говорить дальше	Не выглядел внимательным, изредка отвлекается. Использовал резюмирование не вполне верно понял пациента, не использовал (использовал неполностью) невербальные признаки активного слушания	Не слушает пациента, занят записями или посторонними действиями. Не использовал резюмирование и активное слушание.
	3. Применение эмпатии Управление интервью, речь	Задавал достаточное количество открытых вопросов, побуждая пациента говорить (сбор жалоб, анамнеза). Активно выявлял точку зрения пациента. Соблюдал соответствующие интонацию и темп речи при беседе с пациентом. Выделял голосом главные моменты.	Задавал преимущественно закрытые вопросы, мало побуждал пациента детализировать своё состояние и высказывать свою точку зрения. Говорил чрезмерно быстро или медленно, с монотонными интонациями, проглатывая слова. Не акцентировал внимание на главных моментах интервью.	Не задавал вопросов, слушал только спонтанную речь пациента. Речь врача невнятная, непонятная, сумбурная, с использованием слов-«сорняков», с отвлечением на посторонние темы.

Следуя нашему алгоритму развития навыков общения, далее обучающиеся должны заменить неэффективные и конфликтные стратегии врача, представленные на видео, другой тактикой, изменяя слова, фразы, тональность для коррекции коммуникативной ошибки доктора Хауса. Самостоятельное продуцирование студентами приемлемых, соответствующих нормам тактик вызывает наибольшие затруднения и способствует их неторопливой интеллектуальной работе. Поэтому после аудиторного обсуждения студентам предлагается снова вернуться к этому виду работы в спокойной обстановке в качестве домашнего задания. В результате у будущих иностранных врачей появляется арсенал готовых шаблонов-реакций на ряд актуальных проблем, с которыми встречаются медицинские работники.

Рассмотрим проявление коммуникативной стратегии – обвинение в безразличии к пациенту - на основе видеофрагмента:

Родители пациента: - Как вы можете просто сидеть? (Коммуникативная тактика (далее – КТ) - *обвинение доктора в равнодушии к пациенту*).

Доктор Хаус: - Если ем стоя, я проливаю. (КТ – *игнорирование претензии в виде формального ответа на вопрос с подтекстом*).

Родители пациента: - Наш сын умирает, а вам плевать? (КТ - *повторное обвинение доктора*). Мы с ума сходим, а вы ничего не делаете (КТ - *прямое обвинение*).

Доктор Хаус: - Вам хочется на ком-то сорваться, я понимаю (КТ - *рефлексия доктора и оценка эмоционального состояния родителей пациента*, КТ – *повторное игнорирование обвинения*).

Родители пациента: - Оставьте свою снисходительность при себе (КТ - *указание на неуместность предыдущей реплики доктора*). Вы его ни разу не проводали (КТ - *третье обвинение*).

Далее, в диалоге, в качестве аргумента в свою защиту доктор Хаус демонстрирует точное знание всех необходимых параметров здоровья своего пациента, что снижает напряженность общения, и родители больного уходят.

Оценивая данный видеофрагмент, обучающиеся безошибочно определяют ситуацию общения как конфликтную, не соответствующую этическим нормам и неэффективную. Обсуждение в аудитории позволяет студентам распознать деструктивные коммуникативные тактики доктора Хауса.

В качестве собственных корректных вариантов ответов доктора студенты предлагают разнообразные стратегии: от противоположных представленным в видеофрагменте до оправдывающих поведение доктора Хауса, в частности: *«Нельзя работать целый день без перерыва. Я лучше поставлю диагноз, если буду иногда отдыхать, а кофе в перерыве способствует лучшей работе мозга»*; *«Я вижу, что вы расстроены, это понятно. У*

вас веские причины для этого. Садитесь рядом, я все спокойно объясню и отвечу на все ваши вопросы»; «Я делаю все, что могу. Доктор – тоже человек, которому, как и всем остальным людям, нужен отдых».

Мнения студентов, которые разделяют позицию доктора Хауса в конфликте, были единичными. Большинство обучающихся крайне низко оценивают этическую составляющую профессиональной компетенции Хауса. Часть студентов считают, что подобное поведение доктора в реальной ситуации с большой долей вероятности может привести к физическому противостоянию и возврату стоимости лечения.

Отдельных комментариев требовали те варианты ответов, которые содержали в себе только извинения и готовность незамедлительно вернуться к работе – то есть фактическое признание доктором своей вины. В ходе обсуждения мы приходили к выводу, что подобные ответы могут снизить доверие к доктору. Тактика извинения лишь укрепляет уверенность родственников пациента в том, что они правы и что без их контроля доктор Хаус не проявит ответственность к работе.

Отметим, что общей чертой всех ответов китайских студентов был фокус на эффективности работы доктора. Так или иначе все пытались объяснить родителям пациентов, что своевременные перерывы – важное условие хорошей работы и отдых доктора в конечном счете пойдет на пользу их сыну. В то время как ответы студентов из Египта способствовали установлению эмоционального контакта между доктором и родителями. Варианты ответов арабских студентов свидетельствуют, что будущие доктора не готовы обсуждать эффективность работы в негативном ключе. Они предлагали сменить стиль общения на более уважительный и спокойный и только после этого перейти к обсуждению фактической стороны проблемы. При этом студенты из Египта подчеркнули, что независимо от эмоционального состояния родственников пациента, врач всегда должен сохранять спокойствие как признак профессиональной компетенции.

Отдельных замечаний требуют ответы, в которых студенты допускали юмор. В связи с чем тьютор предложил ряд наводящих вопросов: *В каком эмоциональном состоянии находятся родители пациента в этой коммуникативной ситуации? / Пациенты способны смеяться над шутками в данной ситуации? / Шутки в данном контексте способствуют гармонизации общения? / Должен ли доктор учитывать эмоциональное состояние родственников или должен придерживаться стратегии защиты своей репутации любыми способами?* Ответы на эти вопросы приводят студентов к выводу, что больница не место для юмора. Коммуникация между доктором и родственниками пациента обусловлена стрессом - уязвимым и нестабиль-

ным эмоциональным состоянием последних, даже в ситуациях, когда родственники пациентов ставят под сомнения профессиональные компетенции доктора, оценивают его поведение или переходят к прямым обвинениям.

Кроме развития этико-речевых компетенций просмотр видеоматериалов, безусловно, способствует формированию речевых умений обучающихся: они расширяют знания общеупотребительной и профессиональной лексики, видят, как функционируют в речи разговорные и экспрессивно окрашенные единицы. Выявление разговорных слов и стилистически сниженных элементов в речи готовит студентов к реальной коммуникации с пациентами, в которой фразы участников общения могут не соответствовать строго нормированным литературным нормам.

Работа над видеофрагментами предполагает обязательный преддемонстрационный этап, на котором педагог вводит в речь общеупотребительную лексику и соответствующие грамматические структуры.

В качестве подготовки к работе с видео о вреде вегетарианства для новорожденных детей студентам предлагается распределить уже известные и новые лексические единицы группы «Еда» по подгруппам, исходя из отнесенности продукта к группе источников белков, жиров и углеводов. Использование средств инфографики с изображением продуктов способствует актуализации уже известных студентам лексем данной группы и семантизации неизвестных слов. Затем обучающимся предлагается распределить все номинации продуктов последовательно в группы разных витаминов. Так, студенты называли продукты, в которых содержатся витамины «А», «В1», «В2» и так далее. Такая работа позволяет иностранным обучающимся понять, что произношение названия витаминов в русском языке отличается от интернациональных, написанных латиницей. В частности, *витамин А*, который студенты привыкли называть [Эй], в русском языке звучит как [А]; *витамин*, называемый инофонами как [Би] – В, в русском языке произносится [Бэ]; *биотин* – *витамин Н* [Эйч] – называют В7 [Би с'эм'].

Предлагаем использовать задание, направленное на подготовку к восприятию ситуации общения врача с пациентом – сторонником особого типа питания. Повторение названий продуктов при распределении их в разные подгруппы (*белки-жиры-углеводы, веганы, витамины*), многократное соотношение изображения с номинацией способствует закреплению новой лексики, расширению коммуникативной «свободы» в обсуждении видеофрагмента: *Почему детям нельзя быть вегетарианцами? / Какие микрорезультаты содержатся в мясных продуктах? / Какие микрорезультаты жизненно необходимы для растущего организма? Почему?*

На демонстрационном этапе для актуализации профессиональной лексики мы используем метод «стоп-кадр» - остановку видео для более предметного обсуждения ситуации, номинирования деталей в изображении, связанных с медицинской сферой. Тематическая направленность видеоматериала обеспечивает семантизацию соответствующей лексики: *стетоскоп, капельница, весы, ординаторская, медицинский халат, колба и др.* С использованием стоп-кадров можно актуализировать и другие тематические группы, например: «Внешность»: *гнев, страх, уверенность, грусть, негодование, растерянность и т.д.*, «Характер»: *добрый, умный, хитрый, недоверчивый, лживый, честный и др.*

Предлагаем также обратить внимание студентов на слова в видео, которые в медицинском контексте реализуют свое неосновное значение. Так, лексема «выписывать» в значении «исключить из состава, из числа находящихся где-либо», слово «рецепт» в значении «письменное предписание врача в аптеку о составе лекарств или перечне лекарств с описанием способа его применения для больного».

Ввод новой для студентов экспрессивной лексики сопровождается на занятиях стилистическим комментарием преподавателя. Так, мы обозначили границы сферы употребления таких единиц, как «плевать» в значении «относиться к к.-л., ч.-л. с презрением, безразличием», «прищучить», «вкуснотища» и подобные.

Соответствующие комментарии также важны при анализе фразеологических оборотов и лексем, актуализирующих переносное значение: глагол *сорваться* в значении «утратить самоконтроль, власть над своими поступками, действиями», идиома *врать в глаза*. Некоторые неосновные значения студенты определяют самостоятельно в процессе обсуждения. Так, контекстуальный анализ компонентов, входящих во фразеологизм «с ума сходить», позволил обучающимся самим понять данное сочетание: от первоначального их предположения - «быть глупым», далее в процессе рассуждения - «потерять разум», «вести себя неадекватно из-за переживания» до «переживать сильные неприятные эмоции».

В каждом видео имеется потенциал для тренировки использования определенной грамматической конструкции. Так, фрагмент видео о недоверии пациента к доктору из-за подозрений в расизме становится стимулом для изучения грамматической сочетаемости глагола *доверять/не доверять* (например: *кто* (первая форма, Именительный падеж) *не доверяет кому* (третья форма, Дательный падеж) *из-за чего* (вторая форма, Родительный падеж), а также для ввода сложных несистемных словообразовательных парадигм: *ложь – лгать – лживый*.

Заключение

Профилактика коммуникативных ошибок в паре «врач – пациент» способствует развитию навыков конструктивного общения с больными. Мы предлагаем использовать видеоресурсы в рамках формирования диагностических способностей будущих врачей и развития их этико-профессиональных компетенций с опорой на методическую модель в два этапа:

1) преддемонстрационный этап, включающий отработку вводимой профессиональной лексики, упражнения по ее семантизации и особенностям употребления в виде грамматических конструкций; 2) демонстрационный этап, касающийся оценки базовых коммуникативных навыков врача с опорой на чек-лист; определения коммуникативных стратегий участников диалога; анализа ситуации по параметрам: эффективности и соответствию нормам речевого этикета (вежливости); коррекции неэффективных коммуникативных стратегий в виде высказываний, соответствующих нормам пациентоцентричной коммуникации.

Предлагаемая технология способствует выявлению национальных особенностей врачебной коммуникации будущих иностранных врачей. Мы выявили, что иностранные врачи из Китая в большей степени ориентированы на эффективность коммуникации с пациентом, а будущие врачи из арабских стран – на установление эмоционального контакта с участниками ситуации.

Считаем, что предложенная методика, основанная на использовании видеоконтента профессиональной направленности, способствует развитию практикоориентированного подхода к изучению коммуникативных навыков будущего врача и актуализации необходимых этических норм его речевого поведения в поликультурной среде за счет решения проблемных кейсов; созданию условий для успешной адаптации будущих специалистов к русскоязычному пространству профессиональной коммуникации; углублению знаний студентов в области медицинской терминологии, расширению активного словарного запаса.

С каждым годом количество иностранных студентов, изучающих медицину на неродном, русском языке, увеличивается, поэтому освоение универсальных принципов общения в паре «доктор-пациент» способствует развитию профессиональной компетенции будущих врачей.

Список литературы

1. Балашова, М. Е., Рябошапка, А. И., Балашова, Т. С., & др. (2025). Взаимодействие врача и пациента на амбулаторном этапе: эффективная коммуникация как фактор качества лечения. *Пермский медицинский журнал*, 42(1), 105–111. <https://doi.org/10.17816/pmj421105-111>. EDN: <https://elibrary.ru/WEIBNG>

2. Большакова, Н. Г. (2010). О развитии познавательного интереса у иностранных учащихся при чтении. В *Русский язык: исторические судьбы и современность. Материалы IV Международного конгресса исследователей* (с. 589–590). Издательство Московского университета. EDN: <https://elibrary.ru/YMXKAF>
3. Всемирная медицинская ассоциация. (2005). *Декларация Всемирной медицинской ассоциации о безопасности пациентов*. <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-on-patient-safety>
4. Ивкина, М. И. (2025). Кинопедагогика в преподавании русского языка как иностранного: использование фильмов для понимания культурных кодов. *Мир науки, культуры, образования*, 2(111), 317–321. <https://doi.org/10.24412/1991-5497-2025-2111-317-321>. EDN: <https://elibrary.ru/NVWQGH>
5. Козлова, Т. В. (2007). Лингводидактические основы обучения иностранцев русскому языку делового общения в современных условиях. В *Русский язык: Исторические судьбы и современность. Материалы III Международного конгресса исследователей* (с. 564–565). МАКС Пресс.
6. Король, А. М., & Чан Ха Ми. (2024). Влияние стереотипов и предрассудков на межкультурное взаимодействие между врачом и пациентом. В *Актуальные проблемы современной медицины и фармации 2024: сб. тез. докл. LXXVIII Междунар. науч.-практ. конф.* (с. 1177). Белорусский государственный медицинский университет. <https://rep.bsmu.by/handle/BSMU/52096>
7. Кочеткова, Т. В., Барсукова, М. И., Ремпель, Е. А., & Рамазанова, А. Я. (2018). Медицинский дискурс: специфика профессиональной коммуникации врача. *Мир науки, культуры, образования*, (70), 466–467. EDN: <https://elibrary.ru/XUNFTF>
8. Кравченко, Л. М. (2019). Проблемы коммуникации в медицине как ведущая причина врачебных ошибок. *Colloquium-Journal*, 7-4(31), 40–42. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10165>. EDN: <https://elibrary.ru/ZCWUJF>
9. Левина, Е. Н., & Фролова, А. М. (2025). Обучение иностранных студентов-медиков стратегиям ведения профессионального диалога-расспроса на русском языке с учетом коммуникативно-речевого портрета пациента. *Филологические науки. Вопросы теории и практики*, 18(1), 345–352. <https://doi.org/10.30853/phil20250051>. EDN: <https://elibrary.ru/ZACIMT>
10. Никитина, С. Е., & Корнева, И. Г. (2020). Роль аутентичных иностранных фильмов в развитии социолингвистической компетентности студентов. *Проблемы современного педагогического образования*, (67-4), 318–321. EDN: <https://elibrary.ru/HUNTMX>
11. Одинцова, И. В. (2010). Коммуникативная ситуация и фрейм как педагогические категории. В *Русский язык: Исторические судьбы и современность. Материалы IV Международного конгресса исследователей русского языка* (с. 617–618). Издательство Московского университета. EDN: <https://elibrary.ru/UKRFHP>

12. Орлова, Е. В. (2012). Нужен ли врачу русский язык? *Мир русского слова*, 1, 31–35. <https://doi.org/10.24158/mrs.2012.1.31-35>. EDN: <https://elibrary.ru/PASOGB>
13. Решетникова, В. В. (2016). Формирование лингвокультурной компетентности как необходимый элемент в процессе обучения русскому языку как иностранному. В *Новая Россия: традиции и инновации в языке и науке о языке: материалы докладов и сообщений Международной научной конференции* (с. 609–614). Кабинетный ученый. EDN: <https://elibrary.ru/XSNBZJ>
14. Сандаков, Я. П., Кочубей, А. В., Кочубей, В. В., & Евдошенко, О. А. (2019). Оценка удовлетворенности пациентов. *Вестник Всероссийского общества специалистов по медико-социальной экспертизе, реабилитации и реабилитационной индустрии*, 3, 84–91. <https://doi.org/10.17238/issn1999-2351.2019.3.84-91>. EDN: <https://elibrary.ru/QKFOGV>
15. Таратухин, Е. О., Шахабов, И. В., & Трифонова, И. А. (2025). Учёт культурных особенностей пациентов- и врачей-иностранцев как фактор безопасности и качества охраны здоровья. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 24(4S):4659, 20–25. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2025-4659>. EDN: <https://elibrary.ru/UTTEIO>
16. Хвоц, Р. Н., & Макарова, О. В. (2021). Интерпретация эмоциональной речи пациента как элемент коммуникативной компетенции врача. *Медицинская наука и образование Урала*, 22(1), 66–70. <https://doi.org/10.36361/1814-8999-2021-22-1-66-70>. EDN: <https://elibrary.ru/PBZJFF>
17. Cambra-Badii, I., Moyano, E., Ortega, I., et al. (2021). TV medical dramas: Health Sciences Students' Viewing Habits and Potential for Teaching Issues Related to Bioethics and Professionalism. *BMC Med Educ*, 21, 509. <https://doi.org/10.1186/s12909-021-02947-7>. EDN: <https://elibrary.ru/LMMYIL>
18. Hirt, C., Wong, K., Erichsen, S., & White, J. S. (2012). Medical dramas on television: A brief guide for educators. *Medical Teacher*, 35(3), 237–242. <https://doi.org/10.3109/0142159X.2012.737960>
19. Jerrentrup, A., Müller, T., Glowalla, U., et al. (2018). Teaching Medicine With the Help of “Dr. House”. *PLoS ONE*, 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193972>
20. Czarny, M. J., Faden, R. R., Nolan, M. T., Bodensiek, E., & Sugarman, J. (2008). Medical and Nursing Students' Television Viewing Habits: Potential Implications for Bioethics. *The American Journal of Bioethics*, 8(12), 1–8. <https://doi.org/10.1080/15265160802559153>
21. Spike, J. (2008). Television Viewing and Ethical Reasoning: Why Watching Scrubs Does a Better Job Than Most Bioethics Classes. *The American Journal of Bioethics*, 8(12), 11–13. <https://doi.org/10.1080/15265160802495630>
22. Van Ommen, M., Daalmans, S., et al. (2014). Who Is the Doctor in This House? Analyzing the Moral Evaluations of Medical Students and Physicians of House, M.D. *AJOB Empirical Bioethics*, 5(4), 61–74. <https://doi.org/10.1080/23294515.2014.938198>

References

1. Balashova, M. E., Ryaboshapko, A. I., Balashova, T. S., et al. (2025). Interaction between the doctor and the patient at the outpatient stage: Effective communication as a factor in the quality of treatment. *Perm Medical Journal*, 42(1), 105–111. <https://doi.org/10.17816/pmj421105-111>. EDN: <https://elibrary.ru/WEIBNG>
2. Bolshakova, N. G. (2010). On the development of cognitive interest in foreign students while reading. In *Russian Language: Historical Destinies and Modernity. Proceedings of the IV International Congress of Researchers* (pp. 589–590). Moscow University Press. EDN: <https://elibrary.ru/YMXKAF>
3. World Medical Association. (2005). *WMA Declaration on Patient Safety*. <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-on-patient-safety>
4. Ivkina, M. I. (2025). Cinemapedagogy in teaching Russian as a foreign language: Using films to understand cultural codes. *The World of Science, Culture, and Education*, 2(111), 317–321. <https://doi.org/10.24412/1991-5497-2025-2111-317-321>. EDN: <https://elibrary.ru/NVWQGH>
5. Kozlova, T. V. (2007). Linguodidactic foundations for teaching foreigners the Russian language for business communication in modern conditions. In *Russian Language: Historical Destinies and Modernity. Proceedings of the III International Congress of Researchers* (pp. 564–565). MAKSS Press.
6. Korol, A. M., & Chan Ha Mi. (2024). The influence of stereotypes and prejudices on intercultural interaction between the doctor and the patient. In *Current Problems of Modern Medicine and Pharmacy 2024: Collection of Abstracts of the LXXVIII International Scientific and Practical Conference* (p. 1177). Belarusian State Medical University. <https://rep.bsmu.by/handle/BSMU/52096>
7. Kochetkova, T. V., Barsukova, M. I., Rempel, E. A., & Ramazanov, A. Y. (2018). Medical discourse: The specifics of professional doctor–patient communication. *The World of Science, Culture, and Education*, (70), 466–467. EDN: <https://elibrary.ru/XUNFTF>
8. Kravchenko, L. M. (2019). Communication problems in medicine as the leading cause of medical errors. *Colloquium-Journal*, 7-4(31), 40–42. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10165>. EDN: <https://elibrary.ru/ZCWUJF>
9. Levina, E. N., & Frolova, A. M. (2025). Teaching foreign medical students strategies for conducting a professional inquiry dialogue in Russian, considering the patient’s communicative and speech profile. *Philological Sciences. Issues of Theory and Practice*, 18(1), 345–352. <https://doi.org/10.30853/phil20250051>. EDN: <https://elibrary.ru/ZACIMT>
10. Nikitina, S. E., & Korneva, I. G. (2020). The role of authentic foreign films in developing students’ sociolinguistic competence. *Problems of Modern Pedagogical Education*, (67-4), 318–321. EDN: <https://elibrary.ru/HUNTMX>
11. Odintsova, I. V. (2010). Communicative situation and frame as pedagogical categories. In *Russian Language: Historical Destinies and Modernity. Proceedings of the*

- IV International Congress of Researchers of the Russian Language* (pp. 617–618). Moscow University Press. EDN: <https://elibrary.ru/UKRFHP>
12. Orlova, E. V. (2012). Does a doctor need the Russian language? *The World of the Russian Word, 1*, 31–35. <https://doi.org/10.24158/mrs.2012.1.31-35>. EDN: <https://elibrary.ru/PASOGB>
 13. Reshetnikova, V. V. (2016). Formation of linguocultural competence as a necessary element in the process of teaching Russian as a foreign language. In *New Russia: Traditions and Innovations in Language and the Science of Language. Proceedings of the International Scientific Conference* (pp. 609–614). Kabinetnyy Uchenyy. EDN: <https://elibrary.ru/XSNBZJ>
 14. Sandakov, Ya. P., Kochubey, A. V., Kochubey, V. V., & Evdoshenko, O. A. (2019). Assessment of patient satisfaction. *Bulletin of the All-Russian Society of Specialists in Medical and Social Expertise, Rehabilitation and the Rehabilitation Industry, 3*, 84–91. <https://doi.org/10.17238/issn1999-2351.2019.3.84-91>. EDN: <https://elibrary.ru/QKFOGV>
 15. Taratukhin, E. O., Shakhobov, I. V., & Trifonova, I. A. (2025). Considering the cultural characteristics of foreign patients and doctors as a factor in safety and quality of healthcare. *Cardiovascular Therapy and Prevention, 24*(4S):4659, 20–25. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2025-4659>. EDN: <https://elibrary.ru/UTTEIO>
 16. Khvoshch, R. N., & Makarova, O. V. (2021). Interpretation of the patient's emotional speech as an element of the doctor's communicative competence. *Medical Science and Education of the Urals, 22*(1), 66–70. <https://doi.org/10.36361/1814-8999-2021-22-1-66-70>. EDN: <https://elibrary.ru/PBZJFF>
 17. Cambra-Badii, I., Moyano, E., Ortega, I., et al. (2021). TV medical dramas: Health Sciences Students' Viewing Habits and Potential for Teaching Issues Related to Bioethics and Professionalism. *BMC Med Educ, 21*, 509. <https://doi.org/10.1186/s12909-021-02947-7>. EDN: <https://elibrary.ru/LMMYIL>
 18. Hirt, C., Wong, K., Erichsen, S., & White, J. S. (2012). Medical dramas on television: A brief guide for educators. *Medical Teacher, 35*(3), 237–242. <https://doi.org/10.3109/0142159X.2012.737960>
 19. Jerrentrup, A., Müller, T., Glowalla, U., et al. (2018). Teaching Medicine With the Help of “Dr. House”. *PLoS ONE, 13*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193972>
 20. Czarny, M. J., Faden, R. R., Nolan, M. T., Bodensiek, E., & Sugarman, J. (2008). Medical and Nursing Students' Television Viewing Habits: Potential Implications for Bioethics. *The American Journal of Bioethics, 8*(12), 1–8. <https://doi.org/10.1080/15265160802559153>
 21. Spike, J. (2008). Television Viewing and Ethical Reasoning: Why Watching Scrubs Does a Better Job Than Most Bioethics Classes. *The American Journal of Bioethics, 8*(12), 11–13. <https://doi.org/10.1080/15265160802495630>

22. Van Ommen, M., Daalmans, S., et al. (2014). Who Is the Doctor in This House? Analyzing the Moral Evaluations of Medical Students and Physicians of House, M.D. *AJOB Empirical Bioethics*, 5(4), 61–74. <https://doi.org/10.1080/23294515.2014.938198>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Бердина Марина Павловна, доцент кафедры русского языка как иностранного, кандидат филологических наук
Тюменский государственный медицинский университет
ул. Одесская, 54, г. Тюмень, 625023, Российская Федерация
berdina.mp@yandex.ru

Макарова Ольга Владимировна, заведующий кафедрой русского языка как иностранного, кандидат филологических наук, доцент
Тюменский государственный медицинский университет
ул. Одесская, 54, г. Тюмень, 625023, Российская Федерация
omakarova1980@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Marina P. Berdina, Associate Professor, Department of Russian as a Foreign Language, Ph.D. in Philology
Tyumen State Medical University
54, Odesskaya Str., Tyumen, 625023, Russian Federation
berdina.mp@yandex.ru
SPIN-code: 6015-8151
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5972-7390>

Olga V. Makarova, Associate Professor, Department of Russian as a Foreign Language, Ph.D. in Philology
Tyumen State Medical University
54, Odesskaya Str., Tyumen, 625023, Russian Federation
omakarova1980@mail.ru
SPIN-code: 5658-9943
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3356-6794>
Scopus Author ID: 57222628365

Поступила 13.10.2025

После рецензирования 14.01.2026

Принята 26.02.2026

Received 13.10.2025

Revised 14.01.2026

Accepted 26.02.2026

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1521](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1521)EDN: [RDWJGP](https://www.edn.ru/rdwjgp)

УДК 631.3



Беспилотные авиационные системы и их влияние на деятельность аграрных предприятий

Е.Д. Коровин, А.Е. Трубин, А.Ю. Анисимов,
А.Н. Алексахин, С.А. Алексахина

Университет «Синергия», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Беспилотные авиационные системы (далее по тексту БАС) используются в различных отраслях экономики, военной деятельности, строительстве, нефтегазовом секторе и повседневной жизни. Внедрение БАС в деятельность предприятий агропромышленного сектора позволяет не только улучшить производительность, сократить затраты на труд и ресурсы, но и оперативно мониторить и диагностировать поля, находить и фиксировать, а затем точно обрабатывать проблемные участки. «Умное» сельское хозяйство становится популярной концепцией во всем мире. Применение БАС позволит сельскохозяйственным товаропроизводителям улучшить свои экономические показатели, снизить издержки и повысить точность производственных процессов.

Целью исследования является проведение оценки влияния БАС на деятельность аграрных предприятий. Поставленная цель была декомпозирована на следующие задачи: охарактеризовать БАС; проанализировать зарубежный рынок БАС; выявить преимущества от внедрения БАС в сельскохозяйственную отрасль; проанализировать влияние БАС на деятельность аграрных предприятий на примере Ростовской области; провести расчеты и оценить влияние БАС на экономические показатели аграрных предприятий.

Материалы и методы. Решению обозначенных задач и достижению поставленной цели способствовали выбранные методы исследования: системный анализ и синтез, библиометрический анализ источников, статистический анализ данных, сравнительный анализ, а также табличный и графический методы.

Результатом исследования является вывод о возможностях улучшения экономических показателей сельскохозяйственной отрасли с помощью внедрения

беспилотных авиационных систем. Авторы констатируют, что внедрение БАС способствует снижению затрат, росту прибыли и экономии времени на процесс обработки полей и посевов. На примере беспилотника DJI Agras MG-1 было выявлено, что затраты на содержание дрона составят 108 500 руб. в год, а годовая заработная плата сотрудникам 1 356 000 руб. в год. Использование БАС в деятельности аграрных предприятий окупится за 9,6 месяцев, а прибыль составит 249 500 руб. Полученные результаты доказывают положительное влияние БАС на экономические показатели аграрных предприятий: сократить затраты и увеличить прибыль, а также позволяют экономить на рабочей силе и времени, необходимом для обработки полей и посевов.

Ключевые слова: БАС; БПЛА; аграрные предприятия; сельское хозяйство; высокие технологии; беспилотные авиационные системы; дроны; совершенствование сельского хозяйства; оценка влияния БАС

Для цитирования. Коровин, Е. Д., Трубин, А. Е., Анисимов, А. Ю., Алексахин, А. Н., & Алексахина, С. А. (2026). Беспилотные авиационные системы и их влияние на деятельность аграрных предприятий. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 494-518. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1521>

Unmanned aerial systems and their impact on the activities of agricultural enterprises

E.D. Korovin, A.E. Trubin, A.Yu. Anisimov,
A.N. Aleksakhin, S.A. Aleksakhina

Synergy University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. Unmanned aerial systems (hereinafter referred to as UAS) are used in various sectors of the economy, military activities, construction, oil and gas sector and everyday life. The introduction of UAS in the activities of enterprises of the agro-industrial sector allows not only to improve productivity, reduce labor and resource costs, but also to promptly monitor and diagnose fields, find and record, and then spot treat problem areas. “Smart” agriculture is becoming a popular concept all over the world. The use of UAS will allow agricultural producers to improve their economic performance, reduce costs and increase the accuracy of production processes.

The **purpose** of this study is to assess the impact of UAS on the activities of agricultural enterprises. The goal was decomposed into the following tasks: to characterize UAS; to analyze the foreign UAS market; to identify the benefits of introducing UAS in the agricultural sector; to analyze the impact of UAS on the activities of agricultural enterprises using the example of the Rostov Region; to carry out calculations and assess the impact of UAS on the economic performance of agricultural enterprises.

Materials and methods. The selected research methods contributed to the achievement of the set goal: system analysis and synthesis, bibliometric analysis of sources, statistical data analysis, comparative analysis, as well as tabular and graphical methods.

The **result** of the study is a conclusion on the possibilities of improving the economic indicators of the agricultural sector through the introduction of unmanned aerial systems. The authors state that the introduction of UAS helps to reduce costs, increase profits and save time on the process of processing fields and crops. Using the DJI Agras MG-1 drone as an example, it was found that the cost of maintaining the drone will amount to 108,500 rubles per year, and the annual salary of employees will be 1,356,000 rubles per year. The use of UAS in the activities of agricultural enterprises will pay off in 9.6 months, and the profit will be 249,500 rubles. The results obtained prove the positive impact of UAS on the economic indicators of agricultural enterprises: reduce costs and increase profits, and also allow saving on labor and time required for processing fields and crops.

Keywords: UAS; UAVs; agricultural enterprises; agriculture; high technologies; unmanned aircraft systems; drones; improvement of agriculture; assessment of the impact of UAS

For citation. Korovin, E. D., Trubin, A. E., Anisimov, A. Yu., Aleksakhin, A. N., & Aleksakhina, S. A. (2026). Unmanned aerial systems and their impact on the activities of agricultural enterprises. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 494-518. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1521>

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и основанные на них беспилотные авиационные системы (БАС) применяются сегодня в самых различных сферах нашей жизни – от сельского хозяйства и энергетики, до строительства и нефтегазовой промышленности. Возможности современных БАС позволяют им становиться участниками воздушного движения, что подразумевает регулирование их создания и применения со стороны государства. Однако в отношении быстроразвивающихся технологий государственные регуляторы как в Российской Федерации, так и в других странах мира не всегда успевают в своих решениях за быстроменяющимися реалиями.

Актуальность данной темы состоит в том, что применение современных технологий позволяет различным отраслям экономики совершенствоваться и повышать производительность. Сельское хозяйство, как отрасль, нуждается в более технологичных способах увеличения объемов производства. В связи с растущей необходимостью применения инновационных подходов к улучшению экономических показателей в сельском хозяйстве

появилась перспектива использования БАС (беспилотных авиационных систем). Упрощая обработку полей, определение уровня урожайности и других важных аспектов, БАС помогают ускорить производственные процессы и положительно повлиять на экономическую эффективность сельскохозяйственной отрасли [5]. Далее в статье будут рассмотрены, более подробно, преимущества использования БАС в сельскохозяйственном секторе и перспективы улучшения экономических показателей за счет внедрения данных систем.

Цель исследования заключается в проведении оценки влияния БАС на деятельность аграрных предприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо выделить и решить следующие задачи:

- 1) охарактеризовать БАС;
- 2) проанализировать зарубежный рынок БАС;
- 3) выявить преимущества от внедрения БАС в сельскохозяйственную отрасль;
- 4) проанализировать влияние БАС на деятельность аграрных предприятий на примере Ростовской области;
- 5) оценить влияние БАС на экономические показатели аграрных предприятий.

Гипотеза исследования состоит в предположении о том, что внедрение БАС (беспилотных авиационных систем) в сельское хозяйство в России значительно улучшит экономические показатели отечественных аграрных предприятий, аналогично опыту зарубежных стран.

Материалы и методы

Достижению цели способствовали выбранные методы исследования: системный анализ и синтез, библиометрический анализ источников, статистический анализ данных, сравнительный анализ, а также табличный и графический методы.

Библиометрический анализ источников позволил получить точные данные об уровне внедрения БАС в сельскохозяйственную отрасль, о степени и возможностях применения беспилотников в аграрном секторе. С помощью графического метода получилось отразить объемы российского рынка БАС, представить прогноз объемов мирового рынка БАС, проанализировать степень внедрения беспилотников в России и за рубежом. Анализ статистических данных использовался при рассмотрении использования БАС в сельскохозяйственной отрасли Ростовской области. Метод синтеза

использовался для объединения полученных данных при анализе, системное объединение информации позволило сформулировать выводы научного исследования. С помощью табличного метода были собраны данные для расчета срока окупаемости и прибыли беспилотника DJI Agras MG-1 при использовании в аграрных предприятиях.

Результаты и обсуждение

Беспилотные авиационные системы (БАС) – наиболее динамично развивающийся во всем мире класс авиационной техники, для функционирования которой не требуется пилот. БАС – это системы двойного назначения, они используют беспилотные летательные аппараты, иными словами, дроны, для упрощения множества процессов в различных отраслях экономики, в том числе и сельского хозяйства [7].

БАС разрабатываются и производятся ведущими мировыми производителями в сфере авиации, самые известные из них: Boeing (США), Airbus (Евросоюз), IAI (Израиль), AVIC (КНР), Группа «Кронштадт» (Россия) [8]. Беспилотники позволяют исследовать большие участки местности, анализировать рельеф и его особенности, выполнять определенные функции вне зависимости от погодных условий, времени года и непредвиденных ситуаций, с которыми человеку будет справиться гораздо сложнее. «Беспилотники незаменимы в современных условиях, когда техническое развитие позволяет облегчить людям жизнь и ускорить процесс выполнения задач», пишет Матюха С. В. в своей статье [8].

По прогнозам аналитиков Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН [10] в 2050 году население Земли может достигнуть 9 млрд. человек, а это значит, что людям понадобится больше продуктов питания, что спровоцирует рост спроса на сельскохозяйственную продукцию в целом. Уже сейчас необходимо улучшать экономическую результативность в сельском хозяйстве и привлекать новые технологии, которые этому поспособствуют [10].

АПК (агропромышленный комплекс) функционирует так же, как и другие виды бизнеса, нацеленный на максимальное извлечение прибыли и снижение затрат. На протяжении всего прошлого столетия сельское хозяйство использовало типовые сельскохозяйственные машины, которые потребляют много топлива, классическое удобрение и орошение, что также отнимает много человеко-сил и времени. С появлением новых агротехнологий и современных машин, необходимость использования старой техники снизилась, хотя и по-прежнему используется во многих сельских хозяйствах.

Появились современная техника и высокотехнологичные БАС (беспилотные авиационные системы), спутниковые и компьютерные системы, которые можно использовать в сельском хозяйстве. Их внедрение позволит создать точное земледелие, снизить затраты на обычную технику и сотрудников, увеличить количество производимой продукции и прибыль.

Нельзя недооценивать реальную пользу от применения беспилотников в сельскохозяйственной отрасли. Эльдиева Т.М. в своем исследовании пишет [15]: «Все чаще в небе над сельскохозяйственными угодьями можно увидеть беспилотные летательные аппараты, с помощью которых составляются карты реальной структуры посевов, отслеживается выполнение технологических операций на полях, а также проводится диагностика последствий опасных природных явлений» [11].

Наибольшую популярность БАС в сельском хозяйстве приобрели за рубежом, в США, КНР, Бразилии, Германии и Японии, и других странах. По данным организации AUVSI, в отчете под названием «The Economic Impact of Unmanned Systems Integration in the United States» [18]. В отчете The Economic Impact упоминается, что использование беспилотников в сельском хозяйстве будет наиболее масштабным, по сравнению с любой другой отраслью («dwarf all others») и к 2025 году около 80% рынка БАС и БПЛА будут использоваться в аграрном производстве Соединенных Штатов [18].

Однако, показатели использования беспилотников в России также увеличивается. Исследования показывает [9], что всемирная глобализация и рост современных технологий затрагивает абсолютно все сферы жизни граждан. Согласно долгосрочной стратегии развития зернового комплекса Российской Федерации, к 2035 году Россия может занять от 15% до 25% мирового рынка сельского хозяйства [9], а продажа беспилотников достигнет отметки более, чем 27 млрд. рублей. Данный сценарий можно считать положительным и соответственно понимать, что спрос на использование беспилотников в будущем только увеличится. Это обусловлено повышенным интересом к внедрению БПЛА в сельское хозяйство из-за хороших возможностей применения БАС (рисунок 1) [13].

Как отмечает Хорт Д.О. [14]: «Применение беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве является инновацией для России, в первую очередь, при реализации задач точного земледелия. «Беспилотники» оснащаются разнообразными датчиками, в том числе мультиспектральными камерами, высокая четкость изображения которых позволяет точно определять проблемные участки поля, системами спутниковой навигации,

малогабаритными бортовыми компьютерами и оборудованием для внесения химикатов и т.д.» [14].



Рис. 1. Целевые возможности применения БАС в сельском хозяйстве

Источник: составлено авторами на основе [4]

Fig. 1. Target applications of BAS in agriculture

Source: Compiled by the authors based on [4]

У использования беспилотников в сельском хозяйстве есть несколько преимуществ:

1. Эффективный мониторинг местности. Средства БАС позволяет с детализированной точностью отследить все особенности местности, считать состояние земли и посевов, а также найти участки, нуждающиеся в дополнительном орошении или обработке.
2. Оптимизация задействованных ресурсов. Использование дронов позволяет анализировать состояние ростков и потребность в воде.

Это позволяет использовать автоматизированный полив, который будет включаться только при необходимости, что в значительных объемах экономит воду.

3. Мобильность управления. БАС позволяют улучшить систему управления сельскохозяйственными процессами, благодаря точному мониторингу полей, снижению затрат ресурсов и повышению точности производимых операций. Дроны проверяют и анализируют поля гораздо быстрее человека, это способствует снижению производственных затрат и потраченного времени, что напрямую отражается на общей урожайности сельскохозяйственной отрасли.

Не смотря на большое количество преимуществ и практическую необходимость использования БАС в сельском хозяйстве, в России они не так популярны, как в других странах. За последние несколько лет разработано множество различных проектов применения сельскохозяйственных «дронов», но более 90% из них до сих пор не воплощены в реальность [15].

Одна из главных причин внедрения БАС в сельское хозяйство – это возможность проводить мониторинг посевов и получать актуальную информацию о состоянии сельскохозяйственных культур. Благодаря БПЛА, можно получить детальные данные о состоянии посевов, плотности посева, уровне влажности почвы, наличии сорняков и других параметрах, которые могут помочь сельскохозяйственным предприятиям повысить качество ухода за культурами, увеличить объемы получаемой продукции и улучшить экономические показатели.

В сельском хозяйстве используют два вида беспилотных аппаратов:

1. Аппараты самолетного типа – применяются для обследования больших участков земли, обладают мощными аэродинамическими показателями, не может зависать над землей и функционировать в небольшом пространстве.
2. Дроны – способны работать на маленьком участке, осуществлять точечную обработку, орошение или съемку. Дроны или квадрокоптеры обладают простыми характеристиками, стабилизацией при остановке на определенном участке, но развивают невысокую скорость.

Беспилотные летательные аппараты могут распылять удобрения, воду и совершать локальную обработку от вредителей на стеблях растений. Дроны могут добраться до самых труднодоступных участков поверхности, которые бы остались недоступны для больших сельскохозяйственных машин. Современные дроны оснащены термографическими камерами и датчиками, позволяющими считывать влажность почвы, температуру на

поверхности, наличие насекомых и вредителей, а также своевременно передавать полученную информацию. Благодаря беспилотникам, специалисты могут предпринять соответствующие меры по предотвращению потери урожая и ресурсов.

Исследование Drone Industry Insights [16] показывает, что в 2023 году объем мирового рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) достиг \$33,7 млрд. долл. США. Для сравнения, годом ранее затраты в данной сфере оценивались в \$30,4 млрд. долл. США. Таким образом, рост оказался на уровне 11%. Авторы исследования Drone Industry Insights выделяют три ключевых сегмента на рынке дронов: это разработка и производство беспилотников, программное обеспечение для беспилотников (в частности, используемое для функционирования дронов, а также ПО для обучения операторов дронов) и услуги.

Общий объем затрат на разработку и производство беспилотников в 2023 году составил 16% [16], программное обеспечение и работа с софтом составила 3,9%, а сервисы для поддержки БАС наибольший процент – 80,1%.

По оценкам Drone Industry Insight [16], объем мирового рынка БАС в 2021 году составил 26,3 млрд. долл. США. Предположительно рынок беспилотников и в дальнейшем будет стремительно развиваться, где среднегодовой прирост составит примерно 9,5%, что приведет к увеличению объемов рынка до 41 млрд. долл. США уже к 2026 году. Если же среднегодовой рост составит 16,4%, то общий объем мирового рынка БАС может достигнуть 58,4 млрд. долларов США к 2026 г.

Текущее состояние рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) характеризуется быстрым ростом и обладает значительной долей в мировой экономике. В настоящее время различные отрасли используют БПЛА для разных целей, начиная от коммерческой съемки и доставки товаров до военных операций и исследовательских миссий.

По данным аналитической компании Grand View Research [17], рынок БПЛА ожидается достигнуть объема в 127,4 млрд. долл. США к 2027 году. Этот рост обусловлен увеличением спроса на БПЛА в таких отраслях, как транспорт и логистика, сельское хозяйство, строительство, мониторинг окружающей среды и обороны. Одним из ключевых факторов, влияющих на рост рынка БПЛА, является развитие технологий и инноваций в области беспилотных систем [17]. В частности, прогресс в области автопилотных систем, искусственного интеллекта и датчиков позволяет беспилотникам стать более автономными, более точными и безопасными. На оценке ком-

пании БАС к 2030 году объем мирового рынка БАС может достигнуть 55 млрд долл., что в 2 раза превысит существующие объемы (рисунок 2) [17].

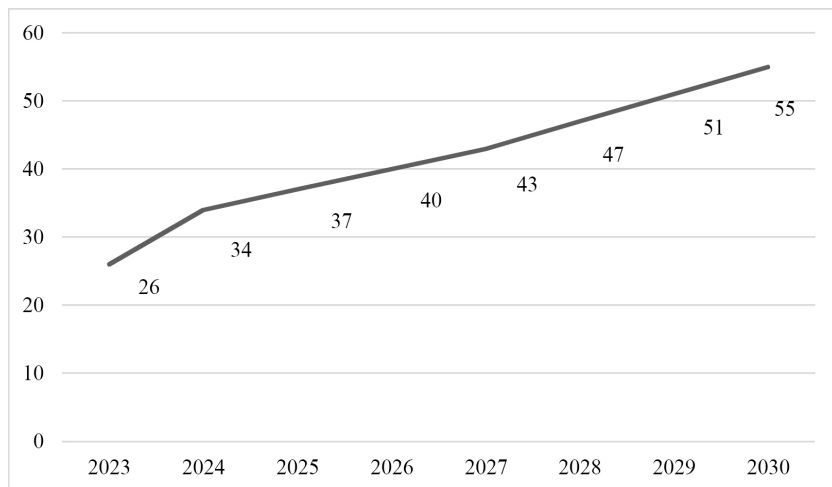


Рис. 2. Прогноз объемов мирового рынка БАС до 2030 года, млрд. долл. США
Источник: составлено авторами на основании [17]

Fig. 2. Forecast of the global BAS market volume through 2030, in billions of U.S. dollars
Source: Compiled by the authors based on [17]

Из данных рисунка 2 видно, что в 2025 году ожидается рост мирового рынка беспилотников до 37 млрд. долл. США, что на 3 млрд. долл. США больше, чем за 2024 год. На основе данных рис. 2 можно сделать вывод, что мировой рынок БАС увеличивается от года к году, демонстрируя стабильный рост.

Анализируя иностранный опыт внедрения беспилотников в сельскохозяйственную и другие отрасли, логично обратить внимание, прежде всего, на страны, в которых внедрение БАС находится на более высоком уровне. Согласно данным Международной федерации робототехники [19] (IFR, International Federation of Robotics) к ним относятся Китай, Япония, Швеция, Италия, Сингапур, Великобритания, США, Канада, Германия и Франция. Изучение практики нормативного регулирования создания, учета и эксплуатации БАС в указанных странах позволяет говорить о возможности выделить определенный паттерн, который сложился в данной области и в общих чертах был применен и отечественным регулятором [3].

Он включает в себя внесение в основной нормативный правовой акт, регулирующий вопросы использования воздушного пространства, до-

полнений, устанавливающих основные общие нормы касательно БАС (понятийный аппарат, классификацию БПЛА, общие требования к сертификации и учету, основные принципы эксплуатации). Специальные вопросы, касающиеся получения сертификатов летной годности, согласования графиков полетов, порядка и административных процедур учета БПЛА и т.п. регламентируются отдельными документами (стандартами, приказами и пр.). Положения, устанавливаемые нормами таких документов, также, в общем, сходны с теми, что введены в отечественную нормативную базу.

Они включают ограничения высоты и региона полетов БПЛА, определяют минимальную взлетную массу аппаратов, подлежащих государственному учету, содержат требования к созданию и/или сертификации БПЛА и БАС. Существует, разумеется, и определенная региональная и национальная специфика – так, законодательство Великобритании требует программного ограничения зон полетов БПЛА (вблизи аэропортов, стратегических объектов и т.п.), а в Канаде введены особые требования для БПЛА, осуществляющих полеты там, где есть люди, и их пилотов (операторов) [2].

Чтобы оценить перспективу улучшения экономических показателей за счет внедрения БАС в сельское хозяйство, необходимо проанализировать состояние объемов рынка БПЛА в России (рисунок 3).

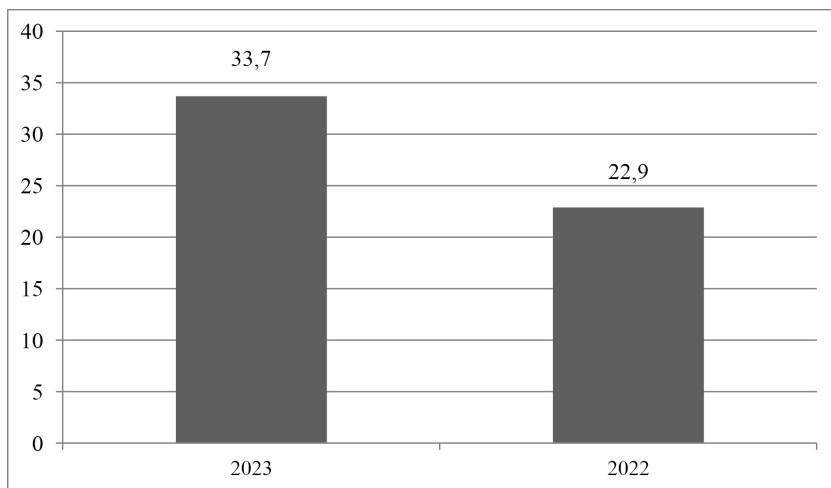


Рис. 3. Объем российского рынка БПЛА в 2022–2023 гг., млрд. рублей.

Источник: составлено авторами на основании [1]

Fig. 3. Size of the Russian UAV market in 2022–2023, in billions of rubles.

Source: Compiled by the authors based on [1]

Из рисунка 3 видно, что к концу 2023 года объем российского рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) достиг 33,7 млрд. рублей, это на 10,8 млрд. рублей больше, чем по итогам 2022 года. В 2022 году объем составил 22,9 млрд. рублей.

За 2023 год выручка от поставок БАС увеличилась на 35% и стала составлять 19,8 млрд. рублей. Стоит отметить, что дроны поставлялись на гражданский рынок, средний рост выручки от реализации услуг на базе БПЛА составил 14% [1]. Данные из исследования [1] Ассоциации «Аэронекст» показывают положительную динамику в развитии рынка БАС, и его внедрении в различные области экономики Российской Федерации (рисунок 4).

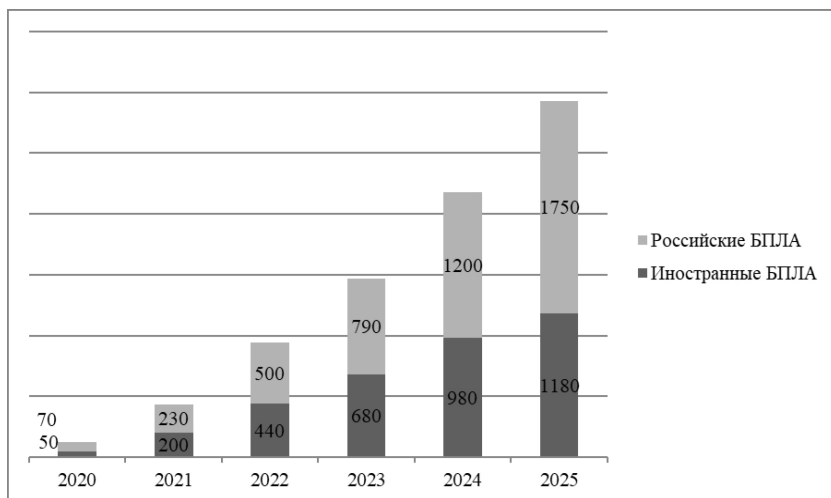


Рис. 4. БПЛА в России и за рубежом, используемые в сельском хозяйстве в период с 2020 по 2025 гг., тыс. шт.

Источник: составлено авторами на основании [1]

Fig. 4. UAVs in Russia and abroad used in agriculture from 2020 to 2025, in thousands of units.

Source: Compiled by the authors based on [1]

В 2025 году количество российских БПЛА в сельском хозяйстве должно достигнуть 1750 тыс. шт. Специалисты Ассоциации «Аэронекст» прогнозируют увеличение спроса на БАС в сельском хозяйстве России на 6% [1], при достижении отметки в 3 000 тыс. шт. к 2025 году, «беспилотников», внедренных в сельскохозяйственную отрасль. Количество иностранных БПЛА в 2025 году должно составить 1180 тыс. шт., это на 200 тыс. шт. больше, чем в 2024 году [1].

Применение современных технологий в сельском хозяйстве популярно во всем мире, в частности, БАС применяются активно уже несколько лет с темпами роста 25% в год [1]. В России с конца 2020 года использование беспилотников в сельском хозяйстве увеличилось в 10 раз, такие изменения можно объяснить массовым внедрением беспилотных аппаратов в агропромышленные комплексы по стране. Не смотря на приведенные выше исследования, существует не много данных для анализа рынка БАС в сельскохозяйственной отрасли. Еще пока не во всех регионах России сельскохозяйственные предприятия внедрили беспилотные авиационные системы в свою деятельность. Поэтому в рамках проводимого исследования следует рассмотреть регион, где уже сложилась определенная статистика после внедрения беспилотников в деятельность предприятий сельскохозяйственной отрасли.

На примере Ростовской области необходимо провести анализ перспектив улучшения экономических показателей за счет внедрения БАС в сельскохозяйственную отрасль [10].

Согласно стратегии социально-экономического развития Ростовской области, правительство утвердило систему целей до 2030 года и разработало механизм реализации по их достижению (рисунок 5) [12].

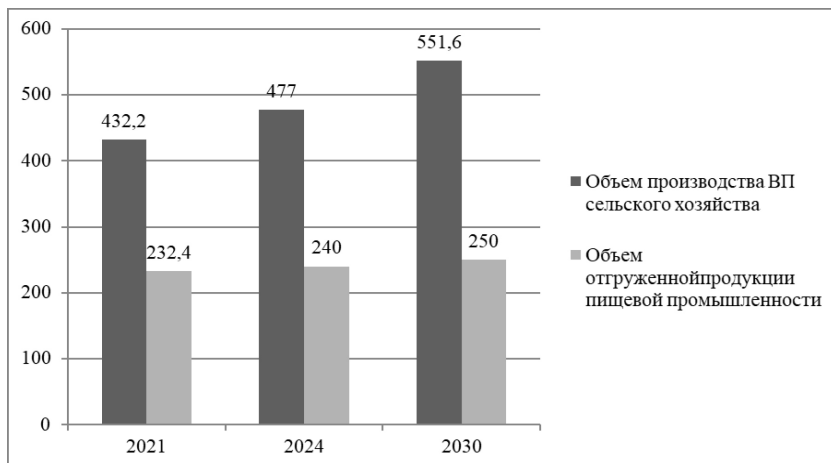


Рис. 5. Динамические цели по улучшению экономических показателей сельского хозяйства Ростовской области за счет внедрения БАС с 2021 по 2030 гг., млрд. руб.

Источник: составлено авторами на основании [12]

Fig. 5. Dynamic targets for improving the economic performance of agriculture in the Rostov Region through the implementation of BAS from 2021 to 2030, in billions of rubles

Source: Compiled by the authors based on [12]

По рисунку 5 видно, что Правительство Ростовской области прогнозирует стабильный рост объемов производства валовой продукции сельского хозяйства и отгруженной продукции. Внедрение БПЛА помогает усовершенствовать методы обработки полей и посевов, ускорить процесс орошения и наблюдения за ростом сельскохозяйственных культур [12]. Далее правительством были сформулированы структурные цели по увеличению добавленной стоимости агропромышленного комплекса Ростовской области (рисунок 6).

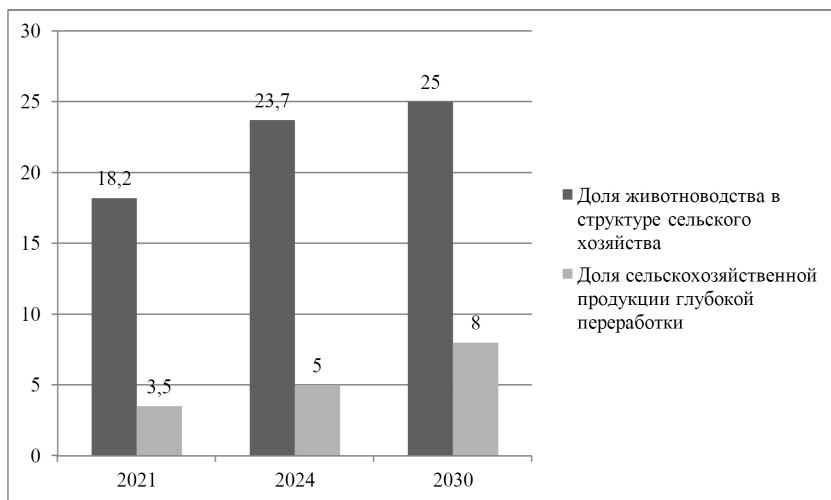


Рис. 6. Структурные цели по увеличению добавленной стоимости агропромышленного комплекса Ростовской области с 2021 по 2030 гг., %
Источник: составлено авторами на основании [12]

Fig. 6. Structural goals for increasing the value added of the Rostov Region's agro-industrial complex from 2021 to 2030, %
Source: Compiled by the authors based on [12]

В 2024 году доля животноводства в структуре сельского хозяйства Ростовской области составила 23,7%, а доля сельскохозяйственной продукции переработки 5%, по прогнозам правительства региона, в 2030 году доля животноводства должна составлять 25%, а доля сельскохозяйственной продукции 8%.

Для увеличения добавленной стоимости агропромышленного комплекса Ростовской области и улучшения экономических показателей Правительство области определило ряд стратегических задач, на примере которых можно сформулировать общие задачи сельскохозяйственной

отрасли РФ для улучшения экономических показателей после внедрения БПЛА [12]:

1. Снижение рисков производства сельскохозяйственной продукции.
2. Проведение комплекса мероприятий по мелиорации и защите земель сельскохозяйственного назначения.
3. Повышение уровня технической оснащённости агропромышленного комплекса.
4. Развитие системы продвижения региональной продукции АПК.
5. Повышение уровня технической оснащённости агропромышленного комплекса.
6. Кадровое обеспечение агропромышленного комплекса
7. Необходимо создавать российские аналоги комплектующих БАС для снижения издержек.
8. Создать стимулирующие условия импортозамещения [12].

По мере внедрения БАС в сельскохозяйственную отрасль можно наблюдать определённые риски, связанные с данным процессом. Так, использование БАС требует строгого соблюдения правил безопасности. Дроны, используемые для сбора информации могут нарушать правила конфиденциальности, что чревато последствиями [4]. Также программное обеспечение может дать сбой и спровоцировать снижение доходов. Главным риском БАС в сельском хозяйстве являются большие финансовые затраты на внедрение данных систем. Первоначальные инвестиции для внедрения БАС достаточно велики, чтобы назвать такие изменения легкими. БАС необходимо обслуживать, что также требует денежных затрат, специальных знаний и найма квалифицированных сотрудников.

За последние несколько лет в России можно наблюдать прирост популярности в обучении по специальности «управление беспилотными летательными аппаратами (БПЛА)». Многие учебные заведения стремятся выпускать как можно больше специалистов по данному направлению, это можно объяснить тем, что БПЛА используют в: вооружённых силах РФ, в гражданском секторе, разведке, научных исследованиях, аграрном хозяйстве, спасательных операциях при МЧС. БПЛА представляют собой современные технологии, которые могут быть полезны в различных направлениях. Военное применение беспилотников позволяет мониторить обстановку на определенном участке, наблюдать и даже наносить точечные удары. На данный момент существует множество различных программ для освоения навыков управления беспилотниками, но наибольшую популярность приобрели виртуаль-

ные тренажеры, которые помогают экономить время и средства на подготовку будущих пилотов.

В гражданском секторе, БПЛА помогают проверять инфраструктуру местности, доставлять грузы, обрабатывать участки земли, осуществлять фото и видео съемку.

Проведем расчеты потребности сельскохозяйственной отрасли в операторах беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), чтобы оценить перспективу развития данной отрасли.

Общая площадь обрабатываемых земель: 10 000 гектаров. БПЛА необходимо провести мониторинг и опрыскивание.

При производительности в 100 гектаров в день и 200 рабочих дней в году, беспилотник будет иметь 1,2 % коэффициента загрузки.

Найдем общее количество гектаров, которые может обработать один оператор за год:

$$\frac{100 \text{ гектаров}}{\text{день}} * 200 \text{ дней} = 20\,000 \text{ гектаров за год.}$$

$$\text{Для обработки 10 000 гектаров потребуется: } \frac{10\,000 \text{ гектаров}}{20\,000 \text{ гектаров/оператор БПЛА}} =$$

0,5 оператора

Если учитывать коэффициент загрузки:

$$0,5 \times 1,2 = 0,6 \text{ оператора.}$$

Согласно расчетам на обработку 10 000 гектаров потребуется 1 специалист, так как результат в 0,6 человека необходимо округлить до целого числа. Исходя из этого стоит учитывать, что условия для работы на БАС могут быть разными, потребность сельскохозяйственной отрасли в операторах дронов может зависеть от введенных в эксплуатацию технологий и средств, потребностей отрасли и сезонного спроса.

Проведем оценку влияния БАС на экономические показатели предприятий сельскохозяйственной отрасли на примере использования высокотехнологичного сельскохозяйственного октокоптера DJI Agras MG-1.

Модель DJI Agras MG-1 разработана, для защиты культур и удобрения высокоэффективным и легко управляемым методом. Мощная силовая установка MG-1 предназначена для перевозки до 10 кг жидких полезных нагрузок, в том числе пестицидов и удобрений. Скорость в сочетании с мощностью позволяет покрыть всего за 10 минут поле площадью 4000-6000 кв. метров, от 7 до 10 соток в час, что эффективнее более чем в 40-50 раз, чем ручное опрыскивание.

Для оценки экономической эффективности можно рассчитать срок окупаемости дрона DJI Agras MG-1 по следующей формуле:

$$T = \frac{C}{(R-z)}, \quad (1)$$

где C – стоимость беспилотника;

z – затраты на содержание дрона в течение года;

R – годовая экономия рабочей силы, где ($R > z$);

T – срок окупаемости БАС в годах.

Соответственно получаем: $T = \frac{975000}{(1356000 - 108500)} = \frac{975000}{1247500} = 0,8$ г.

Результаты оценки экономической эффективности использования беспилотника DJI Agras MG-1 на аграрных предприятиях представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Расчёт срока окупаемости и прибыли беспилотника DJI Agras MG-1 при использовании в аграрных предприятиях

Table 1. Calculation of the Payback Period and Profit for the DJI Agras MG-1 Drone When Used in Agricultural Enterprises

Данные необходимые для расчета формул	Сумма
C – стоимость дрона (руб.)	975000 руб.
Потребляемая электроэнергия	19500 руб.
Услуги автотранспорта	89000 руб.
z – затраты на содержание октокоптера (руб.)	108500 руб.
Оператор/пилот (з/п за год)	780000 руб.
Помощник/менеджер (з/п за год)	276000 руб.
Экономист/бухгалтер (з/п за год)	300000 руб.
R – годовая экономия рабочей силы (руб.)	1356000 руб.
k – процент амортизации за один год	20%
T = C / (R - z) – срок окупаемости (год)	0,8 г.
P = k (R - z) – прибыль (руб.)	249500 руб.

Источник: составлено и рассчитано авторами

Для определения прибыли, получаемой от эксплуатации БАС, используется формула:

$$P = k * (R - z) \quad (2)$$

где k – процент амортизации.

Произведем расчеты:

$$P = 20\% * (1356000 - 108500) = 249\,500 \text{ руб.}$$

Расчеты показали, что прибыль от использования беспилотника DJI Agras MG-1 составит 249500 руб., а срок окупаемости всего 9,6 месяцев, что доказывает положительное влияние БАС на экономические показатели сельскохозяйственных предприятий. Данные результаты позволяют

сделать вывод о том, что внедрение БАС в сельскохозяйственную отрасль способствует снижению издержек производства, росту прибыли и экономии ресурсов.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно заключить хорошую перспективу улучшения экономических показателей сельскохозяйственной отрасли за счет внедрения беспилотных авиационных систем. Во время проведения исследования были выявлены основные преимущества от использования беспилотников на агропромышленных предприятиях и дана оценка влияния БАС на показатели сельскохозяйственной отрасли.

Во время исследования были произведены расчеты применения беспилотника DJI Agras MG-1, которые показали, что затраты на содержание дрона составят 108500 руб. в год, а годовая заработная плата сотрудникам 1356000 руб. в год, что указывает на значительную экономию средств при использовании БАС. К тому же внедрение DJI Agras MG-1 в деятельность аграрного предприятия окупится за 9,6 месяцев и принесет 249500 рублей прибыли. Эти результаты подтверждают выгоду от использования БАС в деятельности предприятий агропромышленного сектора.

На данный момент, беспилотные летательные аппараты доступны не только крупным агрохолдингам и комплексам, но и предприятиям малого и среднего сегмента. Благодаря такому подходу устройства становятся одним из востребованных инструментов мониторинга сельскохозяйственных угодий, а также при необходимости выполнения различного рода операций. Внедрение беспилотных авиационных систем (БАС) в сельское хозяйство имеет большой потенциал для улучшения эффективности и увеличения производства в сельском хозяйстве.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Аналитический отчет по исследованию российского гражданского рынка беспилотных авиационных систем (БАС). (2023). Ассоциация «Аэронекст». Получено с https://aeronext.aero/UserFiles/ContentFiles/2023-12-29_16-40-56_%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82_%D0%A0%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20%D0%91%D0%90%D0%A1_2023_8.pdf (дата обращения: 14.12.2025)

2. Быков, А. И. (2018). Сравнительно-правовой анализ зарубежного законодательства, регулирующего ввоз и реализацию беспилотных летательных аппаратов. *Вестник Самарского юридического института*, 4(30), 14–19. EDN: <https://elibrary.ru/YLWKFV>
3. Громова, Е. А. (2019). Правовые аспекты регистрации и использования беспилотных летательных аппаратов в России и за рубежом. *Право и экономика*, 7, 56–60. EDN: <https://elibrary.ru/BUWNHO>
4. Зубарев, Ю. Н., Фомин, Д. С., Чашин, А. Н., & Заболотнова, М. В. (2019). Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*, 2, 47–51. DOI: <https://doi.org/10.7242/2658-705> EDN: <https://elibrary.ru/TITLEP>
5. Катаев, М. Ю., Пасько, О. А., & Карташов, Е. Ю. (2023). Анализ практических возможностей применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. *Вестник КрасГАУ*, 1(190), 54–62. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-1-54-62> EDN: <https://elibrary.ru/EEAPOS>
6. Кириллов, Ю. В., & Назимко, Е. Н. (2016). Экономико-математическая оценка точности вычисления срока окупаемости инвестиционного проекта. *Финансовая аналитика: проблемы и решения*, 16(298), 20–29. EDN: <https://elibrary.ru/VVGRPJ>
7. Мельников, А. Б., & Тахмазян, Ю. Р. (2022). Цифровая экономика в аграрном секторе. *Естественно-гуманитарные исследования*, 39(1), 187–191. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2022-1-39-187-191> EDN: <https://elibrary.ru/LZGLII>
8. Матюха, С. В. (2022). Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках. *ТДР*, 1, 141–143. DOI: https://doi.org/10.52375/20728689_2022_1_141 EDN: <https://elibrary.ru/SKTLOJ>
9. Об утверждении Долгосрочной стратегии развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 10 августа 2019 г. № 1796-р. (2022). *Собрание законодательства РФ*, 13 октября.
10. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН. (2018). *Прокормить население Земли и защитить планету*. Глобальный фонд по окружающей среде. Инвестиции в нашу планету. Получено с <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/083d908f-56bb-4f5e-b66d-abee22617f7c/content> (дата обращения: 14.12.2025)
11. Сазанова, А. А. (2022). Сравнительный анализ российского и зарубежного опыта государственного регулирования беспилотных авиационных систем. *Мир новой экономики*, 4, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2022-16-4-79-87> EDN: <https://elibrary.ru/LBWEPI>

12. Стратегия социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года: утверждена постановлением Правительства Ростовской области от 26.12.2018 № 864, № 1100. (2022). *Собрание законодательства РФ*, 19 декабря.
13. Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р. (2023). *Собрание законодательства РФ*.
14. Хорт, Д. О., Личман, Г. И., Филиппов, Р. А., & Беленков, А. И. (2016). Применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) в точном земледелии. *Фермер. Поволжье*, 7, 34–37. EDN: <https://elibrary.ru/ZCPNPT>
15. Эльдиева, Т. М. (2018). Направления использования умных инноваций в сельском хозяйстве. *Agrarian Reform and Forms of Managing. International Agricultural Journal*, 6(366), 46–48. DOI: <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-16094> EDN: <https://elibrary.ru/YOUIOD>
16. Drone Industry Insights. (2024). *Navigating innovation — the leading source for independent drone market intelligence*. About Global Drone Market Report 2023–2030. Получено с https://droneii.com/?srsltid=AfmBOooREeXqWyXDgVr_e_jkm9dRMnTxiOkNPHytw3z17FgmRqX2Orau (дата обращения: 14.12.2025)
17. Grand View Research. (2024). Market research reports & consulting. Grand View Research Inc. Получено с <https://www.marketresearch.com/Grand-View-Research-v4060/> (дата обращения: 14.12.2025)
18. Economic Report. (2013). *The economic impact of unmanned systems integration in the United States* (pp. 3–14). Получено с https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/958c920a-7f9b-4ad2-9807-f9a4e95d1ef1/UploadedImages/New_Economic%20Report%202013%20Full.pdf (дата обращения: 14.12.2025)
19. IFR. International Federation of Robotics. (2024). Получено с <https://ifr.org/about-world-robotics/> (дата обращения: 14.12.2025)

References

1. Analytical report on the study of the Russian civil market of unmanned aerial systems (UAS). (2023). Association “Aeronext”. Retrieved from https://aeronext.aero/UserFiles/ContentFiles/2023-12-29_16-40-56_%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82_%D0%A0%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20%D0%91%D0%90%D0%A1_2023_8.pdf (accessed: December 14, 2025)
2. Bykov, A. I. (2018). Comparative legal analysis of foreign legislation regulating the import and sale of unmanned aerial vehicles. *Bulletin of the Samara Law Institute*, 4(30), 14–19. EDN: <https://elibrary.ru/YLWKFF>

3. Gromova, E. A. (2019). Legal aspects of registration and use of unmanned aerial vehicles in Russia and abroad. *Law and Economics*, 7, 56–60. EDN: <https://elibrary.ru/BUWNHO>
4. Zubarev, Yu. N., Fomin, D. S., Chashchin, A. N., & Zabolotnova, M. V. (2019). Use of unmanned aerial vehicles in agriculture. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*, 2, 47–51. DOI: <https://doi.org/10.7242/2658-705> EDN: <https://elibrary.ru/TITLEP>
5. Kataev, M. Yu., Pasko, O. A., & Kartashov, E. Yu. (2023). Analysis of practical possibilities for the application of unmanned aerial vehicles in agriculture. *Bulletin of KrasGAU*, 1(190), 54–62. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-1-54-62> EDN: <https://elibrary.ru/EEAPOS>
6. Kirillov, Yu. V., & Nazimko, E. N. (2016). Economic and mathematical assessment of the accuracy of calculating the payback period of an investment project. *Financial Analytics: Problems and Solutions*, 16(298), 20–29. EDN: <https://elibrary.ru/VVGRPJ>
7. Melnikov, A. B., & Tahmazyan, Yu. R. (2022). Digital economy in the agricultural sector. *Natural and Humanitarian Research*, 39(1), 187–191. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2022-1-39-187-191> EDN: <https://elibrary.ru/LZGLII>
8. Matyuha, S. V. (2022). Unmanned aerial systems in cargo transportation. *TDR*, 1, 141–143. DOI: https://doi.org/10.52375/20728689_2022_1_141 EDN: <https://elibrary.ru/SKTLOJ>
9. On approval of the Long-Term Strategy for the Development of the Grain Complex of the Russian Federation until 2035: Decree of the Government of the Russian Federation No. 1796-r of August 10, 2019. (2022). *Collection of Legislation of the Russian Federation*, October 13.
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Feeding the world's population and protecting the planet*. Global Environment Facility. Investing in our planet. Retrieved from <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/083d908f-56bb-4f5e-b66d-abec2261f7fc/content> (accessed: December 14, 2025)
11. Sazanova, A. A. (2022). Comparative analysis of Russian and foreign experience in state regulation of unmanned aerial systems. *World of New Economy*, 4, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2022-16-4-79-87> EDN: <https://elibrary.ru/LBWEPJ>
12. Strategy for the socio-economic development of the Rostov Region for the period up to 2030: approved by Resolution No. 864, No. 1100 of the Government of the Rostov Region dated December 26, 2018. (2022). *Collection of Legislation of the Russian Federation*, December 19.
13. Strategy for the development of unmanned aviation of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the long term up to 2035: approved by Decree No. 1630-r

- of the Government of the Russian Federation dated June 21, 2023. (2023). *Collection of Legislation of the Russian Federation*.
14. Khort, D. O., Lichman, G. I., Filippov, R. A., & Belenkov, A. I. (2016). Application of unmanned aerial vehicles (drones) in precision farming. *Farmer. Volga Region*, 7, 34–37. EDN: <https://elibrary.ru/ZCPNPT>
 15. Eldieva, T. M. (2018). Directions for the use of smart innovations in agriculture. *Agrarian Reform and Forms of Managing. International Agricultural Journal*, 6(366), 46–48. DOI: <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-16094> EDN: <https://elibrary.ru/YOUIOD>
 16. Drone Industry Insights. (2024). *Navigating innovation — the leading source for independent drone market intelligence*. About Global Drone Market Report 2023–2030. Retrieved from https://droneii.com/?srsltid=AfmBOooREeXqWyXDgVr_e_jkm9dRMnTxikNPHytw3z17FgmRqX2Orau (accessed: December 14, 2025)
 17. Grand View Research. (2024). Market research reports & consulting. Grand View Research Inc. Retrieved from <https://www.marketresearch.com/Grand-View-Research-v4060/> (accessed: December 14, 2025)
 18. Economic Report. (2013). *The economic impact of unmanned systems integration in the United States* (pp. 3–14). Retrieved from https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/958c920a-7f9b-4ad2-9807-f9a4e95d1ef1/UploadedImages/New_Economic%20Report%202013%20Full.pdf (accessed: December 14, 2025)
 19. IFR. International Federation of Robotics. (2024). Retrieved from <https://ifr.org/about-world-robotics/> (accessed: December 14, 2025)

ВКЛАД АВТОРОВ

Коровин Е.Д.: Участие в проведении исследования эмпирической базы БАС в сельском хозяйстве, в частности сбор и анализ данных. Принятие ответственности за все аспекты проведенного исследования.

Трубин А.Е.: Разработка концепции научной работы. Проведение исследования теоретической базы беспилотных авиационных систем, определение целевых возможностей применения БАС в сельском хозяйстве, определение преимуществ и недостатков их использования. Принятие ответственности за все аспекты проведенного исследования.

Анисимов А.Ю.: Проведение исследования эмпирической базы БАС в сельском хозяйстве. Участие в разработке концепции научной работы. Сбор и анализ информации по теме исследования. Редактирование и утверждение окончательного варианта статьи: принятие ответственности за все аспекты проведенного исследования, целостность и последовательность всех частей статьи, и ее окончательный вид.

Алексахин А.Н.: Участие в проведении исследования теоретической базы беспилотных авиационных систем в сельском хозяйстве. Сбор и анализ информации по теме исследования. Подготовка и редактирование текста: составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне. Принятие ответственности за все аспекты проведенного исследования.

Алексахина С.А.: Участие в проведении исследования эмпирической базы БАС в сельском хозяйстве, в частности сбор и анализ данных, обработка полученных результатов. Принятие ответственности за все аспекты проведенного исследования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Evgeny D. Korovin: Participation in research into the empirical basis of UAS in agriculture, including data collection and analysis. Responsibility for all aspects of the research.

Alexander E. Trubin: Developing a research concept. Conducting research into the theoretical basis of unmanned aerial systems, identifying potential applications of UAS in agriculture, and determining the advantages and disadvantages of their use. Assume responsibility for all aspects of the research.

Alexander Yu. Anisimov: Conducting research into the empirical basis of UAS in agriculture. Participating in the development of the scientific paper's concept. Collecting and analyzing information on the research topic. Editing and approving the final version of the article: assuming responsibility for all aspects of the research, the integrity and consistency of all parts of the article, and its final form.

Alexander N. Aleksakhin: Participation in a study on the theoretical basis of unmanned aerial systems in agriculture. Collection and analysis of information on the research topic. Preparation and editing of the text: drafting and finalizing the manuscript, participation in the scientific design. Responsibility for all aspects of the study.

Svetlana A. Aleksakhina: Participation in research into the empirical basis of UAS in agriculture, including data collection and analysis, and processing of the results. Responsibility for all aspects of the research.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Коровин Евгений Дмитриевич, аспирант, кафедра предпринимательства и конкуренции, факультет бизнеса

Университет «Синергия»

Ленинградский пр-кт, 80, г. Москва, 125190, Российская Федерация

korovin.3@yandex.ru

Трубин Александр Евгеньевич, канд. экон. наук, доцент, зав. кафедрой цифровой экономики

Университет «Синергия»

Ленинградский пр-кт, 80, г. Москва, 125190, Российская Федерация

niburt@yandex.ru

Анисимов Александр Юрьевич, канд. экон. наук, доцент, заместитель директора по учебно-методической работе факультета информационных технологий, доцент кафедры информационного менеджмента им. профессора В.В. Дика

Университет «Синергия»

Ленинградский пр-кт, 80, г. Москва, 125190, Российская Федерация

anisimov_au@mail.ru

Алексахин Александр Николаевич, канд. пед. наук, доцент, зав. кафедрой информационного менеджмента им. профессора В.В. Дика

Университет «Синергия»

Ленинградский пр-кт, 80, г. Москва, 125190, Российская Федерация

aleksahinalex555@gmail.com

Алексахина Светлана Александровна, старший преподаватель кафедры цифровой экономики

Университет «Синергия»

Ленинградский пр-кт, 80, г. Москва, 125190, Российская Федерация

sveltanaaleksahina02@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgeny D. Korovin, postgraduate student, Department of Entrepreneurship and Competition, Faculty of Business

Synergy University

80, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125190, Russian Federation

korovin.3@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2533-8269>

Alexander E. Trubin, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Department of Digital Economy

Synergy University

80, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125190, Russian Federation

niburt@yandex.ru

SPIN-code: 5097-5521

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-5679>

Alexander Yu. Anisimov, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Deputy Director for Educational and Methodological Work of the Faculty of Information Technologies, Associate Professor of the Department of Information Management named after professor V.V. Dick

Synergy University

80, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125190, Russian Federation

anisimov_au@mail.ru

SPIN-code: 9732-9601

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8113-4523>

Researcher ID: Q-3824-2017

Scopus Author ID: 57194047333

Alexander N. Aleksakhin, Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor, Department Chair of Information Management named after professor V.V. Dick

Synergy University

80, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125190, Russian Federation

aleksahinalex555@gmail.com

SPIN-code: 8110-8098

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0692-2391>

Researcher ID: AEX-7675-2022

Svetlana A. Aleksakhina, Senior Lecturer, Department of Digital Economy

Synergy University

80, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125190, Russian Federation

svetlanaaleksahina02@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8432-8178>

Поступила 15.12.2025

После рецензирования 17.01.2026

Принята 10.02.2026

Received 15.12.2025

Revised 17.01.2026

Accepted 10.02.2026

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научный обзор

Scientific review

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1561](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1561)EDN: [YYGQOR](#)

UDC 338.43:631.15:316.334.56



Young farmers in agriculture: Synthesis of resilience factors to empirical gaps and new conceptual integration design (literature review)

M.Y. Wardhana¹, Agussabti¹, M.S. Samsurijan², T.S. Bahri¹¹*Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Aceh, Indonesia*²*Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia*

Abstract

Background. The agricultural sector is experiencing a gradual decline in youth participation at a time when farming systems are confronted with climate risks, market volatility, and accelerating technological shifts. This situation elevates the importance of understanding and strengthening the resilience of young farmers as a key component of sustainable agricultural development.

Purpose. This study aims to review and integrate existing research published between 2015 and 2025 in order to identify major research trends, determine the principal internal and external drivers influencing youth farmer resilience, examine their inter-connections, and develop an integrated conceptual framework explaining how young farmers maintain resilience within a rapidly evolving agricultural environment.

Materials and methods. A Systematic Literature Review (SLR) approach was applied following the PRISMA protocol to ensure transparency and methodological rigor. The review analyzed peer-reviewed national and international publications indexed in SINTA and Scopus databases during the period 2015–2025. The synthesis of these studies indicates that the resilience of young farmers is shaped through the interaction of three key dimensions: personal readiness (motivation, self-efficacy, entrepreneurial competence, and digital literacy), social readiness (family support, farmer networks, and institutional policies), and environmental adaptation (responses to climate change and technological developments).

Results. Analysis of 54 selected articles demonstrates a clear evolution in the scholarly discussion of young farmer resilience. Early studies (2015–2017) primarily examined youth participation and structural barriers such as limited land access and unstable income. Between 2018 and 2020, research increasingly emphasized agripreneurship

and adaptive capacity, presenting young farmers as active agents responding to market and environmental uncertainty. Since 2021, studies have adopted more integrative perspectives, linking resilience with digital agriculture, climate-smart farming, and broader sustainability transitions, often supported by advanced analytical methods including structural equation modelling and bibliometric analysis. Despite the global growth of this research area, empirical studies from Indonesia remain relatively limited within international knowledge networks.

Thematic analysis further identifies three interconnected dimensions shaping young farmers' resilience: personal readiness, social readiness, and environmental adaptation. Personal readiness relates to motivation, self-efficacy, entrepreneurial capacity, and digital competence that enable young farmers to remain engaged in agricultural activities. Social readiness refers to supportive relationships and institutional environments, including family encouragement, farmer organizations, and government policies that help mitigate social and economic risks. Environmental adaptation reflects the ability to respond effectively to climate variability, market dynamics, and technological innovation through the adoption of new knowledge and tools.

Nevertheless, the literature still reveals several conceptual and methodological limitations. Many studies address only one or two aspects of resilience rather than examining the phenomenon in an integrated manner. Quantitative methods dominate the field, whereas mixed-methods approaches remain relatively underutilized. Additional research gaps include the limited use of longitudinal studies, insufficient integration of social, ecological, and digital perspectives, weak application of spatial or big-data approaches, and limited attention to gender equity and local wisdom systems, particularly in the Indonesian context.

Overall, these findings indicate that young farmers' resilience should be understood as a dynamic and systemic process influenced by multiple interacting factors. More comprehensive and context-sensitive analytical frameworks are therefore needed to better explain and strengthen the resilience of young farmers in contemporary agricultural systems.

Keyword: young farmers; resilience; sustainable agriculture; systematic literature review; conceptual framework

For citation. Wardhana, M. Y., Agussabti, Samsurijan, M. S., & Bahri, T. S. (2026). Young farmers in agriculture: Synthesis of resilience factors to empirical gaps and new conceptual integration design (literature review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 519-536. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1561>

Introduction

The agricultural sector is currently experiencing structural reconfiguration driven not only by climate variability but also by accelerating technological change, shifting labor demographics, and increasing market unpredictability

[1; 2]. These dynamics have intensified production risks while simultaneously reshaping rural labor structures and livelihood opportunities. Within this changing context, the decreasing involvement of younger generations in farming has become a major concern for the long-term sustainability of food systems and the regeneration of the agricultural workforce [3; 4]. Although young farmers are frequently positioned as future innovators and strategic actors in sustainable food production, their participation remains constrained by limited control over productive assets, unstable income prospects, restricted access to capital, and institutional environments that often privilege established producers. These structural barriers interact with broader ecological and market pressures, creating a complex environment in which persistence in agriculture demands more than technical skill alone [5; 6].

Recent scholarship increasingly employs *resilience* as an analytical lens to understand how young farmers cope with uncertainty and sustain agricultural livelihoods. However, resilience in this context cannot be reduced to mere coping capacity. It reflects the ability to sustain engagement, reorganize resources, and pursue adaptive pathways under conditions of climatic fluctuation, technological transition, and socio-economic volatility. For young farmers, resilience involves the dynamic interaction between internal capacities and external enabling conditions [7; 8]. At the individual level, factors such as entrepreneurial orientation, confidence in one's own capability, and competence in utilizing digital tools shape the willingness and ability of young farmers to remain active in agriculture. These personal attributes influence not only productivity but also decision-making flexibility in the face of environmental and market instability [9; 10]. Beyond individual characteristics, social and institutional environments also play a crucial role in shaping resilience. Family encouragement, social networks, farmer organizations, and public policies can either facilitate or constrain access to resources, information, and opportunities. Supportive institutional arrangements may help reduce economic and social risks, while weak institutional support can limit the capacity of young farmers to adapt to emerging challenges [11; 12]. Environmental adaptation represents another important dimension of resilience. Climate variability, technological innovation, and shifting market dynamics increasingly influence agricultural production systems. Young farmers must therefore develop the ability to respond to these external pressures by adopting climate-smart practices, integrating digital tools, and adjusting production strategies in order to maintain agricultural viability [2; 13].

Although scholarly attention toward youth participation and resilience in agriculture has increased considerably, existing studies remain fragmented across

disciplines, methodological approaches, and regional contexts. Many studies focus on isolated dimensions of resilience, often privileging personal or social factors while insufficiently integrating environmental adaptation and digital transformation [14; 15]. Furthermore, empirical research from developing countries, particularly Indonesia, remains relatively limited. The lack of longitudinal, spatial, and gender-sensitive analyses further restricts a comprehensive understanding of how resilience evolves over time [16; 17]. This fragmentation hinders the development of comprehensive conceptual models and restricts the formulation of evidence-based policies aimed at enhancing youth farmer resilience and sustainable agricultural regeneration.

To address these gaps, this study undertakes a systematic literature review of peer-reviewed publications [18; 19] to synthesize peer-reviewed national and international research published between 2015 and 2025. By systematically mapping research trends, identifying multidimensional resilience factors, and uncovering persistent empirical gaps, this article proposes an integrated conceptual framework linking personal readiness, social readiness, and environmental adaptation. In doing so, it repositions young farmers not merely as beneficiaries of agricultural transformation but as adaptive agents whose resilience capacity is fundamental to sustainable agricultural regeneration.

Materials and methods

Study Design

To better understand how young farmers navigate challenges in agriculture, this study reviews and synthesizes a range of empirical and conceptual literature using a systematic literature review approach. The SLR approach was selected to ensure methodological rigor, transparency, and reproducibility in consolidating fragmented evidence across disciplines and geographical contexts [14; 20-22]. The review was conducted in line with PRISMA guidelines, which guide the stages of identifying, screening, and selecting relevant studies for inclusion [18; 19].

Data Sources and Search Strategy

The literature identification process was performed using several national and international scholarly databases. Indonesian publications were retrieved from the SINTA database, while international articles were obtained from Scopus-indexed platforms including ScienceDirect, SpringerLink, and Taylor & Francis. Articles published between 2015 and 2025 were considered to capture contemporary developments in youth resilience and agricultural sustainability.

A structured Boolean search strategy was applied using combinations of keywords such as “*young farmers*,” “*youth resilience*,” “*agriculture*,” “*agri-*

preneurship,” “*sustainable farming*,” and “*climate adaptation*.” The search strategy was refined iteratively to balance sensitivity and specificity, following established SLR guidelines [23].

The use of Boolean logic is standard practice in SLR to optimize the sensitivity and specificity of searches [24; 25].

Inclusion and Exclusion Criteria

The selection of studies in this review was guided by clearly defined inclusion and exclusion criteria to ensure that only relevant and high-quality sources were considered. Included studies were (i) peer-reviewed journal articles, (ii) published between 2015 and 2025, (iii) written in English or Indonesian, and (iv) Only studies that specifically addressed youth or young farmers in relation to resilience, participation, or adaptive capacity in agriculture were considered, while materials such as conference papers, theses, dissertations, policy reports, and studies outside this scope were not included.

Table 1.

Selection of inclusion and exclusion criteria

Criteria	Inclusion	Exclusion
Document Type	Articles published in peer-reviewed academic journals	Materials such as conference papers, academic theses and dissertations, as well as non-scholarly reports
Publication Period	Year, 2015–2025	Before 2015
Research Focus	Youth engagement, resilience, or adaptation in the agricultural sector	Research on resilience beyond youth or the non-agricultural sector
Publication Language	English and Bahasa (Indonesian)	Languages other than English and Bahasa (Indonesian)
Accessibility	Available in full text format	Studies for which the full text was not available

Literature Screening and Selection Process

The selection of relevant studies followed the PRISMA framework, which consists of four sequential stages: identification, screening, eligibility assessment, and final inclusion of eligible articles. An initial search yielded 190 articles, including manual additions. After removing duplicates and screening titles and abstracts, 61 articles were assessed for full-text eligibility. Following a detailed evaluation, 54 articles met all inclusion criteria and were retained for final synthesis. This process ensured consistency, transparency, and replicability of the review procedure [18; 19].

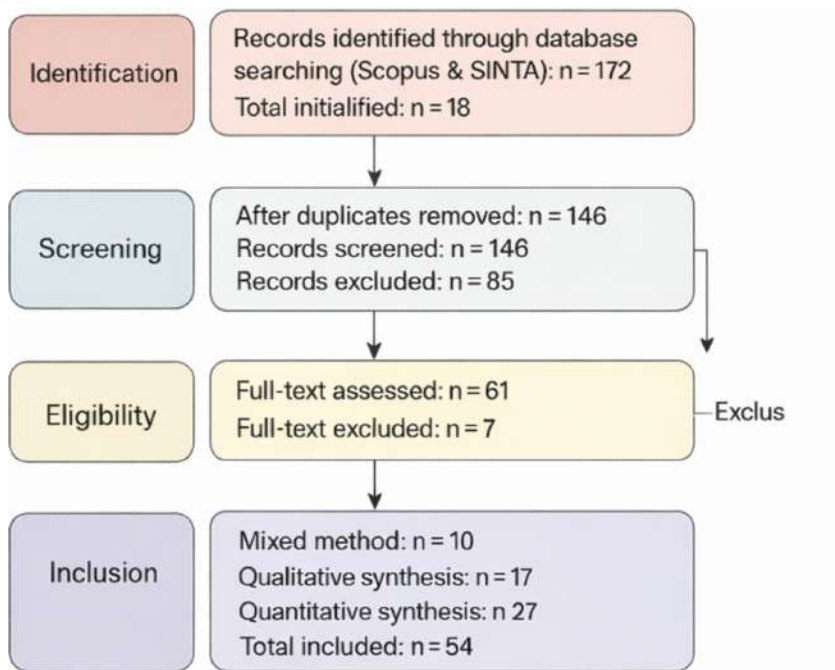


Fig. 1. PRISMA flow diagram, illustrating the protocol used in the literature review of the resilience of young farmers based on the PRISMA Statement (Preferred Reports Systematic Review and Analysis Protocols [18])

This multi-layered approach is in line with the systematic method guidelines for literature evaluation [26].

Quality Assessment

The selected studies were further assessed using a structured set of criteria to examine their methodological strength and overall relevance. The evaluation considered several aspects, including the clarity of research objectives, the suitability of the research design, the transparency of data collection procedures, the presence of validity and reliability measures, the clarity of analytical approaches, the contribution of findings, and the acknowledgment

of study limitations. Each criterion was scored on a scale of 0–2, yielding a maximum score of 14. Only studies with moderate to high quality scores (≥ 8) were included in the main synthesis, following best practices in systematic review methodology [22].

Table 2.

Criteria for Assessing Article Quality in SLR

Number	Quality Assessment Criteria	Description	Score
1	Clarity of Research Objectives	The research objectives and questions are explicitly stated and relevant to the resilience of young farmers.	0–2
2	Method Design Suitability	Research design in accordance with the objectives (quantitative, qualitative, mixed methods)	0–2
3	Clarity of Data Collection Procedures	The study clearly describes its sampling approach, data collection instruments, and the context in which the research was conducted.	0–2
4	Validity and Reliability	Validity, reliability, or trustworthiness tests are explained.	0–2
5	Clarity of Data Analysis	The analytical approach is clearly described and aligns with the nature of the data used in the study.	0–2
6	Relevance of Findings	The findings directly contribute to understanding the resilience of young farmers.	0–2
7	Transparency Limitations of the Study	The limitations of the study are acknowledged and explained.	0–2

Maximum Final Score: 14

Study Quality Classification

- 12 – 14 = High Quality
- 8 – 11 = Moderate Quality
- ≤ 7 = Low Quality (not included in the main synthesis)

Only articles of moderate to high quality were included in the final synthesis.

Quality assessment is conducted independently through repeated readings and expert guidance discussions, and verified through consistency of scores across criteria.

Validity, Reliability, and Trustworthiness of the Review

The credibility of this review was supported by a structured selection process guided by PRISMA, clearly defined inclusion and exclusion criteria, and

a careful evaluation of the quality of the selected studies. Reliability was reinforced through consistent search procedures, systematic thematic coding, and repeated verification of article classifications to maintain consistency during data extraction and synthesis. In addition, only studies demonstrating moderate to high methodological quality were retained, thereby strengthening the overall credibility of the findings [19; 27].

Data Extraction and Analysis

Data were extracted using a structured matrix designed to capture key aspects of each study, including its context, objectives, methodological approach, analytical techniques, and main findings. The analysis employed a thematic synthesis approach, integrating qualitative and quantitative evidence to identify recurring patterns and conceptual linkages [28]. For analysis, the reviewed studies were grouped into three broad dimensions of resilience: personal readiness, social readiness, and environmental adaptation, which formed the basis for the synthesis.

In addition, a descriptive bibliometric analysis was conducted using VOSviewer to map research trends, keyword co-occurrence, and thematic density across the reviewed literature, supporting the identification of dominant themes and research gaps [29].

Validity and Reliability

To strengthen the overall robustness of the review, several steps were taken, including using both national and international journal sources, repeating checks of thematic groupings, and consistently applying inclusion, exclusion, and quality evaluation criteria. These procedures ensured analytical robustness and minimized reviewer bias, in line with established SLR standards [14; 22].

Results and discussion

Overview of Selected Studies

After applying the screening and eligibility procedures, a total of 54 peer-reviewed articles satisfied all inclusion and methodological quality criteria and were included in the final synthesis. These studies were published between 2015 and 2025 and predominantly appeared in Scopus-indexed journals (Q1–Q4) and national journals indexed by SINTA (levels 1–5). From a methodological perspective, most of the studies relied on quantitative approaches (50%) in line with modern agricultural research trends [30; 31], followed by qualitative approaches (31.48%) emphasizing thematic analysis and case studies, common in rural social studies [32] and mixed-methods designs (18.52%) reflects a holistic approach but is still limited as stated by

Bryman in interdisciplinary research [33]. The reviewed studies were largely conducted in developing regions, particularly Asia and Africa, with relatively limited empirical contributions from Indonesia, highlighting a geographical imbalance in the literature.

The strong presence of quantitative studies can be linked to the widespread use of conceptual models grounded in socio-ecological and motivational perspectives, which typically call for statistical testing. Meanwhile, qualitative studies provide depth to the local context, especially regarding gender, social justice, and the dynamics of farming families [34; 35].

Trends in Research on Young Farmers' Resilience

The findings indicate a noticeable shift in research focus over time. During the early phase (2015–2017), studies primarily addressed youth participation and interest in agriculture, emphasizing socio-economic barriers and employment constraints [3]. The transitional phase (2018–2020) marked a shift toward agripreneurship and adaptive capacity, positioning young farmers as agents responding to market and livelihood uncertainty. In the integrative phase (2021–2025), research increasingly incorporated themes of climate resilience, digital agriculture, and sustainability transitions, often employing advanced analytical techniques such as Structural Equation Modeling (SEM) and mixed-methods designs [10; 13]. Bibliometric analysis further confirmed the growing prominence of resilience, climate change, and agribusiness as core thematic clusters, while studies explicitly focusing on Indonesia remained relatively scarce.

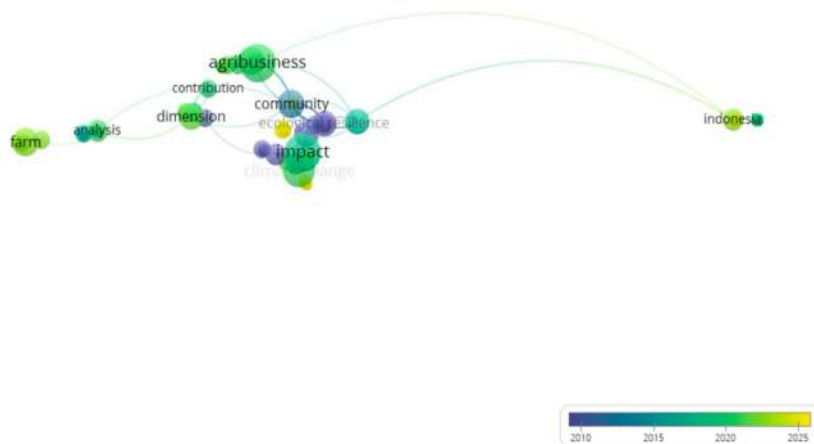


Fig. 2. Bibliometric Overlay Visualization: Trends and research focus on resilience and young farmers from 2010 to 2025 across 54 selected articles.

The bibliometric overlay visualization shows a clear evolution in research, from fragmented socio-economic discussions toward a more integrated framework that combines the dimensions of personal, social, and environmental resilience.

At the same time, it underscores persistent research gaps, particularly the scarcity of longitudinal, context-specific, and integrated studies. These findings reinforce the need for holistic conceptual models and empirically grounded research that captures the dynamic nature of young farmers' resilience across time and place.



Fig. 3. Bibliometric Density Visualization:

Trends in focus density and research variables related to the topics of resilience and young farmers in 54 selected articles.

In Figure 3, the trend illustrates the research density related to the topic of young farmer resilience, with several issues highlighted in bright colors (yellow) indicating the dominance of developing research (high frequency) in this area. While issues related to agribusiness resilience, climate change impact on resilience, and Indonesia indicate that there is still little research focusing on environmental resilience and the resilience of young farmers in Indonesia (slightly dim colors).

The bibliometric mapping suggests that research attention is not evenly distributed, with a stronger focus on individual and socio-economic aspects of resilience, while environmental, technological, and spatial dimensions receive comparatively less attention.

This imbalance points to a notable gap in the literature and highlights the need for more integrative approaches that bring together personal readiness, social readiness, and environmental adaptation. The findings from the density analysis thus provide empirical justification for the proposed integrated conceptual framework and highlight priority areas for future research on young farmers' resilience.

Thematic Dimensions of Young Farmers' Resilience

Thematic synthesis revealed that young farmers' resilience is consistently conceptualized through three interrelated dimensions: personal readiness, social readiness, and environmental adaptation.

Personal readiness emerged as a central dimension in the literature, encompassing intrinsic motivation, self-efficacy, agripreneurial skills, and digital literacy. Multiple studies demonstrated that young farmers with higher levels of entrepreneurial motivation and technological competence exhibit stronger adaptive capacity and persistence in agricultural livelihoods, even under conditions of limited land access and financial constraints [9; 10; 16; 36; 37]. Evidence from Indonesia and other developing contexts also indicated that access to climate and production information significantly enhances productivity and resilience outcomes [17; 38].

Social readiness was identified as a critical external dimension shaping resilience. More than half of the reviewed studies emphasized the importance of family support, peer networks, farmer organizations, and institutional arrangements in strengthening young farmers' confidence and capacity to withstand economic and environmental shocks [11; 12; 39; 40]. Community-based initiatives, cooperatives, and youth-led farming groups were found to facilitate knowledge exchange and collective adaptation. However, several studies highlighted persistent policy gaps, particularly the limited involvement of young farmers in decision-making processes and unequal access to land and financial resources [5; 6].

Environmental adaptation emerged as a third key dimension, highlighting how young farmers respond to changing climate conditions, market uncertainty, and ongoing technological developments. Recent studies point to the growing importance of approaches such as climate-smart agriculture, precision farming, and the use of digital platforms in strengthening both adaptive and transformative capacities [7; 13; 41; 42]. Empirical evidence suggests that young farmers with access to climate information, digital tools, and innovative systems tend to be more resilient than those relying on conventional practices [38; 43].

Conceptual Integration Design for Visual Resilience of Young Farmers

This design simultaneously integrates personal, social, and environmental dimensions in the context of young farmers' resilience, which in previous literature has been studied separately. This model also opens up space for quantitative and longitudinal empirical testing.

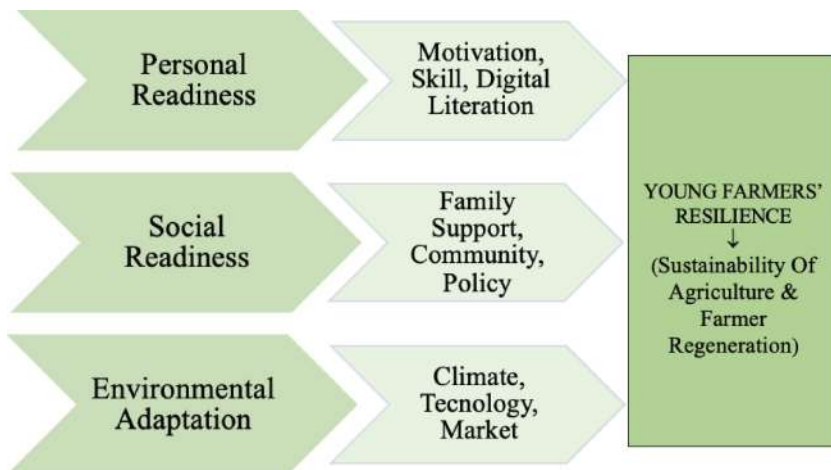


Fig. 4. Schematic Representation of New Conceptual Integration of Research on the Resilience of Young Farmers in Agriculture

Distribution of Conceptual Approaches

Table 3.

Distribution of Number & Percentage of Conceptual Types

Number	Conceptual Type	Number of Articles	Percentage
1	Personal & Social Readiness	16	29,63%
2	Social Readiness and Environmental Adaptation	9	16,67%
3	Personal Readiness	9	16,67%
4	Environmental Adaptation	9	16,67%
5	Social Readiness	8	14,81%
6	Personal Preparedness & Environmental Adaptation	1	1,85%
7	Integrated (Personal–Social–Environmental)	2	3,7%
Total		54	100%

The review identified seven types of conceptual approaches used to examine young farmers' resilience. The most dominant approach combined personal and social readiness (29.63%), followed by studies focusing exclusively on personal readiness (16.67%), social readiness (14.81%), or environmental adaptation (16.67%). In contrast, fully integrated conceptual models incorporating personal, social, and ecological dimensions simultaneously accounted for only 3.7% of the reviewed studies.

This distribution indicates a strong tendency toward partial analyses and highlights the limited adoption of holistic resilience frameworks in existing research.

Identified Empirical and Methodological Gaps

Across the reviewed literature, several consistent gaps were identified. These include the scarcity of longitudinal studies capturing changes in resilience over time [44; 45], limited use of spatial and digital data, insufficient attention to gender and social inclusion [46], and a lack of context-specific analyses incorporating local knowledge systems, particularly in Indonesia. The dominance of cross-sectional and sectoral approaches constrains the ability to fully explain the dynamic and systemic nature of young farmers' resilience [14; 15].

This gap indicates that research on youth resilience is still developing and has ample room for new approaches based on technology, social justice, and a sustainability perspective.

Conclusions

This study offers an integrated synthesis of contemporary scientific literature addressing the resilience of young farmers within the agricultural sector. The findings demonstrate that research on this topic has evolved from a narrow focus on youth participation and employment toward a broader understanding of resilience as a multidimensional and dynamic process shaped by social, economic, and environmental uncertainties. However, empirical evidence remains unevenly distributed across regions, with developing countries particularly Indonesia still underrepresented in the global literature.

The review confirms that young farmers' resilience is not determined by a single factor but emerges from the systemic interaction of three core dimensions: personal readiness, social readiness, and environmental adaptation. Personal readiness manifested through motivation, self-efficacy, agripreneurial competence, and digital literacy forms the foundational capacity for adaptation. Social readiness, reflected in family support, community networks, institutional arrangements, and policy environments, serves as a key enabling context that shapes access to resources and opportunities. Meanwhile, environmental adaptation, which involves responding to climate change, technological shifts, and market perspectives, represents the space where personal and social capacities are put into practice and sustained within agricultural activities.

Despite growing scholarly attention, the literature remains dominated by partial and cross-sectional approaches, with limited adoption of integrated, longitudinal, and context-sensitive frameworks. The scarcity of holistic models, combined with insufficient consideration of gender, digital inequality, spatial

dynamics, and local knowledge systems, constrains a full understanding of how resilience is built and sustained among young farmers over time.

Addressing these limitations, this study proposes an integrated conceptual framework that views young farmers as adaptive and transformative actors within sustainable agricultural systems. By bringing together personal readiness, social readiness, and environmental adaptation into a single model, the framework contributes to the development of resilience theory and provides a basis for future empirical work. Overall, strengthening young farmers' resilience requires ecosystem-based, cross-sectoral, and evidence-driven approaches to ensure farmer regeneration and long-term agricultural sustainability.

Conflict of interest information. The authors report no conflicts of interest associated with this study.

Description of the application of the generative model. During the preparation of this article, the authors used ChatGPT (OpenAI, GPT-4.0 version) to assist in language refinement and grammatical editing of selected manuscript sections. The AI tool was not used for data analysis, study design, or interpretation of findings. All conceptual development, synthesis, and final editing were conducted by the authors. The authors reviewed and revised the AI-assisted outputs as necessary and take full responsibility for the content of the published article.

References

1. FAO. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021*. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
3. Leavy, J., & Hossain, N. (2014). Who wants to farm? Youth aspirations, opportunities and rising food prices. *IDS Working Papers*, 2014(439), 1–44. <https://doi.org/10.1111/j.2040-0209.2014.00439.x>
4. Brooks, S. (2021). Configuring the digital farmer: A nudge world in the making? *Economy and Society*, 50(3), 374–396. <https://doi.org/10.1080/03085147.2021.1876984>. EDN: <https://elibrary.ru/GFNOED>
5. Chamberlin, J., et al. (2021). *Youth and the rural economy in Africa: Hard work and hazard*. CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789245011.0000>
6. Kumeh, E. M., & Omulo, G. (2019). Youth's access to agricultural land in Sub-Saharan Africa: A missing link in the global land grabbing discourse. *Land Use Policy*, 89, 104210. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104210>

7. Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>
8. Folke, C. (2016). Resilience. In *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.8>
9. Bandura, A. (1997). *Self-Efficacy: The Exercise of Control*. W. H. Freeman & Co.
10. Birner, R., Daum, T., & Pray, C. (2021). Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4), 1260–1285. <https://doi.org/10.1002/aepp.13145>. EDN: <https://elibrary.ru/IOAOSH>
11. Lin, N. (2001). *Social Capital*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815447>
12. LaRue, K., Daum, T., Mausch, K., & Harris, D. (2021). Who wants to farm? Answers depend on how you ask: A case study on youth aspirations in Kenya. *European Journal of Development Research*, 33(4), 885–909. <https://doi.org/10.1057/s41287-020-00352-2>. EDN: <https://elibrary.ru/UFJDMY>
13. Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>. EDN: <https://elibrary.ru/VHSTUI>
14. Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
15. Geza, W., Ngidi, M., Ojo, T., Adetoro, A. A., Slotow, R., & Mabhaudhi, T. (2021). Youth participation in agriculture: A scoping review. *Sustainability*, 13(16), 9120. <https://doi.org/10.3390/su13169120>. EDN: <https://elibrary.ru/PDHPIS>
16. Mulema, J., et al. (2021). Barriers and opportunities for the youth engagement in agribusiness: Empirical evidence from Zambia and Vietnam. *Development Practice*, 31(5), 690–706. <https://doi.org/10.1080/09614524.2021.1911949>. EDN: <https://elibrary.ru/YTXMIK>
17. Rope, R., Marengke, M., Mulyo, J. H., Waluyati, L. R., Masyhuri, & Perwitasari, H. (2024). Resilience of farmers on the sustainability of natural farming systems for upland rice in Morotai Island. *Journal of Law and Sustainable Development*, 12(2), e2600. <https://doi.org/10.55908/sdgs.v12i2.2600>. EDN: <https://elibrary.ru/KKVAKF>
18. Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
19. Page, M. J., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. EDN: <https://elibrary.ru/JFSQRW>

20. Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic Reviews in the Social Sciences*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470754887>
21. Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>. EDN: <https://elibrary.ru/ETVJFT>
22. Kitchenham, B., & Brereton, P. (2013). A systematic review of systematic review process research in software engineering. *Information and Software Technology*, 55(12), 2049–2075. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2013.07.010>
23. Okoli, C., & Schabram, K. (2010). A guide to conducting a systematic literature review of information systems research. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1954824>
24. Booth, A., Papaioannou, D., & Sutton, A. (Eds.). (2016). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review* (2nd ed.). SAGE Publications Inc.
25. Mugridge, R. L. (2011). Introduction to modern information retrieval, 3rd ed. *Library Collections, Acquisitions, & Technical Services*, 35(4), 136–137. <https://doi.org/10.1080/14649055.2011.10766318>
26. Higgins, J. P. T., et al. (Eds.). (2024). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* (Version 6.5, updated August 2024). Retrieved from www.cochrane.org/handbook
27. Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>. EDN: <https://elibrary.ru/XAJQYQ>
28. Thomas, J., & Harden, A. (2008). Methods for the thematic synthesis of qualitative research in systematic reviews. *BMC Medical Research Methodology*, 8(1), 45. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-8-45>. EDN: <https://elibrary.ru/XEPHGZ>
29. Amirbagheri, K., Merigó, J. M., & Corrons, A. (2025). 30 years of energy for sustainable development: A bibliometric overview. *Energy for Sustainable Development*, 87, 101741. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101741>. EDN: <https://elibrary.ru/IFFEEL>
30. Sarstedt, M., Hair, J. F., Nitzl, C., Ringle, C. M., & Howard, M. C. (2020). Beyond a tandem analysis of SEM and PROCESS: Use of PLS-SEM for mediation analyses! *International Journal of Market Research*, 62(3), 288–299. <https://doi.org/10.1177/1470785320915686>. EDN: <https://elibrary.ru/RWZEDQ>
31. Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2–24. <https://doi.org/10.1108/EBR-11-2018-0203>

-
32. Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5th ed.). SAGE Publications, Inc.
 33. Bryman, A. (2016). *Social Research Methods* (5th ed.). Oxford University Press.
 34. Gaviglio, A., Bertocchi, M., Marescotti, M. E., Demartini, E., & Pirani, A. (2016). The social pillar of sustainability: A quantitative approach at the farm level. *Agricultural and Food Economics*, 4(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40100-016-0059-4>. EDN: <https://elibrary.ru/ZNLPEG>
 35. Kristjanson, P., et al. (2017). Addressing gender in agricultural research for development in the face of a changing climate: Where are we and where should we be going? *International Journal of Agricultural Sustainability*, 15(5), 482–500. <https://doi.org/10.1080/14735903.2017.1336411>
 36. Ninson, J., & Brobbey, M. K. (2023). Review on engaging the youth in agribusiness. *Cogent OA*. <https://doi.org/10.1080/23311886.2023.2193480>
 37. Slovic, P. (2016). *The Perception of Risk*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315661773>
 38. Tamru, S., et al. (2025). Climate information services enhance farmers' resilience to climate change: Impacts on agricultural productivity. *Climate Risk Management*, 49, 100724. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2025.100724>. EDN: <https://elibrary.ru/YSOJKD>
 39. Ungar, M. (2011). Community resilience for youth and families: Facilitative physical and social capital in contexts of adversity. *Children and Youth Services Review*, 33(9), 1742–1748. <https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2011.04.027>
 40. Ungar, M. (2006). Resilience across cultures. *British Journal of Social Work*, 38(2), 218–235. <https://doi.org/10.1093/bjsw/bcl343>
 41. Nocezo, Y.-I., Manyike, J. Z., Zhou, L., & Ngarava, S. (2024). The impact of access to climate services on smallholder farmers' cropping decisions and household food security in Elundini municipality, Eastern Cape province. *Frontiers in Climate*. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1458999>
 42. Hassan, R., Suhaili, W. S., Nore, B. F., & Basuni, M. A. (2024). Youth resilience toward climate smart agriculture technology adoption in Brunei Darussalam. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 40(3). <https://doi.org/10.61931/2224-9028.1545>. EDN: <https://elibrary.ru/YOXHJL>
 43. Rosman, A., MacPherson, J., Arndt, M., & Helming, K. (2024). Perceived resilience of community supported agriculture in Germany. *Agricultural Systems*, 220, 104068. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104068>. EDN: <https://elibrary.ru/BADOWO>
 44. Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

45. Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. P. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2), art5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
46. Faizien, H. A. (2025). Peran perempuan dalam pembangunan ekonomi pertanian. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Tanaman*, 4(1), 49–63. <https://doi.org/10.55606/jurrit.v4i1.4695>. EDN: <https://elibrary.ru/WGTIHS>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Muhammad Yuzan Wardhana, S.P., M.E.P., Head of Agribusiness Laboratory, Lecture & Researcher

Universitas Syiah Kuala

Banda Aceh, Aceh, Indonesia

yuzan@usk.ac.id

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3052-8933>

Scopus Author ID: 57201196197

Agussabti, M.Si., IPU., Vice Rector I., Lecture & Researcher

Universitas Syiah Kuala

Banda Aceh, Aceh, Indonesia

agussabti@usk.ac.id

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8540-0841>

Scopus Author ID: 54974389300

Mohamad Shahrudin Samsurijan, Dean, School of Social Sciences, Lecturer & Researcher

Universiti Sains Malaysia

Pulau Pinang, Malaysia

msdin@usm.my

Researcher ID: D-6583-2016

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9281-5252>

Scopus Author ID: 56245564400

T. Saiful Bahri, S.P., M.P., Lecture & Researcher

Universitas Syiah Kuala

Banda Aceh, Aceh, Indonesia

tsaifulbahri@usk.ac.id

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0707-6051>

Scopus Author ID: 5722214856

Поступила 03.01.2026

После рецензирования 20.02.2026

Принята 02.04.2026

Received 03.01.2026

Revised 20.02.2026

Accepted 02.04.2026

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1730](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1730)EDN: [SIFTFF](https://siftff.ru)

УДК 664.64



Исследование технологических свойств нетрадиционных видов муки при производстве мучных кулинарных изделий

А.Т. Васюкова¹, И.У. Кусова², О.А. Суворов²¹Университет Вернадского, Балашиха, Российская Федерация²Университет РОСБИОТЕХ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Мучные кулинарные изделия пользуются заслуженным и постоянным спросом у потребителей. Повышение пищевой, биологической ценности и расширение линейки данной группы пищевых продуктов – важная народнохозяйственная задача.

Цель исследования – разработка сбалансированных по аминокислотному составу СФС, рецептуры булочки Триумф со сбалансированным комплементарным составом белка и изучение качественных характеристик полуфабрикатов и готовых изделий.

Методы. Объектом исследования выбраны сухие функциональные смеси №1-№3, состоящие из 7-9 компонентов зернобобового сырья, образцы обогащенной муки, тесто и булочки «Триумф» с нетрадиционными видами муки. Комплексные исследования проводились традиционными методами определения белизны, числа падения муки, реологических показателей теста и булочек. Использован профильноранговый метод сенсорной оценки булочек.

Результаты. Освещены вопросы влияния сбалансированных по аминокислотному составу трех вариантов сухих функциональных смесей на физико-химические показатели дрожжевого теста и мучных кулинарных изделий – булочек «Триумф». Рассмотрен ингредиентный состав сухих смесей, включающий зерновые, бобовые культуры и пряно-ароматическое сырье. Рассмотрены основные группы хлебобулочных изделий, востребованных потребителем. Проанализирован рынок пищевых добавок, используемых в хлебобулочных изделиях. Определены критериальные показатели, которые использованы в качестве основы для моделирования рецептур булочек.

Заключение. Установлено, число падения всех образцов муки с сухими смесями от 247,5 с; с 238,0 с и до 172,5 соответственно по сравнению с 282,0 с, что ниже контроля в 1,1 - 1,6 раз, а кислотность несколько превышает контрольный показатель. Оптимальная концентрация сухих смесей в рецептуре булочек «Триумф», не снижающая качество изделий, составляет 15% от массы контрольного образца. Удельный объем булочек, максимально соответствующий контрольному образцу, булочки с СФС №3, состоящая из восьми видов зернобобового сырья, включающая максимальную концентрацию чечевицы (26,3%), гороха (22%) и пшена (22%), что повлияло также на вкусовые показатели образцов. Выявлено увеличение пористости мякиша булочек (на 6,1 % по сравнению с образцом №3) при повышении удельного объема изделий на 11,1 % при введении в рецептуру СФС № 3.

Ключевые слова: свойства; изделия; булочки; пищевые добавки; сухие функциональные смеси; пищевая и биологическая ценность

Для цитирования. Васюкова, А. Т., Кусова, И. У., & Суворов, О. А. (2026). Исследование технологических свойств нетрадиционных видов муки при производстве мучных кулинарных изделий. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 537-568. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1730>

Study of the technological properties of non-traditional flour types in the production of flour culinary products

A.T. Vasyukova¹, I.U. Kusova², O.A. Suvorov²

¹Vernadsky University, Balashikha, Russian Federation

²University ROSBIOTECH, Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. Flour-based culinary products enjoy well-deserved and consistent demand among consumers. Increasing the nutritional and biological value and expanding the product line of this food group is an important national economic objective.

Purpose. The aim of the work is to develop a balanced amino acid composition SPS, a recipe for Triumph buns with a balanced complementary protein composition and to study the quality characteristics of semi-finished and finished products.

Methods. The study subjects were dry functional mixtures No. 1-No. 3, consisting of 7-9 legume components, fortified flour samples, and dough and Triumph buns made with non-traditional flour types. Comprehensive studies were conducted using traditional methods to determine whiteness, flour falling number, and rheological properties of the dough and buns. A profile-ranking method for sensory evaluation of the buns was used.

Results. This article examines the impact of three dry functional mixes, each with a balanced amino acid composition, on the physicochemical properties of yeast dough and flour-based baked goods – Triumph buns. The ingredient composition of the dry mixes, including grains, legumes, and spices and aromatics, is examined. The main groups of bakery products in demand by consumers are considered. The market for food additives used in bakery products is analyzed. Criteria are determined, which are used as a basis for modeling bun recipes.

Conclusion. The falling number of all flour samples with dry mixes was found to range from 247.5 s; from 238.0 s to 172.5 s, respectively, compared to 282.0 s, which is 1.1-1.6 times lower than the control value, while acidity slightly exceeds the control value. The optimal concentration of dry mixes in the Triumph bun recipe, without degrading product quality, is 15% of the control sample weight. The specific volume of the buns, which most closely matched the control sample, was buns with SFS No. 3, consisting of eight types of legumes, including the highest concentration of lentils (26.3%), peas (22%), and millet (22%). This also impacted the taste of the samples. An increase in the crumb porosity of the buns (by 6.1% compared to sample No. 3) was observed, while the specific volume of the products increased by 11.1% with the introduction of SFS No. 3 into the recipe.

Keywords: properties; products; buns; food additives; dry functional mixes; nutritional and biological value

For citation. Vasyukova, A. T., Kusova, I. U., & Suvorov, O. A. (2026). Study of the technological properties of non-traditional flour types in the production of flour culinary products. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 537-568. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1730>

Введение

В хлебопечении механическая энергия, подаваемая в процессе смешивания, способствует гидратации проламинов (глиадинов и глютелинов) и вызывает конформационные изменения этих белков. Такие структурные изменения приводят к образованию ковалентных (SS) и нековалентных связей, а также водородных связей, которые образуют глютен. Глютен может удерживать ферментационные газообразные вещества (CO_2), тем самым реагируя на объем, текстуру и мягкость хлеба. Он демонстрирует важные технологические свойства, объясняющие его широкое использование в пищевой промышленности в качестве сырья и пищевой добавки [49].

Качество хлеба можно определить с помощью физического, химического, микробиологического, сенсорного анализа, внешних характеристик хлеба (размеры, удельный объем, цвет корки, форма и симметрия) и вну-

тренних характеристик хлеба (толщина корки, цвет мякиша, размер и количество альвеол, и текстура мякиша).

Часто обращают внимание на качество безглютенового хлеба [50; 61], обогащенного селеном и йодом [5], грецкими орехами, содержащими йод [16]. В рецептурах также используют органически связанные формы йода и цинка на низкомолекулярных пептидах соевого гидролизата [10]; белково-витаминно-минеральные ингредиенты, изготовленные из семян сои биотехнологической модификации [21]; препараты на основе ростков пшеницы и ячменя [19]; комплексные добавки из чечевичной муки и порошка морской капусты [12]. Важным является и введение в хлебобулочные изделия солодовых препаратов [10], всевозможных улучшителей, позволяющих активировать дрожжевые клетки [15].

Хлебобулочные изделия, вырабатываемые у нас в стране, являются одной из наиболее востребованных потребителями групп пищевых продуктов. Поэтому значимым аспектом также будет обогащение пищевыми добавками со скорректированным аминокислотным составом [11], и оценка биологической полноценности готовых изделий. Получить требуемые характеристики булочек возможно путем моделирования рецептур, корректирования технологического процесса, активации отдельных ключевых контрольных точек, регулирующих баланс между пищевой ценностью продукта и органолептическими показателями качества.

Среди проанализированных рецептур хлебобулочных изделий можно выделить наиболее распространенные и максимально отвечающие показателям биологической полноценности. При использовании рисовой муки в качестве основного ингредиента в рецептуру вводится кукурузный крахмал, гречневая крупа и соя, или рисовая мука, мука батата и β -амилаза [26]. Сочетание рисовой муки или кукурузного крахмала и гидроколлоидов способствует формированию структуры теста. За счет водорастворимого полимера (гидроксипропилметилцеллюлоза) и конжаковой камеди, являющихся натуральными полисахаридами, которые используются для загустения, структурирования теста, создается требуемый объем хлеба или булочек. В качестве загустителя в отдельных рецептурах используется псиллиум - пищевые волокна, получаемые из оболочки семян *Plantago ovata* (подорожника яйцевидного) [30].

Смесь рисовой муки, метилцеллюлозы и транsgлутаминазы, в сочетании с добавками сорбитола, трегалозы, альфа-амилазы или полисорбата отличается высокой ферментной активностью. Путем введения в смесь метилцеллюлозы, не имеющей запаха и вкуса, а также обладающей высокой

степенью влагоудержания и загущающими свойствами, при добавлении воды образуется вязкий гелеобразный раствор. Полученная смесь является основой в формировании структуры теста [31].

Отдельно можно выделить рецептуры высокобелковых смесей для хлебобулочных изделий. Например, смесь кукурузного крахмала и гидроксипропилметилцеллюлозы с добавлением горохового белка и/или яичного [32]; сухая функциональная смесь из муки проса и сои 20:80% [34]; смесь рисовой муки и ксантановой камеди (с добавлением или без добавления гидроксипропилметилцеллюлозы), соевого или яичного белка; смесь муки (67% рисовая + 33% крахмал маниоки) с 16% гидроксипропилметилцеллюлозы и 50% яичного белка [36]; смесь муки из нута, картофельного крахмала, гречневой муки, муки из цельного зерна сорго и муки из конских бобов, рисовой клетчатки, крахмала тапиоки [42]. Вводимая в состав смеси мука из конских бобов может напрямую заменить импортную соевую муку и часть пшеничной муки с низким содержанием питательных веществ.

Известны также многокомпонентные смеси, состоящие из пшеничной муки, рисовой клетчатки, крахмала тапиоки, белка яйца; рисовой муки, рисовой клетчатки, крахмала тапиоки, трегалозы, белка яйца; пшеничной муки, рисовой клетчатки, крахмала тапиоки, трегалозы, соевого масла, белка яйца; рисовой муки и клетчатки, крахмала тапиоки, сахара, трегалозы, соевого масла и белка яйца [44]. Перечисленные многокомпонентные мучные смеси используются для получения хлеба определенного объема и структуры.

Для получения хлеба с удельным объемом $3,5 - 4,0 \text{ см}^3$ в состав рецептуры входит 80% сухих компонентов, к которым относится мучная смесь из пшеничной муки (85%) и соевой (15%), соль, сахар, дрожжи, а остальное – вода [35]; сухая мучная смесь (67% рисовой муки и 33% крахмала маниоки) с добавлением 16% гидроксипропилметилцеллюлозы, 50% яичного белка, 10% дрожжей, 2% соли, 4% сахара и воды [37]; сухая мучная смесь состоит из рисовой муки с добавлением 2% кукурузной муки, 0,5% трансглутаминазы, 4% коллагеновых волокон, 2% соли, 5% сахара, 2% сухих дрожжей, 6% соевого масла, 0,009% аскорбиновой кислоты и воды [39].

Для получения хлеба с удельным объемом $7,0-7,14 \text{ см}^3$ в состав рецептуры входит смесь из рисовой муки и кукурузного крахмала (50–50%), 5% заменителя яичного белка и воды; смесь из кукурузной муки, кукурузного крахмала и воды. Во все смеси было добавлено 2% гидроксипропилме-

тилцеллюлозы [47,54]. Полученный хлеб характеризовался хорошо сформированной текстурой: твердостью, упругостью и плотностью, которые соответствовали требованиям к данной группе хлебобулочных изделий.

Для получения хлеба с удельным объемом $7,58 \text{ см}^3$ в состав рецептуры входит смесь из кукурузного крахмала и 2% гидроксипропилметилцеллюлозы с добавлением 6% подсолнечного масла, 5% сахара, 3% сухих дрожжей; 1,8% соли и воды [30]; в состав сухих компонентов входит мучная смесь (95% рисовой муки и 5% рисового белка), 2% гидроксипропилметилцеллюлозы, 5% сахарозы; 1,8% соли, 3% быстрорастворимых дрожжей с добавлением 6% подсолнечного масла и воды [25].

Анализируя полученные данные можно отметить, что хлебобулочные изделия, имеющие удельный объем 7 см^3 , имели водопоглотительную способность от 56,5 до 120%, твердость варьировалась в больших пределах, а также упругость, показатели отличались в 3 раза. Мякиш имел от желтого до зеленоватого оттенка.

Следующая группа хлебобулочных изделий, имеющие удельный объем $3,5\text{--}4 \text{ см}^3$, имели несколько большее водопоглощение, по сравнению с образцами, имеющими удельный объем 7 см^3 . Данные варьировались от 70 до 130%. Твердость мякиша и упругость были менее неоднородными, лучше соответствовали контрольным образцам. Текстура считалась сухой и грубой, а вкус – бобовым, что отмечено не довольно качественным [38; 58].

Последняя группа хлебобулочных изделий с самым большим удельным объемом $7,58 \text{ см}^3$ отмечена по показателям профиля текстуры: твердость не высокая, а упругость в 2 раза больше, чем у образцов с удельным объемом 7 см^3 . Все анализируемые образцы имели приятный и гармоничный вкус [30; 47; 56].

Удельный объем нарезного батона является хорошим показателем качества хлеба и связан с количеством воды, удерживаемой в его структуре. Точно отражает изменение объема данного пищевого продукта, приготовленного в соответствии с различными рецептурами и способами производства. Он представляет собой способность глютеиновых белков удерживать достаточное количество CO_2 , выделяющегося во время ферментации и расстойки теста. Это объективная характеристика, и при сочетании с плотностью она показывает связь между содержанием твердых веществ и долей воздуха, пористостью в выпеченном тесте. Хлеб с высокой плотностью и/или с низким удельным объемом не востребован потребителем. Он обычно связан с высоким содержанием влаги, трудностью разжевывания и отрицательно гармонирует со вкусом и ароматом [26; 27; 33; 45].

Однако иногда потребители ищут натуральный безглютеновый продукт, который может значительно отличаться от традиционных хлебобулочных изделий, что не является недостатком, а зависит от выбора потребителя.

Выбор в качестве составного компонента сухих смесей для хлебобулочных изделий рисовой муки обусловлен ее гипоаллергенными характеристиками, низким содержанием (2,5–3,5%) проламинов, приятным вкусом, белым цветом, помимо других преимуществ, таких как экономические преимущества и широкая доступность [26; 28; 37; 53; 57]. Рисовые белки в основном гидрофобны и нерастворимы. Эта нерастворимость не позволяет формировать вязкоупругое тесто, необходимое для удерживания углекислого газа во время брожения. Кроме того, рисовые белки не обладают свойствами проламинов, аналогичного проламинам пшеницы. В результате хлеб имеет низкий объем с липкими хлебными крошками и высокой скоростью старения. С другой стороны, в составе мучной смеси содержится кукурузная мука, а зеин – это белок, содержащийся в кукурузе. Он проявляет гидрофобность, поскольку в его аминокислотный состав входит много гидрофобных остатков аминокислот (лейцин, пролин, аланин и фенилаланин).

Необходимо отметить, что физико-химические свойства различных сортов риса влияют на функционально-технологические показатели хлеба. Этот факт связан с уровнями амилозы и амилопектина в каждом типе зерна [52]. Aoki N. и др. [27] определили, что содержание амилозы в рисовой муке (19–22%) положительно коррелировало с удельным объемом безглютенового хлеба. Эти авторы также установили, что этот хлеб менее пористый, чем те образцы, которые получены из муки с низким содержанием амилозы. Это указывает на тот факт, что амилоза играет более важную роль в достижении большого объема хлеба.

Что касается роли крахмала в эффективности многокомпонентных рецептов для производства безглютеновых хлебобулочных изделий, можно отметить, что кукурузный, картофельный, маниоковый и рисовый крахмалы, могут образовывать матрицу для удержания углекислого газа, ухудшения коалесценции крахмальных полисахаридов во время брожения теста, а также для стабилизации конечной структуры хлебобулочных изделий [24; 33; 38; 51; 57]. Поэтому выбор крахмала является важнейшим элементом для оптимальной рецептуры таких продуктов. В целом, крахмал злаковых культур (пшеничный, кукурузный и рисовый), содержит меньше влаги, чем картофельный и тапиоковый крахмал. Выбранный тип крахмала влияет на водопоглощение теста и реологические параметры, характери-

ки клейстеризации крахмала, а также текстуру и черствение полученного мякиша [25; 46; 62].

Во многих исследованиях были предложены рецептуры на основе смеси рисовой муки, кукурузного крахмала с крахмалами других культур, гидроколлоидами, белками и ферментами для получения пресного или безглютенового теста с соответствующим удельным объемом и мякишем с меньшим количеством крупных пор. Эти белки, ферменты и крахмал, которые формируют и улучшают качество теста, могут связывать воду, увеличивать вязкость и развивать неглютеновую матрицу. Эта структура может представлять свойства глютена за счет стабилизированных белковых связей (межмолекулярных и внутримолекулярных). Лучшего теста и улучшенной текстуры продуктов можно добиться как с помощью гидроколлоидов, так и белков, смеси вязких свойств (поглощение белка и гибкость) и эластичных свойств – образования пленки и удержания углекислого газа [41; 46].

Важным в тестоведении является размер и свойства различных гранул компонентов рецептуры, степень помола зернобобовых культур. Рисовый крахмал имеет гранулы небольшого размера (от 2 до 10 мкм), уровень амилозы от 1 до 37%, а при желатинизации он имеет мягкий вкус и кремовый вид, создавая ощущение текстуры, похожей на текстуру жира. Кукурузный крахмал содержит от 25 до 28% амилозы и гранулы от 5 до 25 мкм [60]. Картофельный крахмал имеет уровни амилозы от 20 до 30% и диаметр гранул от 20 до 40 мкм, образуя высоковязкий, плотный и прозрачный гель. Крахмал маниоки содержит 17% амилозы и размер гранул от 30,51–39,50 до 14,39–17,1 мкм. В зависимости от концентрации перечисленных крахмалов в рецептуре теста, или вида зернобобовых культур и концентрации крахмала в них будет сформирован каркас теста различной твердости и упругости. В рецептуру теста также могут вводиться модифицированные крахмалы. Они существенно отличаются от нативных по степени гидрофильности, способности к клейстеризации и гелеобразованию. Целые же зерна крахмала при температурах замеса теста связывают воду в основном адсорбционно, и поэтому их объем в тесте увеличивается весьма незначительно. Объем может варьировать от концентрации крахмала в безглютеновом тесте, где крахмал будет играть роль формирующей структуры теста, входить в его каркас.

Что касается роли гидроколлоидов в формировании подходящей матрицы для производства безглютенового теста, Baldino N. и др. [29] сообщили, что они могут быть лучшими альтернативами для обеспечения

газоудержания и имитации вязкоупругих свойств глютена. Таким образом, они придают мякишу структурообразующие свойства. Образованная сеть может удерживать углекислый газ, увеличивать объем хлеба и улучшать вязкость теста. Эти агенты также необходимы для временного связывания воды для желатинизации крахмала и структуры мякиша.

Кроме органолептических показателей важным является повышение пищевой и биологической ценности хлебобулочных изделий, возможности использования перспективного хлебопечения из высокобелковых видов муки, пищевых добавок и сухих хлебопекарных смесей. Наиболее оптимально соответствует данным показателям цельнозерновая амарантовая мука, имеющая также высокие показатели газообразующей и газоудерживающей способностей [4; 8; 23]. Введение в рецептуру хлеба функциональных пищевых ингредиентов на основе смеси из семян сои биотехнологической модификации в количестве от 10 до 30 %, позволяет увеличить концентрацию белка на 4,8 г, жира - на 0,5 г, золы - на 0,4 г, пищевых волокон - на 0,6 г, витаминов E, B₁, B₄, β, минеральных веществ (K, Ca, Mg), которые превышают 15% суточной потребности организма, что позволяет отнести такой продукт к функциональным [21].

Разработаны сухие кулинарные безглютеновые смеси для блинчиков на основе рисовой, соевой, кукурузной и амарантовой муки, а также сухого обезжиренного молока и яичного порошка. Рецептурный состав сухих смесей подбирался по органолептическим показателям и с учетом содержания в муке основных аминокислот с целью обеспечения функциональных свойств продукции. Целесообразность использования одновременно двух видов муки (рисовой и амарантовой) в рецептуре позволяет сбалансировать комплементарный состав белка [22].

Обогащать пищевые продукты массового потребления, к которым относятся хлебобулочные изделия, возможно путем введения в рецептуры одного или нескольких составляющих пищевых ингредиентов с целью предотвращения возникновения или исправления дефицита в организме человека пищевых веществ. Производство продуктов с добавленной пищевой ценностью возможно при использовании природно-сырьевых ресурсов России, в том числе зерновых и масличных культур в виде цельных зерен, продуктов их переработки (крупы, муки, отрубей, многозерновых смесей). Можно добавлять также продукты переработки фруктов, ягод и орехов, содержащие весь спектр натуральных биологических активных веществ [6; 13; 14].

Решение проблемы пищевой и биологической ценности хлебобулочных изделий возможно путем внедрения в производство высоко-

качественных сортов пшеницы, формирующих зерно с повышенным содержанием белка [7; 20]. Дудко М.А. предлагает использовать в хлебопечении пшеницу сорта Веда, селекции Краснодарского НИИСХ им. П.П. Лукьяненко, формирующего высокое содержание белка, наряду с высоким урожаем. Установлено, что повышение белка приводит к увеличению доли водо- и солерастворимой фракций белка, которые наиболее полноценны по аминокислотному составу лизином, триптофаном, треонином и метионином. Это означает, что путем селекции за счет повышения общего белка в зерне пшеницы, можно увеличить количество лимитируемых незаменимых аминокислот в хлебе и повысить его биологическую ценность [7].

В связи с вышесказанным достаточно актуальным вопросом остается качество хлебобулочных изделий с учетом питательных, сенсорных и технологических аспектов, ингредиентов [51; 59]. Анализ имеющихся рецептов показал возможные сочетания компонентов, влияющих на структуру хлебобулочных изделий. Но в большинстве случаев рассматривался только удельный объем как один из показателей оценки качества [48]. Удельный объем является важнейшим показателем технологического процесса при выпечке хлеба [55], сильно влияющим на выбор потребителя. Он используется для выражения технологической пригодности рецептуры для производства хлеба [43].

Учитывая, что в литературе пока нет публикаций о качестве булочек, обогащенных сухой функциональной смесью (СФС) со скорректированным аминокислотным составом, оцененных по удельному объему, то данное направление актуально и требует дальнейших исследований.

Цель исследования – разработка сбалансированных по аминокислотному составу СФС, рецептуры булочки Триумф со сбалансированным комплексным составом белка и изучение качественных характеристик полуфабрикатов и готовых изделий.

Материалы и методы

Объекты – сухие функциональные смеси (СФС): №1 (1 /НС); №2 (2 ДС/2); №3 (3 ВС), булочки сдобные «Триумф» с добавками СФС. Контрольный образец – рецептура № 292¹.

Состав сухих функциональных смесей (табл. 1) сбалансирован по аминокислотному составу (табл. 2).

¹ Сборник рецептов на продукцию для обучающихся во всех образовательных учреждениях под ред. В.А. Тутельяна и Д.Б. Никитюка. М.: ДеЛи плюс, 2022.

Таблица 1.

Ингредиентный состав рецептуры СФС
Table 1. Ingredient Composition of Dry Functional Blends

Продукт	5 ВС/3, г	3 ВС/2, г	2 ДС/2, г	1 НС, г
Мука чечевичная		26,3	14,0	7,0
Мука гороховая	17,0	22,0		7,0
Мука из гороха (маш)				7,0
Мука пшеничная	26,0	22,0	12,0	
Мука перловая	14,0	12,0	12,0	40,0
Мука полбяная	7,0	10,0	30,0	31,0
Мука фасолевая	28,3		24,5	5,0
Мука ржаная	6,0			
Мука овсяная		6,0		
Мука гречневая			6,0	
Соль поваренная пищевая	1,2	1,2	1,0	1,2
Порошок скорлупы кедрового ореха				1,5
Кориандр, семена	0,3	0,3	0,5	0,3
Перец душистый, молотый	0,2	0,2		
Массовая доля влаги	10,31	11,78	12,22	12,71
Итого	100	100	100	100

Таблица 2.

Пищевая и биологическая ценность используемых СФС, г/100 г продукта
Table 2. Nutritional and Biological Value of the Dry Functional Mixtures Used, g/100 g of product

СФС	1НС	2/ДС-2	3/ВС-2
Белки, г	11,640	16,856	18,140
Жиры, г	0,162	1,918	2,183
Углеводы, г	41,26	58,95	44,78
Калорийность, ккал	238,2	326,93	387,04
Триптофан	0,192	0,167	0,192
Треонин	0,635	0,510	0,621
Изолейцин	0,676	0,621	0,746
Лейцин	1,270	1,358	1,43
Лизин	0,924	0,541	1,016
Метионин	0,249	0,275	0,226
Цистеин	0,204	0,284	0,297
Фенилаланин	0,844	0,764	0,89
Тирозин	0,439	0,449	0,51
Валин	0,828	0,762	0,886
Аргинин	0,994	0,970	1,2656
Гистидин	0,427	0,377	0,453
Аланин	0,803	0,863	0,8777
Аспарагиновая к-та	1,673	1,176	1,7504
Глутаминовая к-та	2,932	3,501	3,4530
Глицин	0,709	0,585	0,7206
БЦ	17,261	16,920	18,696

Для обоснования степени сбалансированности аминокислотного состава полученных смесей для сравнения приведены данные по эталонному белку, в том числе аминокислотный скор.

При расчете аминокислотного сора использованы приведенные ниже эталонные аминокислотные шаблоны, по возрастам питающихся (детей), согласно справочным данным² (табл. 3). Аминокислотные скоры рецептур СФС №1-3 приведены в табл. 4-6.

Таблица 3.

Эталонные аминокислотные шаблоны, по категориям питающихся, мг**Table 3. Reference Amino Acid Profiles by Dietary Category, mg**

Категория питающихся	Три	Тре	Изо	Лей	Лиз	САК	ААК	Вал	Гис
до года	8,5	31	32	66	57	28	52	43	20
1–2	7,4	27	31	63	52	26	46	42	18
3–10	6,6	25	31	61	48	24	41	40	16
11–14	6,5	25	30	60	48	23	41	40	16
15–18	6,3	24	30	60	47	23	40	40	16
Взрослые >18 лет	6	23	30	59	45	22	38	39	15

Сокращения и обозначения:

Три – триптофан *Тир* – тирозин *АК* – аминокислота *Тре* – треонин *Лиз* – лизин *САК* – серосодержащие аминокислоты (метионин + цистеин). *Изо* – изолейцин *Вал* – валин *ААК* – ароматические аминокислоты (фенилаланин + тирозин) *Лей* – лейцин *Гис* – гистидин *НАК* – незаменимые аминокислоты (всего) *Мет* – метионин *Фен* – фенилаланин *Цис* – цистеин

Таблица 4.

Аминокислотный скор (PDCAAS) для рецептуры № 3 (3 BC/2)**Table 4. Amino Acid Score (PDCAAS) for Formulation No. 3 (3 BC/2)**

Категория питающихся (шаблон АК)	Три	Тре	Изо	Лей	Лиз	САК	ААК	Вал	Гис	Лимитирующая АК	Скор	PDCAAS
до года	117	106	123	115	96	96	142	108	120	Лизин	95,9	93,9
1–2	135	122	127	120	105	104	160	111	134	Серосодерж.	103,7	101,5
3–10	151	132	127	124	114	112	180	116	150	Серосодерж.	112,3	110,0
11–14	153	132	132	126	114	117	180	116	150	Лизин	113,9	111,5
15–18	158	137	132	126	116	117	184	116	150	Лизин	116,3	113,9
Взрослые >18 лет	166	143	132	129	121	123	194	119	160	Валин	119,4	117,0

² FAO food and nutrition paper 92. Dietary protein quality evaluation in human nutrition/ Report of an FAO Expert Consultation, Geneva: FAO, 2013.

Таблица 5.

Аминокислотный скор (PDCAAS) для рецептуры №2 (2 ДС/2)**Table 5.** Amino Acid Score (PDCAAS) for Formulation No. 2 (2 DS/2)

Категория питающихся (шаблон АК)	Три	Тре	Изо	Лей	Лиз	САК	ААК	Вал	Гис	Лимитирующая АК	Скор	PDCAAS
до года	74	65	77	74	45	75	93	70	78	Лизин	45,4	44,9
1–2	85	75	80	78	50	81	105	72	86	Лизин	49,8	49,2
3–10	95	81	80	80	54	88	118	75	97	Лизин	53,9	53,3
11–14	96	81	82	82	54	91	118	75	97	Лизин	53,9	53,3
15–18	99	84	82	82	55	91	121	75	97	Лизин	55,1	54,4
Взрослые >18 лет	104	88	82	83	58	96	127	77	104	Лизин	57,5	56,9

Таблица 6.

Аминокислотный скор (PDCAAS) для рецептуры №1 (1 НС)**Table 6.** Amino Acid Score (PDCAAS) for Formulation No. 1 (1 NS)

Категория питающихся (шаблон АК)	Три	Тре	Изо	Лей	Лиз	САК	ААК	Вал	Гис	Лимитирующая АК	Скор	PDCAAS
до года	107	82	93	83	59	97	116	86	94	Лизин	58,9	58,5
1–2	123	94	96	87	65	105	131	88	104	Лизин	64,5	64,1
3–10	138	101	96	89	70	113	147	92	117	Лизин	69,9	69,5
11–14	140	101	99	91	70	118	147	92	117	Лизин	69,9	69,5
15–18	145	106	99	91	71	118	151	92	117	Лизин	71,4	71,0
Взрослые >18 лет	152	110	99	92	75	124	159	94	125	Лизин	74,6	74,1

Используемые методы

В работе применялись общеизвестные методы определения качества сырья, СФС, теста и готовых булочек «Триумф», в том числе показатели числа падения по ГОСТ 27676-88³ на приборе ПЧП-7. Определение pH проводили по ГОСТ 27493-87⁴ на анализаторе жидкости «Эксперт-001»; кислотности методом титрования по ГОСТ 28561-90⁵; подъемную силу дрожжей ускоренным способом – методом всплывания шарика по ГОСТ

³ ГОСТ 27676-88 Зерно и продукты его переработки. Метод определения числа падения.

⁴ ГОСТ 27493-87 Мука и отруби. Метод определения кислотности по болтушке.

⁵ ГОСТ 28561-90 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги.

Р 54731-2011⁶. Органолептическую оценку выполняли по ГОСТ ИСО 6658–2015⁷.

Вычисление показателей осуществляли путем применения программы «STATISTICA–version10».

Результаты и обсуждение

Для моделирования рецептур булочек с введением нетрадиционных компонентов (СФС), важным являлось создание оптимальных условий брожения теста путем активации дрожжей. Наиболее эффективный способ активации – создание питательной среды, позволяющей максимально стимулировать развитие и рост дрожжевой клетки. В качестве активаторов могут выступать углеводы, витамины, минералы и аминокислоты. Эти вещества создают благоприятные условия для роста и размножения дрожжей, повышают их бродильную активность. Концентрация аминокислот (валина, лейцина и изолейцина) в СФС в 2,0-2,3 раза выше, чем у пшеничной муки высшего сорта. Они играют важную роль в жизнедеятельности дрожжей в процессе брожения, а также участвуют в биохимических процессах метаболизма углеводов при спиртовом брожении. Предварительное заваривание СФС позволяет создать питательный субстрат для дрожжей, который будет способствовать активации дрожжевой клетки. Этот технологический процесс известный как метод Ф.Г. Гинзбурга [1] подтверждает биохимическую роль СФС в процессе брожения. Использование чечевичной муки в составе СФС №1, №2 и №3 в концентрации от 1,1 до 4,0% в составе теста для булочек, тоже совместно с другими компонентами рецептуры будет использоваться в качестве субстрата для активации дрожжей и брожении теста. Данный способ активации дрожжевой клетки описан в методе А. А. Петрика с соавторами, но отличается немного большей концентрацией чечевичной муки в составе субстрата [17; 18]. В данном случае, используемые в эксперименте сбалансированные по аминокислотному составу СФС, могут применяться в качестве питательной среды для дрожжевой клетки.

Заварка, состоящая из СФС, введенная в водный дрожжевой раствор в течение 20-30 минут при температуре 30-32°C, будет способствовать интенсификации процесса брожения теста. Этот технологический прием позволил улучшить качество дрожжей за счет увеличения их подъемной силы на 10,21 %, что привело к увеличению объема теста, позволило сократить продол-

⁶ 54731-2011 Дрожжи хлебопекарные прессованные. Технические условия.

⁷ ГОСТ ИСО 6658–2015 Органолептический анализ. Методология. Общее руководство.

жительность технологического процесса, повысить качество булочек. На основании проведенных физико-химических исследований и промежуточных дегустаций был выбран диапазон внесения СФС в рецептуру, который не ухудшал органолептические показатели качества булочек «Триумф». Установлено, что оптимальной является замена пшеничной муки высшего сорта на СФС в количестве 15-20% (табл. 7). Более высокая добавка функциональной смеси снижала органолептические показатели качества готовых булочек (становились сероватого цвета), а концентрация СФС менее 15% - не имела достаточного стимулирующего эффекта роста дрожжевой клетки.

Три модельные рецептуры с концентрацией 20% были проанализированы с добавкой следующих смесей: образец 1 – смесь №2 (2 ДС/2), образец 2 – смесь № 3 (3 ВС/2) и образец 3 – смесь №1 (НС) (табл. 7).

Таблица 7.

Модельные рецептуры дрожжевого теста для булочек (при 20% замене муки), г

Table 7. Model Formulations for Yeast Dough for Rolls (with 20% flour substitution), g

Наименование сырья	1 образец	2 образец	3 образец	Контрольный
Мука пшеничная	40	40	40	55
Сахар белый	7	7	7	7
Масло растительное	9	9	9	9
Яйцо (меланж)	4	4	4	4
Соль	0.4	0.4	0.4	0.4
Дрожжи	2	2	2	2
Вода	20	20	20	20
2 ДС/2	15	-	-	-
3 ВС/2	-	15	-	-
1 НС	-	-	15	-
Масса полуфабриката	95	95	95	95
Выход:	76,0	76,1	75,8	78

Для установления уровня воздействия питательной среды (заварка СФС) и температуры активации дрожжей на их подъемную силу проведены лабораторные исследования всех стадий процесса приготовления дрожжевого теста, включая подготовку сырья, замес и брожение теста, порционирование, расстойку и выпечку булочек.

Проведенные исследования позволили выделить контрольные критические точки и на основании полученных результатов внести дополнения в технологический процесс: кислотность теста от 3 до 3,5 град, температура теста от 30 до 32 °С, продолжительность от 120 до 180 мин.

Показатели функционально-технологических свойств основного и дополнительного сырья: мука пшеничная высшего сорта (контрольный образец); СФС (15-20%) вместе с мукой пшеничной высшего сорта для образцов №1-№3, формирующие характеристики теста и готовых булочек на основе модельных рецептов позволили получить изделия требуемого качества (табл. 8).

Таблица 8.

Физико-химические показатели качества муки, опытного дрожжевого теста для булочек и готовых изделий

Table 8. Physicochemical Quality Parameters of Flour, Experimental Yeast Dough for Rolls, and Finished Products

Показатели	1 образец (2 ДС/2)	2 образец (3 ВС/2)	3 образец (1/НС)	Контроль
Сырье:				
Число падения, с	247,5 ± 0,1	172,5 ± 0,12	238,0 ± 0,3	282,0 ± 0,4
Количество клейковины, г	23,5 ± 0,4	23,8 ± 0,1	24,3 ± 0,07	28,0 ± 0,1
Влажность СФС с мукой или муки, %	14,5 ± 0,3	14,6 ± 0,11	14,8 ± 0,1	14,6 ± 0,05
Тесто:				
Температура, °С	30,0 ± 0,1	32,0 ± 0,4	32,0 ± 0,4	32,0 ± 0,1
Влажность теста, %	29,5 ± 0,12	29,6 ± 0,1	33,4 ± 0,21	32,25 ± 0,05
Кислотность, град	3,5 ± 0,4	3,3 ± 0,3	3,5 ± 0,1	3,0 ± 0,1
Подъемная сила по «ша-рику», мин	3,4 ± 0,1	3,8 ± 0,4	2,9 ± 0,4	3,5 ± 0,3
рН	6,43 ± 0,21	6,73 ± 0,1	6,67 ± 0,05	6,10 ± 0,4
Готовые изделия:				
Влажность изделия, %	26,06 ± 0,3	23,43 ± 0,03	21,9 ± 0,1	25,4 ± 0,08
Кислотность, град	2,56 ± 0,1	1,44 ± 0,12	1,20 ± 0,08	1,61 ± 0,1
Формоустойчивость,	0,48 ± 0,1	0,50 ± 0,1	0,47 ± 0,1	0,55 ± 0,1
Удельный объем, %	160 ± 0,4	180 ± 0,1	144 ± 0,8	144-200 ± 0,3

Так как была использована мука с добавкой СФС число падения снизилось по сравнению с контролем. отмечено от 247,5 с; с 238,0 с и до 172,5 соответственно по сравнению с 282,0 с в контроле, что показывает о снижении активности фермента альфа-амилазы в муке. Введение в рецептуру дрожжевого безопарного теста вместо части пшеничной муки СФС привело к изменению влажности. В образцах №2 и №1 от 2,65 до 2,75% соответственно, а в образце №3 – наблюдалось увеличение на 1,15% из-за разного поглощения муки нутриентами рецептуры. Полученные данные необходимо учитывать при расчете жидкости в процессе изготовления бу-

лочек «Триумф». Тепловая обработка тестовых полуфабрикатов приводит к усушке булочек. Наибольшее снижение отмечено в образце №3 – 34,4% что на 13,1% больше, чем в контроле. Можно предположить, что это снижение связано с увеличением продолжительности брожения теста, которое осуществлялось безопасным способом.

Установлено также изменение углеводно-амилазного комплекса за счет интенсивного сбраживания сахаров муки дрожжами теста в первый период брожения. Добавление СФС к массе муки стимулирует спиртовое брожение в тесте. Это связано со скоростью брожения и активностью питательной среды в диапазоне температур 30-32 °С [3; 9; 11].

Рассмотрим влияние отдельных злаковых и бобовых культур, входящих в 1НС, 2ДС-2, 3/ВС-2 сухие функциональные смеси на брожение теста. Например, использование СФС (1НС, 2ДС-2, 3/ВС-2), содержащих чечевичную муку (табл. 1) в концентрации 7,0-26,3%, приводит к увеличению пористости булочек (на 6,1 %) образца №3 по сравнению с образцом №1. Биологическая ценность увеличивается булочек увеличивается в 1,78; 1,74 и 1,87 раз (табл. 9 и рис. 1).

Таблица 9.

Пищевая ценность СФС с чечевичной мукой (ЧМ)
Table 9. Nutritional Value of Dry Functional Mixes with Lentil Flour (LF)

Ингредиенты	Мука с 1/НС		Мука с 2/ДС-2		Мука с 3/ВС-2		Контроль, в 100 г нетто
	7% ЧМ	в 100 г нетто	14% ЧМ	в 100 г нетто	26,3% ЧМ	в 100 г нетто	
Белки, г	0,288	10,926	0,671	11,708	1,262	11,901	10,8
Жиры, г	0,018	1,129	0,042	1,393	0,079	1,432	1,3
Углеводы, г	0,556	65,604	1,295	68,257	2,437	66,132	69,90
Калорийность, ккал	3,5	319	8	333	21,5	342	334
Биологическая ценность	1,440	10,84	3,355	10,789	6,312	11,055	9,707
Итого с ЧМ в СФС, г	7,0	15,0	14,0	15,0	26,3	15,0	0,0

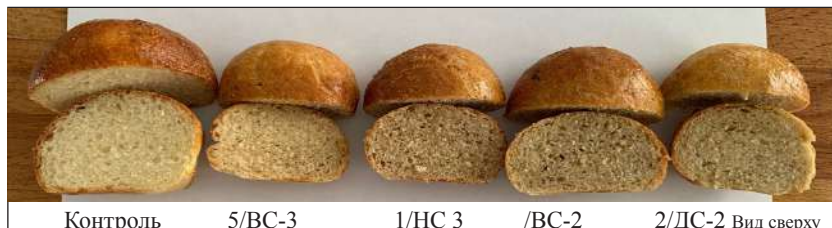


Рис. 1. Органолептические показатели булочек с 20% СФС

Fig. 1. Organoleptic characteristics of rolls containing 20% dry functional mixes

Необходимо отметить, что наряду с чечевичной мукой в смеси 2 ДС/2 присутствует и гречневая мука, имеющая по сравнению с другими злаковыми культурами высокую биологическую ценность усваиваемого белка - 2,416 г по сравнению с мукой перловой - 2,04 г, пшеничной - 1,068 г, полбяной - 2,09 г, пшеничной - 2,33 г [31; 32; 34]. Данные ингредиентного состава рецептур смесей функциональных сухих (3/ВС-2, 2/ДС-2, 1/НС) (табл. 2) показывают высокий уровень усвояемости белка – 94%.

Булочки, приготовленные с использованием СФС с концентрацией чечевичной муки 7, 14 и 26,3%, по органолептическим показателям отличаются более яркой окраской корки от контроля, степень интенсивности которой зависит от концентрации чечевичной муки в рецептуре. Установлено, что СФС, содержащие муку из зернобобового сырья, имеют цвет от песочного до кремового оттенка, поэтому данная цветовая гамма передается выпеченным изделиям, особенно отчетливо это видно у мякиша на рис. 1.

Выводы

1. Анализ литературных источников показывает, что в рецептуру теста на основе пшеничной муки, с частичным ее содержанием, или без этой муки, для формирования удельного объема, структуры (твердости, прочности, упругости) для изготовления хлеба и булочек входит мука из зернобобовых культур, пищевые добавки и различные улучшители. Известны многокомпонентные смеси, состоящие из состоящие из пшеничной муки, рисовой клетчатки, крахмала тапиоки, белка яйца; рисовой муки, рисовой клетчатки, крахмала тапиоки, трегалозы, белка яйца; пшеничной муки, рисовой клетчатки, крахмала тапиоки, трегалозы, соевого масла, белка яйца; рисовой муки и клетчатки, крахмала тапиоки, сахара, трегалозы, соевого масла и белка яйца. В рецептуры вводятся фермента, гидроколлоиды, коллагеновые волокна, растительные масла. Для обогащения хлебобулочных изделий витаминно-минеральным комплексом используются зерновые и масличные культуры, а также продукты переработки фруктов, ягод и орехов, содержащие весь спектр натуральных биологических активных веществ.

2. Решение проблемы пищевой и биологической ценности хлебобулочных изделий выполнено путем внедрения в рецептуру сбалансированных по аминокислотному составу (лизину, триптофану, треонину и метионину) зернобобовых смесей с повышенным содержанием белка: 3/ВС-2, 2/ДС-2 и 1/НС.

3. На основании проведенных исследований рациональной добавкой является смесь 3/ВС-2, содержащая чечевичную муку (26,3%), которая

по сравнению с остальными СФС (2/ДС-2 и 1/НС) имеет более высокие качественные показатели.

4. Образцы булочек, приготовленные с 15% этой СФС к рецептурному количеству муки, немного отличаются от контроля по цвету, имеют мякиш песочный, с мелкими порами. Из всех представленных образцов удельный объем булочек «Триумф» с заменой 15% пшеничной муки на смесь 3/ВС-2, был максимально приближен к контролю – 180%.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Березин, А. А. (2015). Цепочка Гинзбурга — Ландау в описании динамики точной дифференцировки. *Национальная ассоциация ученых, IX(14)*, 94–98. EDN: <https://elibrary.ru/VHXXBJ>
2. Васюкова, А. Т., Мошкин, А. В., Богоносова, И. А., Славянский, А. А., & Охотников, С. И. (2019). Структурно-механические свойства сдобного теста с солодом из зерновых и бобовых культур. *Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки»*, 5(3), 290–298. <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2019-5-3-289-297>. EDN: <https://elibrary.ru/KBANWP>
3. Васюкова, А. Т., Славянский, А. А., Мошкин, А. В., & Новожилов, М. П. (2019). Сенсорный анализ показателей качества хлебобулочных изделий из пшеничной муки с использованием различных солодов. В *Наука и практика — 2019. Всероссийская междисциплинарная научная конференция: материалы* (с. 72–75). ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». EDN: <https://elibrary.ru/PMTSES>
4. Вознюк, Е. В., Иванченко, О. Б., Доморощенкова, М. Л., & Хабибуллин, Р. Э. (2016). Исследование хлебопекарных свойств амарантовой муки. *Вестник Казанского технологического университета*, 19(22), 150–156. EDN: <https://elibrary.ru/XCNBSH>
5. Давыденко, Н. И. (2013). Разработка комплексной добавки для обогащения хлеба селеном и йодом. *Техника и технология пищевых производств*, 9414, 1–6. EDN: <https://elibrary.ru/PWPULB>
6. Дубровская, Н. О., & Нилова, Л. П. (2010). *Современные проблемы пищевой ценности и качества хлебобулочных изделий и возможные пути их решения* [Монография]. Изд-во Мичуринского агроуниверситета. 241 с. ISBN: 978-5-94664-201-9. EDN: <https://elibrary.ru/QNICJV>

7. Дудко, М. А., & Сокол, Н. В. (2015). Технологические особенности сортов пшеницы с высоким содержанием белка. *Евразийский Союз Ученых*, 1–2. EDN: <https://elibrary.ru/XDDZAZ>
8. Жаркова, И. М., Мирошниченко, Л. А., Звягин, А. А., & Бавыкина, И. А. (2014). Амарантовая мука: характеристика, сравнительный анализ, возможности применения. *Вопросы питания*, (1), 67–73. EDN: <https://elibrary.ru/RXDPND>
9. Кушнаренко, А. С., Васюкова, А. Т., Князева, А. С., & Курзова, А. А. (2019). Оценка биологической полноценности разработанных диетических блюд. *Все о мясе*, (6), 32–35. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2019-6-32-35>. EDN: <https://elibrary.ru/PLTQDZ>
10. Лыгденов, Д. В., Жамсаранова, С. Д., Козлова, Т. С., & Сордонова, Е. В. (2018). Разработка рецептуры и оценка потребительских свойств хлеба пшеничного, обогащенного органической формой йода и цинка. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (6), 193–199. EDN: <https://elibrary.ru/YRIYPJ>
11. Мошкин, А. В., Васюкова, А. Т., & Алексеев, А. Е. (2019). Сухие функциональные смеси с плодово-ягодными порошками для дрожжевого теста. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(2), 177–183. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-2-177-183>. EDN: <https://elibrary.ru/ZPPUZR>
12. Науменко, Н. В., & Ашмарина, Е. А. (2018). Влияние сырьевых компонентов на реологические характеристики теста и качество хлебобулочных изделий. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 6(1), 60–68. <https://doi.org/10.14529/food180107>. EDN: <https://elibrary.ru/RJLSTO>
13. Нилова, Л. П., Дубровская, Н. О., & Науменко, Н. В. (2007). Оптимизация качества хлебобулочных изделий, получаемых с использованием нетрадиционного сырья. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент»*, (27), 70–75. EDN: <https://elibrary.ru/KWRCXP>
14. Нилова, Л. П., Науменко, Н. В., & Калинина, И. В. (2011). Инновационный подход к оптимизации качества хлебобулочных изделий с добавленной пищевой ценностью. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*, (18), 183–187. EDN: <https://elibrary.ru/OFAOVP>
15. Васюкова, А. Т., Тихонов, Д. А., Мошкин, А. В., Богоносова, И. А., Портнов, Н. М., & Кулаков, В. Г. (2020). Оптимизация аминокислотного состава комбинированных продуктов для школьного питания. *Вопросы детской диетологии*, 18(5), 54–65. <https://doi.org/10.20953/1727-5784-2020-5-54-65>. EDN: <https://elibrary.ru/OVINQX>

16. Орлова, О. Ю., Пилипенко, Т. В., Нилова, Л. П., & Никулина, М. В. (2015). Традиционные и перспективные растительные источники йода для обогащения пищевых продуктов. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*, (4), 1–9. EDN: <https://elibrary.ru/VCWCBB>
17. Петрик, А. А., Калманович, С. А., Мартовщук, В. И., и др. (2005). Патент № 2259396. Способ предварительной активации прессованных дрожжей. Заявка № 2004107582 от 15.03.2004.
18. Петрик, А. А. (2006). Способ предварительной активации прессованных дрожжей. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, (1), 9. EDN: <https://elibrary.ru/KVJYXH>
19. Питюрина, И. С., Евсенина, М. В., Лупова, Е. И., & Никитов, С. В. (2019). Совершенствование технологии производства пшеничного хлеба функционального назначения. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (5), 182–190. EDN: <https://elibrary.ru/MHQFUF>
20. Сокол, Н. В., Храмова, Н. С., & Гайдукова, О. П. (2011). Нетрадиционное сырье в производстве хлеба функционального назначения. *Хлебопечение России*, (1), 16–18. EDN: <https://elibrary.ru/NDYMGV>
21. Стаценко, Е. С., Литвиненко, О. В., & Корнева, Н. Ю. (2020). Разработка технологии получения обогащенного хлебобулочного изделия. *Достижения науки и техники АПК*, 34(8), 111–114. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10820>. EDN: <https://elibrary.ru/WOVYAR>
22. Теофилактова, О. В., & Пономарев, А. С. (2019). Исследование технологических свойств нетрадиционных видов муки при производстве продукции предприятий общественного питания. *Индустрия питания / Food Industry*, 4(2), 28–33. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2019-4-2-4>. EDN: <https://elibrary.ru/VXREVG>
23. Шмалько, Н. А., Дроздовская, Н. А., Чалова, И. А., & Ромашко, Н. Л. (2009). Перспективы использования амарантовой белковой муки в хлебопечении. *Техника и технология пищевых продуктов*, (1), 1–4. EDN: <https://elibrary.ru/KUFVDP>
24. Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Nutritional value of pseudocereals and their growing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.014>
25. Alvarez-Jubete, L., Auti, M., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2009). Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. *European Food Research and Technology*, <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1184-z>. EDN: <https://elibrary.ru/AGDZIS>
26. Aoki, N. (2018). Sweet potato flour reduces hardness of gluten-free rice bread. *Food Science and Technology Research*, 24, 105–110. <https://doi.org/10.3136/fstr.24.105>

27. Aoki, N., Kataoka, T., & Nishiba, Y. (2020). Crucial role of amylose in improving the quality of gluten-free and additive-free rice bread. *Journal of Cereal Science*, 92, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102905>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQIZFK>
28. Aprodu, I., & Banu, I. (2015). Effect of dietary fiber, water and glucose oxidase on the rheological and baking properties of gluten-free corn-based bread. *Food Science and Biotechnology*, 24, 1301–1307. <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0167-z>. EDN: <https://elibrary.ru/ADSOJE>
29. Baldino, N., Laitano, F., Lupi, F. R., Curcio, S., & Gabriele, D. (2018). Effect of HPMC and CMC on the rheological behavior at different temperatures of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *European Food Research and Technology*, 244, 1829–1842. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3096-2>. EDN: <https://elibrary.ru/BZPOEG>
30. Belorio, M., & Gómez, M. (2020). Effect of hydration on gluten-free bread prepared with hydroxypropyl methylcellulose versus psyllium and xanthan gum. *Foods*, 9, 1548. <https://doi.org/10.3390/foods9111548>. EDN: <https://elibrary.ru/OOKCMM>
31. Borges, V. C., & Salas-Mellado, M. M. (2016). Effect of α -amylase, trehalose, sorbitol and polysorbate 80 on the quality of gluten-free bread. *International Food Research Journal*, 23, 1973–1979.
32. Bravo-Núñez, Á., Sahagún, M., & Gómez, M. (2019). Evaluation of the importance of protein interactions and hydration level in gluten-free protein-enriched breads: a new approach. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 820–828. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02258-2>. EDN: <https://elibrary.ru/MNODLZ>
33. Bravo-Núñez, Á., Sahagún, M., & Gómez, M. (2019). Evaluation of the importance of protein interactions and hydration level in gluten-free protein-enriched breads: a new approach. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 820–828. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02258-2>. EDN: <https://elibrary.ru/MNODLZ>
34. Campuzano, A., Rosell, K. M., & Cornejo, F. (2018). Physicochemical and nutritional characteristics of banana flour during ripening. *Food Chemistry*, 256, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.113>
35. Chakraborty, S. K., Gupta, S., & Kotwaliwale, N. (2016). Quality characteristics of gluten-free breads made from millet-soy flour blends. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 4308–4315. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2429-z>. EDN: <https://elibrary.ru/BSHZOZ>
36. Cai, L., Brennan, K. S., Yang, H., Li, W., & Zhao, H. (2019). Evolution of oxidative and structural characteristics of proteins, especially lipid transfer protein 1 (LTP1), in beer during forced aging. *International Journal of Food Science & Technology*, 54, 3166–3174. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14250>

37. Crockett, R., Ie, P., & Vodovotz, Y. (2011). Effect of soy protein isolate and egg white solids on the physicochemical properties of gluten-free bread. *Food Chemistry*, 129, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.030>
38. Crockett, R., Ie, P., & Vodovotz, Y. (2011). How do xanthan and hydroxypropyl methylcellulose individually affect the physicochemical properties of a model gluten-free dough? *Journal of Food Science*, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02088.x>
39. Da Silva Graça, C., Barbosa, J. B., De Souza, M. Z., Da Silveira Moreira, A., De Mello Luvielmo, M., & De las Mercedes Salas Mellado, M. (2017). Collagen addition to gluten-free rice flour bread. *Brazilian Journal of Food Technology*, 20, e2016105. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.10516>
40. El Dash, A. A. (1978). Standardized mixing and fermentation procedure for an experimental baking test [Quality, Wheat, Flour]. *Cereal Chemistry*, 55, 436–446.
41. Esteller, M. S. (2007). *Structural modifications of bakery products by thermal and biochemical treatment processes (Modificações estruturais de produtos panificados por processos de tratamentos térmico e bioquímico)* [PhD thesis]. Digital Library of Theses and Dissertations, University of São Paulo.
42. Gumul, D., Korus, A., Ziobro, R., Harangozo, L., & Tokár, M. (2017). Physical characteristics and nutritional composition of gluten-free bread with a share of freeze-dried red potatoes. *CyTA — Journal of Food*, 15, 629–638. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1331265>
43. Gutkoski, L. C., & Neto, R. J. (2002). Procedure of bread-baking laboratory tests: Bread shape. *Ciência Rural*, 32, 873–879. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000500021>
44. Han, A., Romero, H. M., Nishijima, N., Ichimura, T., Handa, A., Xu, C., & Zhang, Y. (2019). Effect of egg white solids on the rheological properties and baking performance of gluten-free dough. *Food Hydrocolloids*, 87, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.022>. EDN: <https://elibrary.ru/YKPHNJ>
45. Hernandez-Aguirre, M. A., Islas-Hernandez, J. J., Sanchez-Pardo, M. E., Rodriguez-Ambris, S. L., & Osorio-Diaz, P. (2019). Response surface methodology for the optimization of gluten-free bread made from unripened banana flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 1652–1660. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00082-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FTSGMD>
46. Horstmann, S., Beltz, M., Heitmann, M., Zannini, E., & Arendt, E. (2016). Fundamental study on the impact of gluten-free starches on the quality of gluten-free model breads. *Foods*, 5(2), 30. <https://doi.org/10.3390/foods5020030>
47. Martinez, M. M., & Gomez, M. (2017). Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during fermentation and bread making. *Journal of Food Engineering*, 197, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.11.008>

-
48. Masure, H. G., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2016). Current and forward looking experimental approaches in gluten-free bread making research. *Journal of Cereal Science*, 67, 92–111. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.09.009>
 49. Mezaize, S., Chevallier, S., Le Bail, A., & de Lamballerie, M. (2009). Optimization of gluten-free formulations for French-style breads. *Journal of Food Science*, 74, E140–E146. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01096.x>
 50. Mir, S. A., Shah, M. A., Naik, H. R., & Zargar, I. A. (2016). Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.005>
 51. Nakash, F., Ghani, A. A., Ghani, A. A., & Masoudi, F. A. (2017). Gluten-free baking: Coping with the challenges — a review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.004>
 52. Nishita, K. D., & Bin, M. M. (1979). Physicochemical properties of rice in relation to rice bread. *Cereal Chemistry*, 56, 185–189.
 53. Pico, J., Reguilon, M. P., Bernal, J., & Gomez, M. (2019). Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of gluten-free breads based on rice flour and corn starch. *Journal of Cereal Science*, 86, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.014>
 54. Pico, J., Reguilon, M. P., Bernal, J., & Gomez, M. (2019). Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of gluten-free breads based on rice flour and corn starch. *Journal of Cereal Science*, 86, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.014>
 55. Renzetti, S., Dal Bello, F., & Arendt, E. K. (2008). Microstructure, fundamental rheology and baking performance of doughs and breads made from different gluten-free flours treated with microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 48, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.07.011>
 56. Roman, L., Gomez, M., Hamaker, B. R., & Martinez, M. M. (2019). Banana starch and molecular shear fragmentation significantly increase structure-dependent slowly digestible starch in fully gelatinized bread crumb. *Food Chemistry*, 274, 664–671. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.023>
 57. Sciarini, L. S., Ribotta, D., León, A. E., & Pérez, G. T. (2012). Incorporation of multiple additives into gluten-free bread: Effects on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering*, 111, 590–597. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.011>
 58. Southgate, A. N. N., Scheuer, P. M., Martelli, M. F., Menegon, L., & de Francisco, A. (2017). Quality properties of gluten-free buckwheat bread. *Journal of Culinary Science & Technology*, 15(4), 339–348. <https://doi.org/10.1080/15428052.2017.1289134>

59. Wang, Q., Lu, F., Zhao, L., & Han, S. (2017). Recent developments in gluten-free bread making: A review. *Food Science and Technology*, 37, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.01417>
60. Weber, F. H., Collares-Queiroz, F. P., & Chang, Y. C. (2009). Physicochemical, rheological, morphological and thermal characterization of normal, waxy and high amylose maize starches. *Food Science and Technology*, 29, 748–753. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000400008>
61. Zannini, E., Jones, J. M., Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2012). Functional replacements for gluten. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3, 227–245. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101203>
62. Ziobro, R., Korus, J., Witczak, M., & Juszczak, L. (2012). Effect of modified starches on the properties of gluten-free dough and bread. Part II: Quality and staling of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids*, 29, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.02.009>

References

1. Berezin, A. A. (2015). The Ginzburg–Landau chain in describing the dynamics of cell differentiation. *National Association of Scientists*, IX(14), 94–98. EDN: <https://elibrary.ru/VHXXBJ>
2. Vasyukova, A. T., Moshkin, A. V., Bogonosova, I. A., Slavyansky, A. A., & Okhotnikov, S. I. (2019). Structural and mechanical properties of sweet dough with malt from cereal and legume crops. *Bulletin of the Mari State University. Series: Agricultural Sciences. Economic Sciences*, 5(3), 290–298. <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2019-5-3-289-297>. EDN: <https://elibrary.ru/KBANWP>
3. Vasyukova, A. T., Slavyansky, A. A., Moshkin, A. V., & Novozhilov, M. P. (2019). Sensory analysis of quality indicators of bakery products made from wheat flour using various malts. In *Science and Practice — 2019. All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference: Proceedings* (pp. 72–75). Astrakhan State Technical University. EDN: <https://elibrary.ru/PMTSES>
4. Voznyuk, E. V., Ivanchenko, O. B., Domoroshchenkova, M. L., & Khabibullin, R. E. (2016). Study of the baking properties of amaranth flour. *Bulletin of Kazan Technological University*, 19(22), 150–156. EDN: <https://elibrary.ru/XCNBSH>
5. Davydenko, N. I. (2013). Development of a complex additive for enriching bread with selenium and iodine. *Technique and Technology of Food Production*, 9414, 1–6. EDN: <https://elibrary.ru/PWPULB>
6. Dubrovskaya, N. O., & Nilova, L. P. (2010). *Modern problems of nutritional value and quality of bakery products and possible solutions* [Monograph]. Publishing House of Michurinsk Agricultural University. 241 pp. ISBN: 978-5-94664-201-9. EDN: <https://elibrary.ru/QNICJV>

7. Dudko, M. A., & Sokol, N. V. (2015). Technological features of wheat varieties with high protein content. *Eurasian Union of Scientists*, 1–2. EDN: <https://elibrary.ru/XDDZAZ>
8. Zharkova, I. M., Miroshnichenko, L. A., Zvyagin, A. A., & Bavykina, I. A. (2014). Amaranth flour: Characteristics, comparative analysis, and application possibilities. *Problems of Nutrition*, (1), 67–73. EDN: <https://elibrary.ru/RXDPND>
9. Kushnarenko, A. S., Vasyukova, A. T., Knyazeva, A. S., & Kurzova, A. A. (2019). Assessment of the biological value of developed dietary dishes. *All About Meat*, (6), 32–35. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2019-6-32-35>. EDN: <https://elibrary.ru/PLTQDZ>
10. Lygdenov, D. V., Zhamsaranova, S. D., Kozlova, T. S., & Sordonova, E. V. (2018). Development of the formulation and assessment of consumer properties of wheat bread enriched with the organic form of iodine and zinc. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, (6), 193–199. EDN: <https://elibrary.ru/YRIYPJ>
11. Moshkin, A. V., Vasyukova, A. T., & Alekseev, A. E. (2019). Dry functional mixtures with fruit and berry powders for yeast dough. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 81(2), 177–183. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-2-177-183>. EDN: <https://elibrary.ru/ZPPUZR>
12. Naumenko, N. V., & Ashmarina, E. A. (2018). Influence of raw material components on the rheological characteristics of dough and the quality of bakery products. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 6(1), 60–68. <https://doi.org/10.14529/food180107>. EDN: <https://elibrary.ru/RJLSTO>
13. Nilova, L. P., Dubrovskaya, N. O., & Naumenko, N. V. (2007). Optimization of the quality of bakery products obtained using non-traditional raw materials. *Bulletin of SUSU. Series: Economics and Management*, (27), 70–75. EDN: <https://elibrary.ru/KWRCXP>
14. Nilova, L. P., Naumenko, N. V., & Kalinina, I. V. (2011). An innovative approach to optimizing the quality of bakery products with added nutritional value. *Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and Management*, (18), 183–187. EDN: <https://elibrary.ru/OFAOVP>
15. Vasyukova, A. T., Tikhonov, D. A., Moshkin, A. V., Bogonosova, I. A., Portnov, N. M., & Kulakov, V. G. (2020). Optimization of the amino acid composition of combined products for school nutrition. *Problems of Pediatric Nutrition*, 18(5), 54–65. <https://doi.org/10.20953/1727-5784-2020-5-54-65>. EDN: <https://elibrary.ru/OVIHQX>
16. Orlova, O. Yu., Pilipenko, T. V., Nilova, L. P., & Nikulina, M. V. (2015). Traditional and promising plant sources of iodine for food enrichment. *Scientific Journal of ITMO University. Series: Processes and Equipment for Food Production*, (4), 1–9. EDN: <https://elibrary.ru/VCWCBB>

17. Petrik, A. A., Kalmanovich, S. A., Martovshchuk, V. I., et al. (2005). Patent No. 2259396. Method for preliminary activation of compressed yeast. Application No. 2004107582, filed March 15, 2004.
18. Petrik, A. A. (2006). Method for preliminary activation of compressed yeast. *News of Higher Educational Institutions. Food Technology*, (1), 9. EDN: <https://elibrary.ru/KVJYXH>
19. Pityurina, I. S., Evsenina, M. V., Lupova, E. I., & Nikitov, S. V. (2019). Improving the technology for producing functional wheat bread. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, (5), 182–190. EDN: <https://elibrary.ru/MHQFUF>
20. Sokol, N. V., Khramova, N. S., & Gaidukova, O. P. (2011). Non-traditional raw materials in the production of functional bread. *Bakery of Russia*, (1), 16–18. EDN: <https://elibrary.ru/NDYMGV>
21. Statsenko, E. S., Litvinenko, O. V., & Korneva, N. Yu. (2020). Development of technology for obtaining an enriched bakery product. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 34(8), 111–114. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10820>. EDN: <https://elibrary.ru/WOVYAR>
22. Feofilaktova, O. V., & Ponomarev, A. S. (2019). Study of the technological properties of non-traditional types of flour in the production of public catering products. *Food Industry*, 4(2), 28–33. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2019-4-2-4>. EDN: <https://elibrary.ru/VXREVG>
23. Shmalko, N. A., Drozdovskaya, N. A., Chalova, I. A., & Romashko, N. L. (2009). Prospects for using amaranth protein flour in baking. *Technique and Technology of Food Products*, (1), 1–4. EDN: <https://elibrary.ru/KUFVDP>
24. Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Nutritional value of pseudocereals and their growing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.014>
25. Alvarez-Jubete, L., Auti, M., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2009). Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. *European Food Research and Technology*, <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1184-z>. EDN: <https://elibrary.ru/AGDZIS>
26. Aoki, N. (2018). Sweet potato flour reduces hardness of gluten-free rice bread. *Food Science and Technology Research*, 24, 105–110. <https://doi.org/10.3136/fstr.24.105>
27. Aoki, N., Kataoka, T., & Nishiba, Y. (2020). Crucial role of amylose in improving the quality of gluten-free and additive-free rice bread. *Journal of Cereal Science*, 92, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102905>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQIZFK>
28. Aprodu, I., & Banu, I. (2015). Effect of dietary fiber, water and glucose oxidase on the rheological and baking properties of gluten-free corn-based bread. *Food*

- Science and Biotechnology*, 24, 1301–1307. <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0167-z>. EDN: <https://elibrary.ru/ADSOJE>
29. Baldino, N., Laitano, F., Lupi, F. R., Curcio, S., & Gabriele, D. (2018). Effect of HPMC and CMC on the rheological behavior at different temperatures of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *European Food Research and Technology*, 244, 1829–1842. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3096-2>. EDN: <https://elibrary.ru/BZPOEG>
30. Belorio, M., & Gómez, M. (2020). Effect of hydration on gluten-free bread prepared with hydroxypropyl methylcellulose versus psyllium and xanthan gum. *Foods*, 9, 1548. <https://doi.org/10.3390/foods9111548>. EDN: <https://elibrary.ru/OOKCMM>
31. Borges, V. C., & Salas-Mellado, M. M. (2016). Effect of α -amylase, trehalose, sorbitol and polysorbate 80 on the quality of gluten-free bread. *International Food Research Journal*, 23, 1973–1979.
32. Bravo-Núñez, Á., Sahagún, M., & Gómez, M. (2019). Evaluation of the importance of protein interactions and hydration level in gluten-free protein-enriched breads: a new approach. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 820–828. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02258-2>. EDN: <https://elibrary.ru/MNODLZ>
33. Bravo-Núñez, Á., Sahagún, M., & Gómez, M. (2019). Evaluation of the importance of protein interactions and hydration level in gluten-free protein-enriched breads: a new approach. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 820–828. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02258-2>. EDN: <https://elibrary.ru/MNODLZ>
34. Campuzano, A., Rosell, K. M., & Cornejo, F. (2018). Physicochemical and nutritional characteristics of banana flour during ripening. *Food Chemistry*, 256, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.113>
35. Chakraborty, S. K., Gupta, S., & Kotwaliwale, N. (2016). Quality characteristics of gluten-free breads made from millet-soy flour blends. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 4308–4315. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2429-z>. EDN: <https://elibrary.ru/BSHZOZ>
36. Cai, L., Brennan, K. S., Yang, H., Li, W., & Zhao, H. (2019). Evolution of oxidative and structural characteristics of proteins, especially lipid transfer protein 1 (LTP1), in beer during forced aging. *International Journal of Food Science & Technology*, 54, 3166–3174. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14250>
37. Crockett, R., Ie, P., & Vodovotz, Y. (2011). Effect of soy protein isolate and egg white solids on the physicochemical properties of gluten-free bread. *Food Chemistry*, 129, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.030>
38. Crockett, R., Ie, P., & Vodovotz, Y. (2011). How do xanthan and hydroxypropyl methylcellulose individually affect the physicochemical properties of a model gluten-free dough? *Journal of Food Science*, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02088.x>

39. Da Silva Graça, C., Barbosa, J. B., De Souza, M. Z., Da Silveira Moreira, A., De Mello Luvielmo, M., & De las Mercedes Salas Mellado, M. (2017). Collagen addition to gluten-free rice flour bread. *Brazilian Journal of Food Technology*, 20, e2016105. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.10516>
40. El Dash, A. A. (1978). Standardized mixing and fermentation procedure for an experimental baking test [Quality, Wheat, Flour]. *Cereal Chemistry*, 55, 436–446.
41. Esteller, M. S. (2007). *Structural modifications of bakery products by thermal and biochemical treatment processes (Modificações estruturais de produtos panificados por processos de tratamentos térmico e bioquímico)* [PhD thesis]. Digital Library of Theses and Dissertations, University of São Paulo.
42. Gumul, D., Korus, A., Ziobro, R., Harangozo, L., & Tokár, M. (2017). Physical characteristics and nutritional composition of gluten-free bread with a share of freeze-dried red potatoes. *CyTA — Journal of Food*, 15, 629–638. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1331265>
43. Gutkoski, L. C., & Neto, R. J. (2002). Procedure of bread-baking laboratory tests: Bread shape. *Ciência Rural*, 32, 873–879. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000500021>
44. Han, A., Romero, H. M., Nishijima, N., Ichimura, T., Handa, A., Xu, C., & Zhang, Y. (2019). Effect of egg white solids on the rheological properties and baking performance of gluten-free dough. *Food Hydrocolloids*, 87, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.022>. EDN: <https://elibrary.ru/YKPHNJ>
45. Hernandez-Aguirre, M. A., Islas-Hernandez, J. J., Sanchez-Pardo, M. E., Rodriguez-Ambris, S. L., & Osorio-Diaz, P. (2019). Response surface methodology for the optimization of gluten-free bread made from unripened banana flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 1652–1660. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00082-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FTSGMD>
46. Horstmann, S., Beltz, M., Heitmann, M., Zannini, E., & Arendt, E. (2016). Fundamental study on the impact of gluten-free starches on the quality of gluten-free model breads. *Foods*, 5(2), 30. <https://doi.org/10.3390/foods5020030>
47. Martinez, M. M., & Gomez, M. (2017). Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during fermentation and bread making. *Journal of Food Engineering*, 197, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.11.008>
48. Masure, H. G., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2016). Current and forward looking experimental approaches in gluten-free bread making research. *Journal of Cereal Science*, 67, 92–111. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.09.009>
49. Mezaize, S., Chevallier, S., Le Bail, A., & de Lamballerie, M. (2009). Optimization of gluten-free formulations for French-style breads. *Journal of Food Science*, 74, E140–E146. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01096.x>

50. Mir, S. A., Shah, M. A., Naik, H. R., & Zargar, I. A. (2016). Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.005>
51. Nakash, F., Ghani, A. A., Ghani, A. A., & Masoudi, F. A. (2017). Gluten-free baking: Coping with the challenges — a review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.004>
52. Nishita, K. D., & Bin, M. M. (1979). Physicochemical properties of rice in relation to rice bread. *Cereal Chemistry*, 56, 185–189.
53. Pico, J., Reguilón, M. P., Bernal, J., & Gomez, M. (2019). Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of gluten-free breads based on rice flour and corn starch. *Journal of Cereal Science*, 86, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.014>
54. Pico, J., Reguilón, M. P., Bernal, J., & Gomez, M. (2019). Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of gluten-free breads based on rice flour and corn starch. *Journal of Cereal Science*, 86, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.014>
55. Renzetti, S., Dal Bello, F., & Arendt, E. K. (2008). Microstructure, fundamental rheology and baking performance of doughs and breads made from different gluten-free flours treated with microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 48, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.07.011>
56. Roman, L., Gomez, M., Hamaker, B. R., & Martinez, M. M. (2019). Banana starch and molecular shear fragmentation significantly increase structure-dependent slowly digestible starch in fully gelatinized bread crumb. *Food Chemistry*, 274, 664–671. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.023>
57. Sciarini, L. S., Ribotta, D., León, A. E., & Pérez, G. T. (2012). Incorporation of multiple additives into gluten-free bread: Effects on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering*, 111, 590–597. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.011>
58. Southgate, A. N. N., Scheuer, P. M., Martelli, M. F., Menegon, L., & de Francisco, A. (2017). Quality properties of gluten-free buckwheat bread. *Journal of Culinary Science & Technology*, 15(4), 339–348. <https://doi.org/10.1080/15428052.2017.1289134>
59. Wang, Q., Lu, F., Zhao, L., & Han, S. (2017). Recent developments in gluten-free bread making: A review. *Food Science and Technology*, 37, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.01417>
60. Weber, F. H., Collares-Queiroz, F. P., & Chang, Y. C. (2009). Physicochemical, rheological, morphological and thermal characterization of normal, waxy and high amylose maize starches. *Food Science and Technology*, 29, 748–753. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000400008>

61. Zannini, E., Jones, J. M., Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2012). Functional replacements for gluten. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3, 227–245. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101203>
62. Ziobro, R., Korus, J., Witczak, M., & Juszczak, L. (2012). Effect of modified starches on the properties of gluten-free dough and bread. Part II: Quality and staling of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids*, 29, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.food-hyd.2012.02.009>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Васюкова Анна Тимофеевна, профессор кафедры биотехнологий и продовольственной безопасности
Университет Вернадского
ул. Шоссе Энтузиастов, 50, г. Балашиха, Московская область, 143907,
Российская Федерация
vasyukova-at@yandex.ru

Кусова Ирина Урузмаговна, заведующий кафедрой индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса
Университет РОСБИОТЕХ
Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация
ir.kusowa@yandex.ru

Суворов Олег Александрович, профессор кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса
Университет РОСБИОТЕХ
Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация
ir.kusowa@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna T. Vasyukova, Professor, Department of Biotechnology and Food Security
Vernadsky University
50, Entuziastov Highway, Balashikha, Moscow Region, 143907, Russian Federation
vasyukova-at@yandex.ru
SPIN-code: 2889-1457
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7374-4145>
ResearcherID: AAX-2106-2020
Scopus Author ID: 57215827520

Irina U. Kusova, Head of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service

University ROSBIOTECH

11, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation

ir.kusowa@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8022-7229>

Scopus Author ID: 57191155074

Oleg A. Suvorov, Professor, Head of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service

University ROSBIOTECH

11, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2100-0918>

ResearcherID: W-1014-2017

Scopus Author ID: 23482727600

Поступила 15.04.2026

После рецензирования 02.06.2026

Принята 23.06.2026

Received 15.04.2026

Revised 02.06.2026

Accepted 23.06.2026

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595)EDN: [SXTVKH](https://www.edn.ru/SXTVKH)

УДК 621.444



Повышение эффективности работы газотурбинных двигателей в сфере сельскохозяйственного производства и энергетики

И.А. Иванов, Г.Е. Персиянова*Донской государственный технический университет,**Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Актуальность данной работы заключается в разработке стратегии новой технологии повышения эффективности работы газотурбинных двигателей, которая может быть реализована в различных мощностных агрегатах от микротурбин до силовых энергетических турбин за счет взаимодействия воды и водно-топливной композиции с высокотемпературной поверхностью камеры сгорания. Водотопливная композиция может быть реализована в виде водно-спиртовых растворов и топливоводяных эмульсий. В результате создается возможность использования биотоплива на основе глубокой переработки продукции сельскохозяйственного производства.

Цель – разработка технологии снижения расхода топлива, сокращение вредных выбросов и возможности применения альтернативных видов топлива.

Материалы и методы. В данной статье применен прагматический подход, который является одним из наиболее эффективных при реализации фундаментальных исследований для сложных систем.

Результаты. Разработана и изготовлена опытная установка, которая позволяет создать устойчивое горение вращающегося факела внутри цилиндрического корпуса и устойчивого тонкостенного вращающегося потока жидкости по внутренней поверхности корпуса при воздействии на поток сил: напора, центробежной, трения и направляющей стенки. В результате применения этого процесса в микротурбинных двигателях обеспечивается снижение температуры нагрева корпуса и повышение экономичности за счет совершенствования процесса сгорания и сокращения подачи избыточного воздуха в камеру сгорания. Разработанный процесс позволя-

ет снизить вредные выбросы и диоксид углерода отходящих газов. Изготовленная экспериментальная установка может быть использована как водогрейный котел с прямым контактным теплообменом, например, в строительстве новых объектов, где еще нет центрального теплоснабжения или в объектах сельскохозяйственного производства. В качестве дальнейшей перспективы применения данной работы предлагается использовать результаты для создания отечественных микротурбин, которые широко применяются в автономных источниках энергии в различных сферах деятельности, в частности в качестве приводов дезинтеграторов для увеличения производства растительного и животного белка.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; горение; стратегия; сельскохозяйственное производство; водосодержащая жидкость; дезинтегратор; коэффициент полезного действия; эффективность

Для цитирования. Иванов, И. А., & Персиянова, Г. Е. (2026). Повышение эффективности работы газотурбинных двигателей в сфере сельскохозяйственного производства и энергетики. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 569-584. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595>

Improving the efficiency of gas turbine engines in the field of agricultural production and energy

I.A. Ivanov, G.E. Persiyanova

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Background. The relevance of this work lies in the development of a strategy for a new technology for increasing the efficiency of gas turbine engines, which can be implemented in various power units from microturbines to power power turbines due to the interaction of water and a water-fuel composition with a high-temperature surface of the combustion chamber. The water-fuel composition can be realised in form of water-alcohol solutions and fuel-water emulsions. As a result, it is possible to use biofuels based on deep processing of agricultural products.

The **purpose** is to develop technology to reduce fuel consumption, reduce harmful emissions and the possibility of using alternative fuels.

Materials and methods. This article uses a pragmatic approach, which is one of the most effective in implementing fundamental research for complex systems.

Results. A pilot setup was developed and manufactured that enables stable combustion of a rotating flame inside a cylindrical casing and a stable thin-walled rotating fluid flow along the inner surface of the casing under the influence of pressure, centrif-

ugal force, friction, and a guide wall. Application of this process in microturbine engines reduces the casing heating temperature and increases efficiency by improving the combustion process and reducing the excess air supply to the combustion chamber. The developed process reduces harmful emissions and carbon dioxide from exhaust gases. The manufactured pilot setup can be used as a hot water boiler with direct contact heat exchange, for example, in the construction of new facilities without central heating or in agricultural production facilities. As a further potential application of this work, it is proposed to use the results to create domestically produced microturbines, which are widely used in autonomous power sources in various fields, in particular as drives for disintegrators to increase the production of plant and animal protein.

Keywords: gas turbine engine; gorenje; strategy; agricultural production; water-containing liquid; disintegrator; efficiency factor; efficiency

For citation. Ivanov, I. A., & Persiyanova, G. E. (2026). Improving the efficiency of gas turbine engines in the field of agricultural production and energy. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 569-584. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595>

Введение

В настоящее время наиболее эффективной энергетической установкой, применяемой в различных сферах деятельности [13], является газовая турбина. Мировая тенденция перехода на экологически чистый транспорт требует увеличение электроэнергетической потребности газовых турбин для процесса зарядки аккумуляторных батарей автомобилей с электроприводом [12; 16]. Кроме того, во всех цивилизованных странах резко увеличивается применение микротурбин для использования в различных системах. Особенно в сельскохозяйственном производстве, где автономные энергетические системы могут реализовать тригенерацию энергий: электрической, тепловой и холода для обеспечения технологических процессов. Кроме того, применение микротурбин в качестве приводов дезинтеграторов позволит увеличить производства растительного и животного белка для питания людей и создания кормов для птицеводства и животноводства [4].

В сельскохозяйственном производстве эффективно используются микротурбины в качестве автономного источника энергии [17] для переработки продукции при значительном удалении от централизованных электрических сетей. При этом использовались микротурбинные установки зарубежного производства фирмы «Capstone». Эти установки отработывались в течение длительного периода времени и имеют очень высокие

экономические и экологические показатели. В связи с сокращением импорта образовался острый дефицит микротурбин. В настоящее время несколько фирм в России начали разрабатывать и выпускать аналогичные микротурбины в единичном производстве. Сравнительные характеристики отечественных микротурбин и зарубежных приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики отечественных и зарубежных микротурбин**Table 1. Comparative Characteristics of Domestic and Foreign Microturbines**

Марка микротурбин	Характеристики	
	КПД (%)	NOx при 15% O ₂
Зарубежные микротурбины		
Capstone C200	35	9 ppm по NOx
Turbec	32	15 ppm по NOx
Ingersoll Rand	32	5 ppm по NOx
Отечественные микротурбины		
МТЭУ-30 «Осипович»	26	40 ppm по NOx
Опытные образцы (МГТУ им. Баумана)	25-30	40 ppm по NOx
Серия «ГТА»	до 30	40 ppm по NOx

Данные характеристики показывают, что по основным показателям (электрический КПД и содержание выхлопных газов по NOx) отечественные микротурбины уступают зарубежным.

Проводимые исследования в области энергосбережения нацелены на обеспечение снижения затрат на топливно-энергетические ресурсы во всех сферах деятельности, так как стоимость их постоянно растет, в связи с сокращением добычи на хорошо освоенных месторождениях. Другой глобальной задачей является сокращение выбросов в атмосферу. Предлагаемая стратегия направлена на получение эффективных результатов в обоих направлениях, за счет совершенствования процесса горения и передачи тепла.

В России к этим проблемам добавляется еще, и техническая задача, направленная на необходимость осваивать выпуск газотурбинных двигателей для водного транспорта и газоперекачивающих станций.

Поэтому результаты данной работы могут быть использованы при совершенствовании конструкций новых газовых турбин и модернизации существующих.

В последнее время проводятся большие исследовательские работы по совершенствованию газотурбинных двигателей с целью снижения расхо-

да топлива и вредных выбросов [2; 14; 18-20]. При этом впрыск воды для совершенствования сгорания в газотурбинных двигателях (STIG-процесс) позволил на электростанциях типа «Водолей» повысить коэффициент полезного действия (КПД) на 5,9-13%, а мощность увеличить на $43 \div 130\%$ [5]. Кроме того, были проведены исследования работы авиационного двигателя НК-37 с впрыском водяного пара в камеру сгорания. При этом определены зависимости повышения эффективности от расхода пара [11].

Впрыск воды с топливом в виде водотопливной эмульсии, кроме улучшения смесеобразования, способствует в высокотемпературных локальных зонах реакции прямого взаимодействия паров воды и топлива [21].

Это обусловлено тем, что константа равновесия диссоциации молекул углеводородного топлива газойль составляет $5,24 \cdot 10^5$, воды на $\text{OH} + \text{H}$ $2,16 \cdot 10^{-6}$, на $\text{H}_2 + \text{O}$ - $6,53 \cdot 10^{-6}$, а кислорода O_2 на $\text{O} + \text{O}$ составляет $2,08 \cdot 10^{-10}$. Таким образом вначале будет проходить образование углеводородных радикалов, которые в первую очередь будут взаимодействовать с OH и O воды, а затем уже с O кислорода, так как у воды процесс диссоциации на четыре порядка выше, чем у кислорода.

В газотурбинном двигателе этот же эффект обеспечивает STIG-процесс со снижением расхода топлива, вредных выбросов и диоксида углерода и одновременным охлаждением камеры сгорания, обеспечивающий увеличение срока службы и снижение требования к материалу.

На основе исходных данных автором была поставлена задача: как эффективно реализовать STIG- процесс в газотурбинной установке малой мощности, чтобы получить больший эффект рабочего процесса и одновременно обеспечить снижение требований к материалу камеры сгорания. На основе анализа рабочего процесса в камере сгорания было решено воду подавать на внутренней поверхности камеры сгорания. В этом случае вода выполняет две функции: охлаждает стенку и способствует интенсификации парогазового цикла, но для этого необходимо обеспечить устойчивость пленки воды на поверхности камеры. На основе патентного анализа было найдено подобное решение за счет вращения камеры сгорания [15]. Однако это решение практически трудно реализовать. Анализ аналогичных процессов в других системах показал, что в нагревательной установке чтобы осуществить прямой контактный теплообмен между источником тепла и теплоносителем, жидкий теплоноситель подают сверху в зону нагрева на вращающуюся обечайку и за счет вращения этой обечайки на ее внутренней поверхности формируется тонкопленочный уплотненный жидкостный слой теплоносителя, который под собствен-

ным весом смещается вдоль стенки обечайки сверху вниз и нагревается от источника тепла [3].

Таким образом, по известным данным образование тонкостенного слоя можно реализовать за счет центробежной силы вращения конструкции. Но практически реализовать данный способ очень сложно. Поэтому была поставлена задача: как создать силовое центробежное воздействие без вращения системы.

Материалы и методы

Данная статья посвящена разработке новой стратегии повышения эффективности жизненного цикла газотурбинных двигателей и нагревательных систем за счет оригинального способа подачи воды в камеру сгорания. Для этой цели была реализована центробежная сила путем воздействия формы впускного отверстия и воздействия специальной направляющей стенки, что обеспечило тонкостенный слой на внутренней поверхности цилиндрического корпуса камеры сгорания. В результате происходит одновременное улучшение процесса горения и охлаждения камеры сгорания, что дает возможность сократить количество избыточного воздуха подаваемого в камеру сгорания для его охлаждения [6; 7].

В результате повышается КПД, увеличивается срок службы двигателя и снижается его стоимость. Причем, эффект может быть реализован как в микротурбинах, так и в мощных промышленных турбинах, что способствует снижению стоимости электроэнергии и сокращению вредных выбросов и диоксида углерода в атмосферу. При этом, ставится задача реализовать синергетический эффект взаимодействия, нагретого корпуса камеры сгорания с вихревым потоком водосодержащей жидкости, что обеспечивает снижение расхода топлива за счет повышения КПД при сокращении количества подаваемого воздуха с целью охлаждения и уменьшения вредных выбросов за счет каталитического воздействия паров воды. При высокой температуре эффективность данного процесса повышается. Новизна идеи защищена патентом на изобретение [6].

В настоящее время прагматический подход является одним из наиболее эффективных при реализации фундаментальных исследований для сложных систем, который подразумевает стратегическое сочетание и взаимодействие устоявшихся качественных подходов для достижения целей исследования с использованием индуктивного и дедуктивного процесса.

При этом прагматический подход позволяет анализировать процесс взаимодействия центробежной силы вихревого потока с направляющей

стенкой и процесса взаимодействия водосодержащей жидкости с высокотемпературной нагретой поверхностью в камере сгорания.

Результаты исследования и их обсуждение

Для решения проблемы автором предложена следующая идея. Образование пристеночного слоя осуществить за счет воздействия центробежной силы вихревого потока жидкости на направляющую стенку. Таким образом за счет воздействия направляющей стенки и центробежной силы образуется пристеночный слой, который движется одновременно коаксиально и тангенциально вращаясь в сторону основания нагревательной установки, что обеспечивает прямой контактный теплообмен, со снижением расхода топлива, вредных выбросов. В газотурбинном двигателе эффективность процесса значительно усиливается за счет охлаждения камеры сгорания и каталитических реакций взаимодействием высокотемпературной поверхности камеры сгорания водосодержащей жидкостью, обеспечивающий увеличение срока службы и снижение требования к материалу. Причем, для усиления эффекта, в газотурбинных двигателях в качестве водосодержащей жидкости могут быть использованы кроме просто воды - вода с водно-растворимыми присадками, водно-спиртовой раствор и водно-топливные композиции [8; 15].

Схема процесса горения в камере сгорания газовой турбины представлена на рисунке 1.

Данная установка работает как обычный газотурбинный двигатель, но дополнительно на внутреннюю поверхность подается вода, которая выполняет две функции: с одной стороны, улучшает рабочий процесс [7], а с другой стороны охлаждает стенку камеры сгорания, что позволяет снизить требования к материалу и увеличить срок службы.

Для газотурбинных двигателей, кроме снижения средней температуры цикла, большое значение имеет снижение температуры стенки корпуса камеры сгорания для увеличения срока службы.

Для проверки возможности реализации разработанного эффекта в начале эксперименты были проведены на моделях, а затем создана экспериментальная установка, которая позволила выявить сам эффект создания слоя из водосодержащей жидкости на внутренней цилиндрической поверхности и влияние на этот процесс направляющей стенки. Причем, в модельных испытаниях направляющей стенки не было, но в процессе экспериментальных исследований была выявлена необходимость использования данной направляющей стенки, которая создавала стабилизацию



Рис. 2. Опытная установка для определения эффекта прямого контактного теплообмена между горящим факелом и водой, циркулирующей по внутренней поверхности цилиндра

Fig. 2. Pilot plant for determining the effect of direct contact heat transfer between a burning torch and water circulating along the inner surface of the cylinder



Рис. 3. Внешний вид процесса взаимодействия горящего факела топлива в контакте с потоком жидкости по внутренней поверхности цилиндра (Вид сверху)

Fig. 3. Appearance of the process of interaction of a burning fuel torch in contact with a liquid flow along the inner surface of the cylinder (Top view)

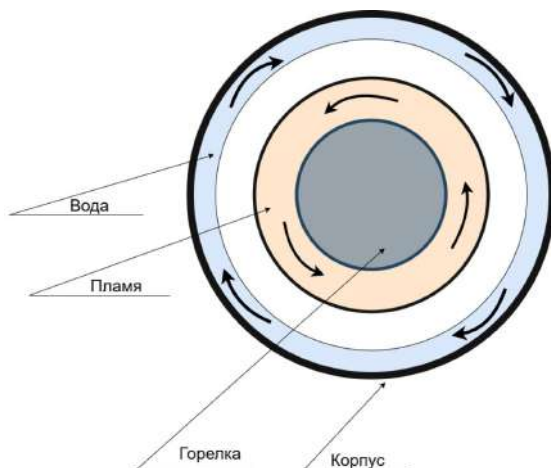


Рис. 4. Схема потоков горящего факела топлива в контакте с потоком жидкости по внутренней поверхности цилиндра согласно рис. 3.

Fig. 4. Flow diagram of a burning fuel torch in contact with a liquid flow along the inner surface of the cylinder according to Fig. 3

Разработчики микротурбин в России и мире практически не публикуют результаты исследований, а по известным публикациям процесс контакта водосодержащей жидкости и пламени в газовой турбине не отработан и не известен.

Заключение

1. Предлагается стратегия новой технологии повышения эффективности работы газотурбинных двигателей, которая может быть реализована в различных мощностных агрегатах от микротурбин до мощных энергетических турбин за счет подачи водосодержащей жидкости на внутреннюю поверхность камеры сгорания с образованием тонкостенного слоя водосодержащей жидкости. В результате снижается потребность избыточного количества воздуха для охлаждения камеры сгорания, что повышает КПД газовой турбины и улучшаются экологические показатели.

2. Проведенные испытания показали, что идея, заложенная в патенте №2663830 F02C3/308 может быть реализована на практике, при мощности горелки 50 кВт.

3. Конструктивные параметры опытной установки позволяют создать устойчивое горение вращающегося факела внутри цилиндрического кор-

пуса и устойчивого тонкостенного вращающегося потока жидкости по внутренней поверхности корпуса при воздействии на поток сил: напора, центробежной, трения и направляющей стенки.

4. Изготовленная экспериментальная установка может быть использована как водогрейный котел с прямым контактным теплообменом, например, в строительстве новых объектов, где еще нет центрального теплоснабжения или в объектах сельскохозяйственного производства.

5. В качестве водосодержащей жидкости могут быть использованы водотопливные композиции, которые позволяют повысить эффективности данного процесса в камере газотурбинного двигателя и снизить вредные выбросы в атмосферу.

6. Предлагаемый способ может быть применен для создания форсажного режима газотурбинных двигателей в процессе аварийных и экстремальных ситуациях [1; 18].

7. В качестве дальнейшей перспективы применения данной работы предлагается использовать результаты для создания отечественных микротурбин, которые широко применяются в автономных источниках энергии в различных сферах деятельности, особенно в сельскохозяйственном производстве путем создания тригенерации: электричества, тепла и холода, что позволит обеспечить эффективность технологических процессов. Для увеличения сферы применения этих турбин автором предложена идея возрождения дезинтеграторной технологии [9; 10] на новом технологическом уровне за счет применения микротурбин в качестве привода роторов дезинтегратора, что дает возможность увеличить производство белка для питания людей и кормовой базы в птицеводстве и животноводстве.

8. Метод повышения эффективности газотурбинного двигателя может применяться в различных сферах сельскохозяйственного производства. В частности, на его основе можно реализовать новый процесс биотехнологии, связанный с получением белка из люпина за счет дезинтеграторной обработки зерна люпина, что даст возможность увеличить производство белка и повысить его качество для питания животных и людей.

Список литературы

1. Агульник, А. Б., Нелюбин, В. Р., Онищик, И. И., Павлов, А. С., & Ярмаш, А. Д. (2018). Использование методов численного моделирования турбулентных течений при разработке форсажных камер сгорания газотурбинного двигателя. *Насосы. Турбины. Системы*, (1), 66–74. EDN: <https://elibrary.ru/XQZBMT>

2. Беседин, С. Н., Рассохин, В. А., Барсков, В. В., & Осипов, А. В. (2017). Создание перспективных малогабаритных газотурбинных установок с независимыми частотами вращения компрессора и турбины. *Вестник Брянского Государственного Технического Университета*, (8), 12–18. https://doi.org/10.12737/article_5a3779fc1eb7c5.51727041. EDN: <https://elibrary.ru/YANHET>
3. Васин, В. В., и др. (2002). Патент РФ № 2178125. F 24 Н 1/16. Способ нагрева жидкого теплоносителя и устройство для его осуществления.
4. Ivanov, I., & Persiyanova, G. (2024). Strategy of increasing protein production based on lupin and nano disintegrator technology. В *BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (AQUACULTURE 2023)* (Vol. 84, p. 01049). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401049>. EDN: <https://elibrary.ru/TEXDXB>
5. Ivanov, I. (2019). The development of a strategy for improving low-power gas turbine engines. *E3S Web of Conferences*, 135, 01089. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501089>. EDN: <https://elibrary.ru/UJACOA>
6. Иванов, И. А. (2018). Патент РФ № 2663830. F02C3/308. Способ работы газотурбинной установки и устройство для его осуществления.
7. Иванов, И. А., Авласенко, И. В., & Гаценко, Е. В. (2018). Перспективы использования воды для процесса горения в тепловых двигателях. *Наукоемкие технологии*, 19(2), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/YWFQOW>
8. Иванов, И. А. (2015). Патент РФ № 2559055. Водно-топливная композиция и способ ее приготовления.
9. Иванов, И. А. (2015). Патент РФ № 2552869. F17D 1/16. Способ транспорта продуктов по трубопроводу и устройство для его осуществления.
10. Ivanov, I., & Avlasenko, I. (2019). Development of a strategy to increase the efficiency of oil transportation through the pipeline. *E3S Web of Conferences*, 135. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501090>. EDN: <https://elibrary.ru/LBATYF>
11. Кудинов, А. А., & Горланов, С. П. (2014). Повышение эффективности газотурбинной установки путем впрыска водяного пара в камеру сгорания двигателя НК-37. *Самарский государственный технический университет*, 4(1), 103–110. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2014.01.18>. EDN: <https://elibrary.ru/SEAUAN>
12. Надареишвили, Г., Костюков, А., & Карпукhin, К. (2019). Особенности конструкции при использовании эффективной микротурбины в качестве двигателя с расширенным диапазоном. *Наука и техника*, 18(6), 447–460. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-6-447-460>. EDN: <https://elibrary.ru/EEFDTF>
13. Ольховский, Г. Г., & Пугач, К. С. (2020). *Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и парогазовых установок в электроэнергетике РФ*. Российская Академия Наук.

14. Pashchenko, D., Mustafin, R., & Karpilov, I. (2022). Thermochemical recuperation by steam methane reforming as an efficient alternative to steam injection in the gas turbines. *Energy*, 258, 124913. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124913>
15. Пустынцев, А. А. (2006). Патент РФ № 2084674. F02K3/38, F02C3/30. Парогазовый реактивный двигатель.
16. Рассохин, А., Забелин, Н. А., & Матвеев, Ю. В. (2011). Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом. *Глобальная энергия*, (4), 41–51.
17. Рыбачук, В. Г. (2020). Актуальность применения микротурбинных установок в качестве автономных источников энергии. *Молодой ученый*, (6), 80–82. <https://moluch.ru/archive/296/67133>. EDN: <https://elibrary.ru/EQIVAV>
18. Görgülü, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Koç, A. (2020). Comprehensive analysis of the effect of water injection on performance and emission parameters of the hydrogen fuelled recuperative and non-recuperative gas turbine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 34254–34267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.038>. EDN: <https://elibrary.ru/HKOCKH>
19. Reale, F., & Sannino, R. (2021). Water and steam injection in micro gas turbine supplied by hydrogen enriched fuels: Numerical investigation and performance analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24366–24381. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.169>
20. Seljak, T., Buffi, M., Valera-Medina, A., Chong, C. T., Chiaramonti, D., & Katrašnik, T. (2020). Bioliquids and their use in power generation — A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109930. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109930>. EDN: <https://elibrary.ru/CAKLWL>
21. Гладков, О. А., Бернштейн, Е. В., & Виноградов, Д. П. (1989). Характер воздействия водотопливной эмульсии на процесс сгорания топлива в дизеле. *Двигателестроение*, (10), 10–12, 33.

References

1. Agulnik, A. B., Nelyubin, V. R., Onishchik, I. I., Pavlov, A. S., & Yarmash, A. D. (2018). The use of numerical simulation methods for turbulent flows in the development of afterburner combustion chambers for a gas turbine engine. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, (1), 66–74. EDN: <https://elibrary.ru/XQZBMT>
2. Besedin, S. N., Rassokhin, V. A., Barskov, V. V., & Osipov, A. V. (2017). Development of promising small-sized gas turbine units with independent rotational speeds of the compressor and turbine. *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, (8), 12–18. https://doi.org/10.12737/article_5a3779fc1e-b7c5.51727041. EDN: <https://elibrary.ru/YAHHET>

3. Vasin, V. V., et al. (2002). Russian Federation Patent No. 2178125. F 24 H 1/16. Method for heating a liquid heat carrier and a device for its implementation.
4. Ivanov, I., & Persyanova, G. (2024). Strategy of increasing protein production based on lupin and nano disintegrator technology. In *BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Development and Modern Problems of Aquaculture" (AQUACULTURE 2023)* (Vol. 84, p. 01049). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401049>. EDN: <https://elibrary.ru/TEXDXB>
5. Ivanov, I. (2019). The development of a strategy for improving low-power gas turbine engines. *E3S Web of Conferences*, 135, 01089. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/201913501089>. EDN: <https://elibrary.ru/UJACOA>
6. Ivanov, I. A. (2018). Russian Federation Patent No. 2663830. F02C3/308. Method of operation of a gas turbine unit and a device for its implementation.
7. Ivanov, I. A., Avlasenko, I. V., & Gatsenko, E. V. (2018). Prospects for using water in the combustion process in thermal engines. *Naukoemkie Tekhnologii*, 19(2), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/YWFQOW>
8. Ivanov, I. A. (2015). Russian Federation Patent No. 2559055. Water-fuel composition and method of its preparation.
9. Ivanov, I. A. (2015). Russian Federation Patent No. 2552869. F17D 1/16. Method for transporting products through a pipeline and a device for its implementation.
10. Ivanov, I., & Avlasenko, I. (2019). Development of a strategy to increase the efficiency of oil transportation through the pipeline. *E3S Web of Conferences*, 135. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501090>. EDN: <https://elibrary.ru/LBATYF>
11. Kudinov, A. A., & Gorlanov, S. P. (2014). Improving the efficiency of a gas turbine unit by injecting water vapor into the combustion chamber of the NK-37 engine. *Samara State Technical University*, 4(1), 103–110. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2014.01.18>. EDN: <https://elibrary.ru/SEAUAH>
12. Nadareishvili, G., Kostyukov, A., & Karpukhin, K. (2019). Design features when using an efficient microturbine as an engine with an extended range. *Nauka i tekhnika*, 18(6), 447–460. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-6-447-460>. EDN: <https://elibrary.ru/EEFDTF>
13. Olkhovsky, G. G., & Pugach, K. S. (2020). *Scientific and technical problems of the widespread use of gas turbine and combined cycle plants in the power industry of the Russian Federation*. Russian Academy of Sciences.
14. Pashchenko, D., Mustafin, R., & Karpilov, I. (2022). Thermochemical recuperation by steam methane reforming as an efficient alternative to steam injection in the gas turbines. *Energy*, 258, 124913. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124913>
15. Pustyntsev, A. A. (2006). Russian Federation Patent No. 2084674. F02K3/38, F02C3/30. Combined-cycle jet engine.

16. Rassokhin, A., Zabelin, N. A., & Matveev, Y. V. (2011). Main directions of development of microturbine technologies in Russia and abroad. *Global Energy*, (4), 41–51.
17. Rybachuk, V. G. (2020). The relevance of using microturbine units as autonomous energy sources. *Molodoy Uchenyy*, (6), 80–82. <https://moluch.ru/archive/296/67133>. EDN: <https://elibrary.ru/EQIVAV>
18. Görgülü, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Koç, A. (2020). Comprehensive analysis of the effect of water injection on performance and emission parameters of the hydrogen fuelled recuperative and non-recuperative gas turbine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 34254–34267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.038>. EDN: <https://elibrary.ru/HKOCKH>
19. Reale, F., & Sannino, R. (2021). Water and steam injection in micro gas turbine supplied by hydrogen enriched fuels: Numerical investigation and performance analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24366–24381. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.169>
20. Seljak, T., Buffi, M., Valera-Medina, A., Chong, C. T., Chiaramonti, D., & Katrašnik, T. (2020). Bioliquids and their use in power generation — A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109930. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109930>. EDN: <https://elibrary.ru/CAKLWL>
21. Gladkov, O. A., Bernshtein, E. V., & Vinogradov, D. P. (1989). The effect of a water-fuel emulsion on the fuel combustion process in a diesel engine. *Dvigatelsestroyeniye*, (10), 10–12, 33.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Иванов Игорь Алексеевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Менеджмент и бизнес-технологии»

Донской государственный технический университет

пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Российская Федерация

igoriv740@yandex.ru

Персиянова Галина Евгеньевна, ведущий инженер кафедры «Менеджмент и бизнес-технологии»

Донской государственный технический университет

пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Российская Федерация

persyanova.galina@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Igor A. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor in the Department of Management and Business Technologies

Don State Technical University

1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

igoriv740@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2723-0626>

Galina E. Persiyanova, Lead Engineer, Department of Management and Business Technologies

Don State Technical University

1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

persiyanova.galina@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3901-0332>

Поступила 10.01.2026

После рецензирования 02.04.2026

Принята 21.04.2026

Received 10.01.2026

Revised 02.04.2026

Accepted 21.04.2026

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1558](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1558)EDN: [UFLWVY](https://www.edn.ru/UFLWVY)

УДК 637.138



Определение влияния инновационного высокоэнергетического молокосодержащего продукта на живой организм в эксперименте

Е.А. Зубарева, И.А. Ивкова, А.А. Екимова,
А.Ю. Надточий, А.С. Пиляева

ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В настоящее время нет единого мнения о целесообразности полной замены молочного жира в молокосодержащих продуктах растительным. Некоторые ученые считают, что они вредны для организма, но также есть исследования, описывающие их положительное влияние. Данная статья является очередным вкладом в результаты исследований о влиянии высокоэнергетического молокосодержащего продукта на живой организм с точки зрения не только полезных свойств продукта, но и влияния на организм животного. Для повышения полезных свойств высокоэнергетического молокосодержащего продукта нами проведены исследования для разработки рецептуры и использования добавок для повышения его полезных свойств и увеличения срока годности.

Цель – определить влияние разработанного нами сухого сливочно-растительного спреда на живой организм.

Материалы и методы. В состав используемого для опытной группы продукта входили: пастеризованные сливки жирностью 33 %, заменитель молочного жира «ЭКОЛАКТ в количестве 30% от общего жиросодержания, дигидрокверцетин 0,02%, витамина «С» 0,02%, и живая бактериальная пробиотическая культура (концентрированная закваска, в состав которой входят *Lactococcus lactis subsp. lactis*, *Lactococcus lactis subsp. cremoris*, *Lactococcus lactis subsp. diacetylactis*). Далее проводилась гомогенизация для обеспечения однородной консистенции и равномерного распределения частиц жира. Завершающий этап приготовления – сублимационная сушка, как метод удаления лишней влаги при сохранении полезных свойств продукта.

Исследования проводились на 30 клинически здоровых белых лабораторных крысах (15 самцов и 15 самок) двух опытной и контрольной группы в возрасте 30 дней к началу эксперимента. Крысы содержались с виварии Омского ГАУ в течение 6 недель

с соблюдением всех зоогигиенических условий. Для определения влияния продукта на организм животного использовались методы общего и биохимического исследования крови, патологоанатомическое вскрытие, гистологическое исследование печени и почек, контроль массы тела и общей активности животных. Для кормления применялась стандартная (промышленно выпускаемая) кормовая смесь для грызунов, в которую добавлялся высокожирный молокосодержащий продукт в количестве 5% от общей массы (755 ккал/кг). Скармливание смеси проводили один раз в сутки.

Результаты. Выполнен анализ нового высокоэнергетического молокосодержащего продукта в сравнении с его аналогом - сливочно-растительным спредом, а именно по пищевой ценности, составу, безопасности и его влиянию на живой организм. В результате чего было обнаружено, что разработанный нами продукт обладает высокой пищевой и биологической ценностью. По воздействию на организм при его скармливании продукт не вызвал значительных изменений со стороны крови, но по результатам гистологических исследований у опытной группы были обнаружены в печени и почках признаки зернистой жировой дистрофии. По данным патологоанатомического вскрытия у опытной группы наблюдалось наибольшее содержание внутрибрюшного жира, таким образом можно сделать вывод, что наличие в составе компонентов, снижающих окисление жира в продукте, не снижает его отрицательного воздействия на углеводных и жировой обмен.

Ключевые слова: сливочно-растительный спред; молочный жир; заменители молочного жира; полиненасыщенные жирные кислоты; высокожирная смесь; жировая дистрофия; высокоэнергетическое питание

Для цитирования. Зубарева, Е. А., Ивкова, И. А., Екимова, А. А., Надточий, А. Ю., & Пиляева, А. С. (2026). Определение влияния инновационного высокоэнергетического молокосодержащего продукта на живой организм в эксперименте. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 585-606. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1558>

Determining the effects of an innovative, high-energy, milk-based product on a living organism in an experiment

**E.A. Zubareva, I.A. Ivkova, A.A. Ekimova,
A.Y. Nadtochiy, A.S. Pilyaeva**

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russian Federation

Abstract

Background. There is no consensus on the expediency of completely replacing milk fat in dairy products with vegetable fat. Some researchers suppose that they are not so good for the organism, but there are also studies describing their positive effects. This

article is another contribution to the results of research on the effect of a high-energy milk-containing product on a living organism in terms of not only the beneficial properties of the product as well, but also its effect on the animal's body. We have conducted study to develop a formulation and use additives to enhance its beneficial properties and extend shelf life to enhance the beneficial properties of a high-energy milk-containing product with the minimum risks for the health.

Purpose. Study the effect of the dry creamy vegetable spread developed by us on a living organism of laboratory rats.

Materials and methods. The composition of the product used for the experimental group included: pasteurized cream with a fat content of 33%, milk fat substitute "ECO-LACT" in an amount of 30% of the total fat content, dihydroquercetin 0.02%, vitamin C 0.02%, and a live bacterial probiotic culture (concentrated starter culture, in which includes *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Lactococcus lactis* subsp. *hemogis*, *Lactococcus lactis* subsp. *diacetylactis*). The homogenization was carried out to ensure a uniform consistency and uniform distribution of fat particles. The final stage of cooking is freeze drying, as a method of removing excess moisture while preserving the beneficial properties of the product.

The study was conducted on 30 clinically healthy white laboratory rats (15 males and 15 females) of two experimental and one control groups at the age of 30 days by the beginning of the experiment. The rats were kept from the vivarium of the Omsk State Agrarian University for 6 weeks in compliance with all zoohygienic conditions. There were used some blood tests to determine physiological and biochemical states, pathoanatomic autopsy, histological examination of the samples of liver and kidneys. A standard rodent feed mixture was used for feeding the experimental animals, to which a high-fat milk-containing product was added in an amount of 5% of the total weight (755 kcal/kg).

Results. An analysis of a new high-energy milk-containing product in comparison with its analogue, a creamy vegetable spread, was performed, namely in terms of nutritional value, composition, safety and its effect on a living organism. As a result, it was found that the product we developed has high nutritional and biological value. According to the effect on the body during feeding, the product did not cause significant changes in the blood, but according to the results of histological studies, signs of granular fatty degeneration were found in the liver and kidneys of the experimental group. According to the autopsy data, the experimental group had the highest content of intra-abdominal fat, so it can be concluded that the presence of components in the composition that reduce the oxidation of fat in the product does not reduce its negative effects on carbohydrate and fat metabolism.

Keywords: creamy vegetable spread; milk fat; milk fat substitutes; polyunsaturated fatty acids; high-fat mixture; fatty degeneration; high-energy nutrition

For citation. Zubareva, E. A., Ivkova, I. A., Ekimova, A. A., Nadtochiy, A. Y., & Pilyaeva, A. S. (2026). Determining the effects of an innovative, high-energy, milk-based product on a living organism in an experiment. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 585-606. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1558>

Введение

Как человек, так и животные могут подвергаться высоким физическим и/или психоэмоциональным нагрузкам. Полноценное и здоровое питание помогает снизить последствия стресса и повысить адаптационные возможности человека и животного [4; 6]. Исключительные особенности сухих продуктов на молочной основе (удлиненный срок годности, удобства хранения и транспортировки, пищевая полноценность, потребительская популярность, многофункциональность и другие) дает возможность в перспективе занять одно из ведущих мест продуктов для здоровья организма [5; 6].

Сухая высокоэнергетичная молокосодержащая продукция имеет преимущество перед обычными молочными продуктами, такими как малый вес и объем, легкая транспортировка и хранение [1; 4; 6; 8]. Также сухие молокосодержащие продукты не имеют в своем составе влаги, поэтому на них меньше воздействуют микробиологические загрязнения [9; 12]. Данные продукты в высокой степени востребованы при отсутствии свежего молока, особенно там, где трудно обеспечить сохранность молока. Сухие молокосодержащие продукты часто используют в кондитерских и хлебопекарных производствах, а также при производстве спортивного и детского питания [6; 9; 16]. Производство сливочно-растительного спреда основано на частичном замещении насыщенных жиров животного происхождения ненасыщенными растительными маслами. Этот процесс также предусматривает добавление натуральных антиоксидантов и увеличение пищевой ценности продукта за счет обогащения полезными компонентами [6].

Целью настоящего исследования явилось определение пищевой и биологической ценности инновационного сухого сливочно-растительного продукта (спреда) и его влияние на живой организм.

Задачи исследования: провести определение пищевой и биологической ценности разработанного нами сухого сливочно-растительного спреда; провести мониторинг динамики живой массы крыс, провести анализ результатов общего и биохимического исследования крови опытной и контрольной групп крыс; сравнить результаты патологоанатомического вскрытия и результаты гистологического исследования печени и почек особей опытной и контрольной групп.

Материалы и методы

Исследования проводились на базе кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы и гигиены сельскохозяйственных животных совместно с кафедрой анатомии, гистологии, физиологии и патологической анатомии ФГБОУ ВО Омский ГАУ.

Способ производства сухого молокосодержащего продукта для контрольной группы включал в себя пастеризацию молока, его сгущение, гомогенизацию, внесение антиокислителя молочного жира, сушку, перед пастеризацией вносился заменитель молочного жира «Эколакт» в количестве 15-25%, в качестве антиокислителя молочного жира использовался спиртовой раствор дигидрокверцетина в количестве 0,01-0,03%, сушку осуществляли сублимационным способом. Недостатками данного продукта являются низкая пищевая и биологическая ценность, низкие органолептические показатели, отсутствие функциональных свойств.

Для производства высокожирного молокосодержащего продукта для опытной группы были использованы следующие компоненты: пастеризованные сливки жирностью 33%, заменитель молочного жира «Эколакт» (с оптимальным составом жирных кислот $\omega 3$ и $\omega 6$, 30% от жиросодержания), дигидрокверцетин (ДКВ) 0,02%, аскорбиновая кислота (витамин «С») 0,02% и концентрированная закваска, состоящая из *Lactococcus lactis subsp. lactis*, *Lactococcus lactis subsp. cremoris*, *Lactococcus lactis subsp. diacetylactis*. Лишняя влага была удалена с помощью сублимационной сушки с сохранением полезных веществ в продукте. Сублимационная сушка проходила в сублиматоре при давлении 4 миллиторра, температуре -30° , конечное влагосодержание в продукте не более 4 % [8]. Спред был получен в экспериментальных условиях Федерального исследовательского центра фундаментальной и трансляционной медицины (г. Новосибирск).

Для изучения влияния продукта на живой организм были использованы 30 клинически здоровых лабораторных крыс (15 самок и 15 самцов). Были сформированы три группы: две опытные и одна контрольная. Возраст крыс в начале исследования - 30 дней. Кормление крыс с использованием разработанного продукта (как добавки в основной рацион) проводилось в течение 42 дней.

После прохождения адаптации в течение 5-ти суток крыс распределили по трем группам, по 10 голов в каждой группе.

1-я группа (5 самок и 5 самцов) – опытная №1, в рацион питания вводился сухой молокосодержащий спред (растительно-сливочный спред в сухой форме) с содержанием жира 80 %.

2-я группа (5 самок и 5 самцов) – опытная №2, в рацион питания вводился сухой сливочно-растительный спред (85% жира).

3-я группа (5 самок и 5 самцов) - контрольная (К), кормление без добавок жиродержащего продукта.

Добавка высокожирной смеси скармливалась индивидуально каждой крысе при кормлении стандартным полнорационным комбикормом для грызунов «Little Shark» (производство Россия). Доза скармливания на одно животное – 50 г в сутки. Воду для поения животные получали в свободном доступе.

Обеспечение животных всем необходимым, включая кормление, содержание и уход, а также проведение процедур и завершение эксперимента, проводилось с соблюдением Приказа Минздрава РФ № 199н, от 1 апреля 2016 года и директива 2010/63/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского Союза от 22 сентября 2010 года, регламентирующая защиту лабораторных крыс.

Анализ пищевой ценности продукта и анализ крови лабораторных животных проведены в аккредитованной лаборатории бюджетного учреждения Омской области «Омская областная ветеринарная лаборатория», при этом использовали стандартные общепринятые методы в трехкратном повторении. Гистологические исследования проводились на базе гистологической лаборатории Омского областного онкологического диспансера (г. Омск). Вскрытие и оформление протоколов вскрытия проводились в секционном зале кафедры анатомии, гистологии, физиологии и патологической анатомии ФГБОУ ВО Омский ГАУ.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы Statistica v. 12 (Stat Soft). Оценку статистической значимости показателей и различий между исследуемыми группами проводили с учетом критерия Стьюдента при уровне значений $P \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

При изготовлении продукта были использованы антиоксидантные комплексы, которые защищают продукты от порчи, вызываемой свободными радикалами [5]. Среди них наиболее эффективным является антиокислительный комплекс, состоящий из двух ингибиторов окислительных процессов: ДКВ в концентрации 0,02 % к жирилограммам продукта и аскорбиновая кислота в концентрации 0,02% к жирилограммам продукта.

Качество полученного нами продукта и возможные сроки его хранения были оценены по критериям анализа пищевой ценности сухого сливочно-растительного спреда [7] (табл. 1).

Таблица 1.

**Пищевая ценность растительно-сливочного (№1)
и сливочно-растительного спреда (№2) в сухой форме**

**Table 1. Nutritional Value of the Vegetable-Cream Spread (No. 1)
and Cream-Vegetable Spread (No. 2) in Dry Form**

Компонент	№1	№2
Жиросодержание продукта	85,0 ±1,0	80,0 ±1,0
Белков, г в 100г/пр.	5,04±0,5	2,79±0,5
Углеводы, г в 100г/пр.	13,6±0,5	11,2±0,5
Ретинол	1,8±1,0	1,5±1,0
Кальциферол	0,06±0,04	0,09±0,04
Токоферол	7,03±0,12	6,02±0,12
Аскорбиновая кислота	18,5±0,72	19,4±0,72
Энергетическая ценность, кДЖ	810±0,02	809±0,02

В таблице 2 приведен состав жирных кислот в исследуемых продуктах.

Таблица 2.

**Состав жирных кислот сухого сливочно-растительного
и сливочно-растительного спредов, %**

Table 2. Fatty acid composition of dry cream-vegetable and cream-vegetable spreads, %

№ п/п	Показатель	Сухой молокосодержащий спред или растительно-сливочный спред (опыт №1)	Сливочно-растительный спред (опыт №2)
1.	Арахидовая кислота	0,2	0,3
2.	Бегеновая кислота	менее <0,15	менее <0,13
3.	Деценовая кислота	0,31	0,32
4.	Каприловая кислота	1,23 ± 0,4	1,21 ± 0,4
5.	Каприновая кислота	1,90 ± 0,4	2,52 ± 0,4
6.	Капроновая кислота	1,91 ± 0,4	1,89 ± 0,4
7.	Лауриновая кислота	3,2 ± 0,4	4,22 ± 0,4
8.	Линолевая кислота	3,3± 0,4	10,4± 0,4
9.	Линоленовая кислота	0,42	0,3
10.	Масляная кислота	2,70 ± 0,4	2,61 ± 0,4
11.	Миристиновая кислота	10,80 ± 2,2	6,5 ± 2,2
12.	Миристолеиновая кислота	0,92 ± 0,4	0,77 ± 0,4
13.	Олеиновая кислота	25,8 ± 2,2	34,2 ± 2,2
14.	Пальмитиновая кислота	29,91 ± 2,2	35,9 ± 2,2
15.	Пальмитолеиновая кислота	1,7 ± 0,4	0,7 ± 0,4
16.	Стеариновая кислота	11,01 ± 2,2	3,5 ± 2,2
17.	Прочие кислоты	3,9 ± 0,4	1,6 ± 0,4

В результате анализа выявлено, что в разрабатываемых продуктах №1 и №2 присутствует значительное количество ненасыщенных жирных кислот (ННЖК), характеризующихся наличием двойных связей. В частности, были обнаружены в большем количестве каприновая, олеиновая, пальмитиновая линолевая и лауриновая кислоты. Жирнокислотный состав, полученного сливочно-растительного спреда, незначительно отличается по жирнокислотному составу от молочного жира коровьего молока и максимально приближен к нему по пищевой ценности.

Результаты по безопасности нового продукта приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Оценка безопасности растительно-сливочного спреда
Table 3. Safety Assessment of a Plant-Based and Cream-Based Spread

№ п/п	Показатель	Содержание
1.	левомецетин	менее 0,000013 мг/кг
2.	кадмий	менее 0,0016мг/кг
3.	мышьяк	менее 0,03 мг/кг
4.	ртуть	менее 0,005 мг/кг
5.	свинец	менее 0,01 мг/кг
6.	афлатоксины	менее 0,0006 мг/кг
7.	ГХЦГ	менее 0,007 мг/кг
8.	ДДТ	менее 0,003 мг/кг
9.	S. aureus	не обнаружено
10.	БГКП	не обнаружено;
11.	дрожжи	менее $1,0 \cdot 10^{-1}$ КОЕ/см ³
12.	КМАФАнМ	$3,4 \cdot 10^{-1}$ КОЕ/г
15.	патогенные микроорганизмы	не обнаружены в 25 г

Содержание левомецетина, антибактериального вещества, в анализируемом образце не превышает 0,000013 мг/кг. Это значение находится в пределах нормы, установленной на уровне «менее 0,0003 мг/кг». Помимо антибиотиков, в продукте не обнаружены потенциально опасные соединения, таких как микотоксины и пестициды. Концентрация токсичных веществ не выходит за границы установленных нормативов [7].

Добавление в кормление опытным группам продукта с высоким содержанием жиров и молочных компонентов не оказало заметного влияния на общее состояние организма. Также не было зафиксировано изменений в объеме потребляемой корма и воды.

В результате анализа крови выявлено, что у опытных групп повысился уровень гемоглобина по сравнению с контрольной группой – на 12,5-15,3%, холестерин ниже на 18,9-21,1%, триглицериды ниже на 57,4-65%, также наблюдается незначительное повышение уровня глюкозы (на 44-49%) (табл. 4). Данные изменения связаны с тем, что повышение содержания жиров в корме приводит к изменению жирового и углеводного обменов в организме [2; 3].

Таблица 4.

Результаты общего и биохимического анализа крови лабораторных крыс**Table 4. Results of general and biochemical blood tests in laboratory rats**

№ п/п	Показатели	Ед.изм.	Группы животных		
			Контроль- ная (n=10)	Опытная №1 (n=10)	Опытная №2 (n=10)
1	Лейкоциты	тыс/мкл	4,0±0,1	3,16±0,21	4,68±5,29
2	Эритроциты	млн/мкл	6,0±0,8	5,85±0,84	6,07±2,36
3	Гемоглобин	г/л	120±31,3	135,8±102,8	138,4±43,20
4	Среднее содержание гемоглобина	пг	18,28±8,13	18,96±13,8	18,31±7,58
5	Ширина распределе- ния тромбоцитов	фл	12,71±4,22	13,48±6,85	12,91±5,32
6	Общий белок	г/л	58,0±23,15	58,55±9,40	58,38±41,19
7	Холестерин	ммоль/л	1,8±0,06	1,42±0,03	1,46±0,26
8	Триглицериды	ммоль/л	0,94±0,03	0,40±0,05	0,33±0,02
9	Глюкоза	ммоль/л	4,3±0,15	6,43±2,97	6,16±0,64

* достоверное отличие от 1-й группы (P<0,05), # - достоверное отличие от 2-й группы.

Показатели липидного обмена в крови крыс ниже, чем у человека, так как у крыс вырабатывается желчная кислота (α и β -мурихолевая кислота). Данные кислоты участвуют в механизмах защиты гепатоцитов от повреждения и в процессах быстрого выведения холестерина из организма, что препятствует образованию бляшек в сосудах [3; 10; 13; 15].

Для оценки влияния продукта на организм также проводилось патологоанатомическое вскрытие и гистологическое исследование образцов печени и почек крыс. Гистологическая картина изменений в печени крыс у опытной группы №1 представлена на рисунке 3.

Ткань печени крыс опытной группы №1 с сохранной гистоархитектоникой. Центральные вены печёночных долек незначительно расширены, полнокровны. Артерии в портальных трактах незначительно расширены, также полнокровны. Гепатоциты без видимых изменений.

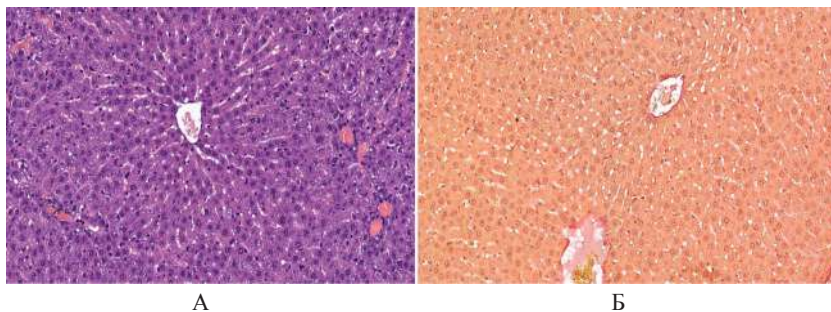


Рис. 3. Гистологическая картина печени опытной группы №1
(А – окраска гематоксилин-эозином; Б – окраска Ван-Гизон), увел. x 40

Fig. 3. Histological findings in the liver of experimental group No. 1
(A – hematoxylin-eosin stain; Б – Van Gieson stain), magnification ×40

Гистологическая картина изменений в печени крыс у опытной группы №2 представлена на рисунке 4.

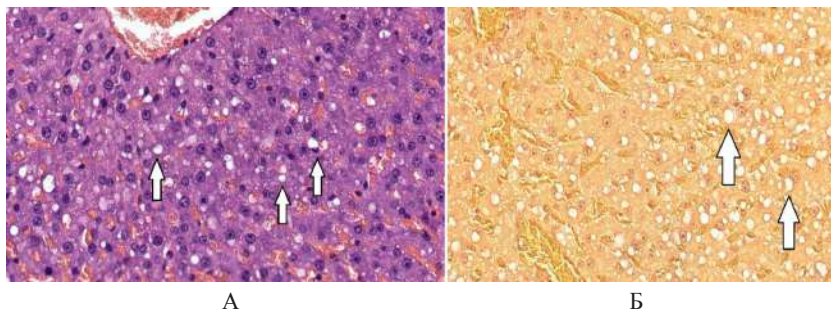


Рис. 4. Гистологическая картина печени
(А – окраска гематоксилин-эозином; Б – окраска Ван-Гизон), увел. x 40. Стрелками обозначены некоторые из включений – жировые капли (жировой гепатоз)
Fig. 4. Histological appearance of the liver (A – hematoxylin-eosin stain; Б – Van Gieson stain), magnification ×40. The arrows indicate some of the inclusions—fat droplets (fatty hepatosis)

В гистопрепаратах печени крыс опытной группы №2 отмечается расширение центральных вен, крупнокапельная и мелкокапельная жировая дистрофия гепатоцитов (оптически пустые капли разного размера в цитоплазме) преимущественно в центральной зоне долек. Портальные тракты без особенностей. Капсула печени без особенностей.

Гистологическая картина изменений в печени крыс у контрольной группы представлена на рисунке 5.

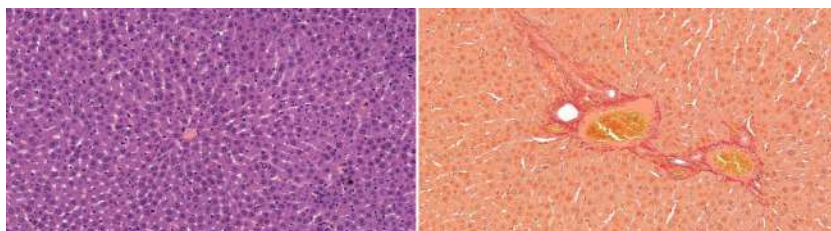


Рис. 5. Гистологическая картина печени контрольной группы крыс (А – окраска гематоксилин-эозином; Б – окраска Ван-Гизон), увел. x 20

Fig. 5. Histological findings in the livers of the control group of rats (A – hematoxylin-eosin staining; Б – Van Gieson staining), magnification $\times 20$

Гистологическая картина изменений в почках крыс у опытной группы №1 представлена на рисунке 6.

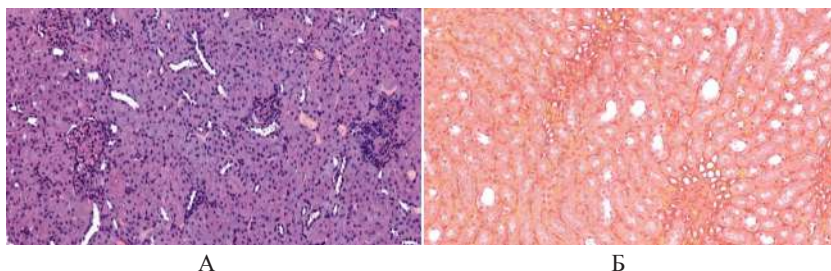


Рис. 6. Гистологическая картина почек опытной группы крыс №1 (А – окраска гематоксилин-эозином; Б – окраска Ван-Гизон), увел. x 10

Fig. 6. Histological findings in the kidneys of experimental group No. 1 of rats (A – hematoxylin-eosin staining; Б – Van Gieson staining), magnification $\times 10$

В препаратах почек крыс опытной группы №1 отмечаются очаговое увеличение размера клубочков в корковом слое. В клетках канальцев небольшое количество мелких ярко-эозинофильных гранул в цитоплазме – явления зернистой дистрофии. Собирательные трубочки без особенностей. Стенка почечной лоханки без особенностей. Сосуды стромы без особенностей.

Гистологическая картина изменений в почках крыс у опытной группы №2 представлена на рисунке 7.

У крыс опытной группы №2 ткань почки с сохранной гистоархитектоникой. Соотношение коркового и мозгового слоя в норме. Почечные клубочки обычного размера, слабо кровенаполнены. В клетках канальцев

небольшое количество мелких ярко-эозинофильных гранул в цитоплазме – явления зернистой дистрофии. Собирательные трубочки без особенностей. Стенка почечной лоханки без особенностей. Сосуды стромы также без каких-либо особенностей.

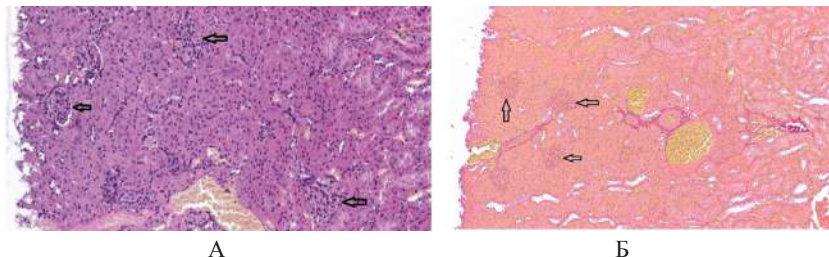


Рис. 7. Гистологическая картина почек опытной группы крыс № 2 (А – окраска гематоксилин-эозином; Б – окраска Ван-Гизон), увел. x 20

Fig. 7. Histological findings in the kidneys of experimental group No. 2 of rats (А – hematoxylin-eosin staining; Б – Van Gieson staining), magnification $\times 20$

Гистологическая картина почек контрольной группы крыс представлена на рис. 8.

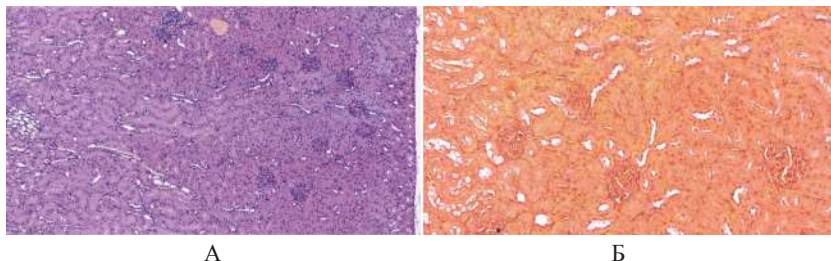


Рис. 8. Гистологическая картина почек контрольной группы крыс (А – окраска гематоксилин-эозином; Б – окраска Ван-Гизон), увел. x 20

Fig. 8. Histological findings in the kidneys of the control group of rats (А – hematoxylin-eosin staining; Б – Van Gieson staining), magnification $\times 20$

По результатам анализа гистологических препаратов сделан вывод о негативном влиянии высокого содержания жира на организм животного, но сопутствующие добавки (ДКВ, витамины, пробиотики), минимизируют негативное влияние высокожирной диеты.

При патологоанатомическом вскрытии наибольшее отложение внутрибрюшинного жира отмечалось у опытной группы №2, менее – в опытной группе №1 по сравнению с контролем (рис. 9).

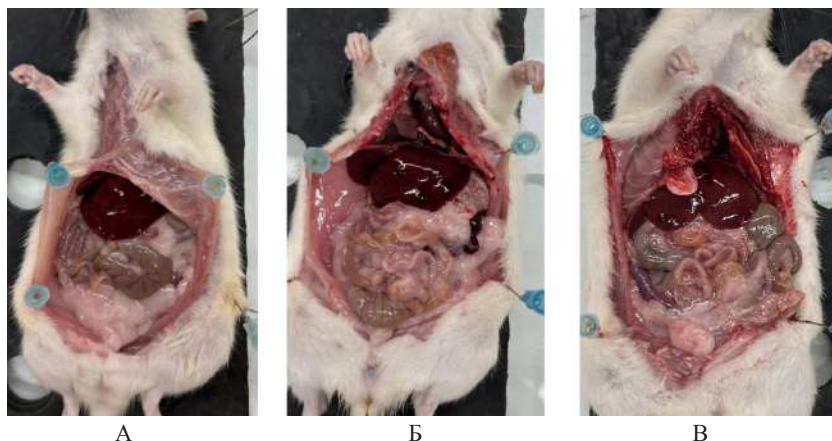


Рис. 9. Внешний вид органов у крыс опытной группы №1 (А) и №2 (Б) и у крыс контрольной группы (Б)

Fig. 9. External appearance of the organs in rats from experimental groups No. 1 (А) and No. 2 (Б) and in rats from the control group (Б)

Абдоминальное ожирение способствует развитию периферической инсулинорезистентности и окислительного стресса, вследствие снижения связывания инсулина с рецепторами мембран эритроцитов и потребления глюкозы клетками, повышения степени перекисного окисления липидов и снижением антиокислительной активности ферментов [11; 15]. Вместе с тем указано, что молочные жиры способствовали увеличению веса и метаболическому синдрому у крыс [18]. Настоящие исследования и исследования других авторов показывают, что имеется большая необходимость уделять серьезное внимание количеству потребляемых жиров из молочных продуктов. Но в то же время следует иметь ввиду, что, если высокожирная диета содержит также ненасыщенные жирные кислоты и антиоксиданты, снижает отрицательное влияние на метаболизм липидов и жирных кислот в тканях крыс, тем самым смягчая возникновение и прогрессирование заболеваний, связанных с высокожирной диетой. Вместе с тем рекомендуется изучить совместное влияние ненасыщенных жирных кислот и антиоксидантов на воспаление [19; 21]. Введение таких антиоксидантов как ДКВ и витамина С, существенно снижают уровни продуктов перекисного окисления липидов и окислительную модификацию белков в митохондриях печени крыс, повышая содержание неферментативных компонентов тиол-дисульфидной антиоксидантной системы, то есть эффек-

тивно защищают митохондрии печени от развития оксидативного стресса [14]. К тому же ДКВ, как природный флавоноид, обладает высокой биологической активностью, включая гепатопротекторное действие. Например, было показано, что ДКВ улучшает дисметаболизм липидов в организме, особенно в печени, возможно, за счет улучшения микрофлоры кишечника, что можно использовать в качестве стратегии вмешательства при заболеваниях метаболизма в печени у животных и человека [20; 22].

Заключение

Анализируя полученные данные результаты исследований, выявляем, что у лабораторных крыс опытной группы №2, получавших зерноспесь с добавкой нового разработанного сливочно-растительного спреда 810 ккал/кг с 85,0% жира на протяжении 6 недель опыта у крыс наблюдались признаки почечного и жирового гепатоза. У крыс опытной группы №1 (энергетическая ценность корма 809 ккал/кг с добавлением сливочно-растительного спреда $\pm 5\%$) с жирностью 80,0% структура почек и печени почти была приближена к здоровому органу.

Полученные экспериментальные данные показывают изменения в липидном и углеводном метаболизме вследствие повышенного потребления жиров в виде образования в органах (почках и печени) признаков жировой дистрофии. Данное исследование имеет перспективу дальнейшего изучения, таких как проведение сравнительного анализа при использовании других концентраций сливочно-растительного спреда.

Список литературы

1. Буянова, И. В., Ураева, В. А., Елистратова, Д. А., & Шрайнер, В. А. (2024). Разработка технологии функциональных молочных продуктов со специями. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (6), 157–163. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-6-157-163>. EDN: <https://elibrary.ru/JNBPGN>
2. Волошан, О. А., Горшков, Д. А., Петрова, О. В., Иванов, П. А., & Никулина, Д. М. (2023). Определение показателей крови лабораторных крыс с формированием регионального протокола для экспериментальных исследований. *Астраханский медицинский журнал*, 18(2), 47–54. <https://doi.org/10.29039/1992-6499-2023-2-47-54>. EDN: <https://elibrary.ru/HQBSJE>
3. Гилева, О. Г., Бутолин, Е. Г., Терещенко, М. В., & Иванов, В. Г. (2022). Оценка показателей углеводного и липидного обмена у крыс в зависимости от вида высококалорийного питания. *Ожирение и метаболизм*, 19(1), 47–52. <https://>

- doi.org/10.14341/omet12712. EDN: <https://elibrary.ru/HPZGWK>
4. Горбатова, А. В. (2013). Исследование качественных показателей сливочно-растительного спреда функциональной направленности. *Аграрный вестник Урала*, (1), 37–39. EDN: <https://elibrary.ru/RBJPDJ>
 5. Долматова, О. И., Лемешева, В. С., & Заднепровская, Л. А. (2020). Молоко-содержащий продукт с заменителем молочного жира, произведенный по технологии сметаны с увеличенным сроком годности. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 82(1), 110–116. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-110-116>. EDN: <https://elibrary.ru/WHVTCS>
 6. Дроздов, А. Н., Калманович, С. А., Ильинова, С. А., & Макагонов, С. Н. (2006). Сливочно-растительные спреды повышенной пищевой ценности. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, (2–3), 43–44. EDN: <https://elibrary.ru/JTHHGN>
 7. Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю): утверждены решением Комиссии Таможенного союза от 28 мая 2010 г. № 299 (с изменениями на 10 мая 2018 года). (2011). Москва:, 709 с.
 8. Ивкова, И. А., & Екимова, А. А. (2023). Разработка сухого продукта повышенной пищевой ценности и хранимостпособности на молочной основе. *Переработка молока*, (12), 58–59. <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2023-12-58-59>. EDN: <https://elibrary.ru/MPGEGZ>
 9. Ивкова, И. А., & Пиляева, А. С. (2017). Сухие молокосодержащие продукты здорового питания. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 79(2), 148–152. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-148-152>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJSGDX>
 10. Луценко, М. Т. (2006). Гепатоэнтеральная рециркуляция холестерина. *Бюллетень СО РАМН*, (2), 23–28. EDN: <https://elibrary.ru/HUBGKF>
 11. Микаелян, Н. П., Шестопапов, А. В., Микаелян, А. А., Комаров, О. С., & Гурина, А. Е. (2022). Влияние ожирения на развитие инсулинорезистентности и окислительного стресса в эксперименте. *Российская детская офтальмология*, 3, 42–50. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2022-3-42-50>. EDN: <https://elibrary.ru/DXCRJS>
 12. Патрушева, М. А. (2014). Значение экологически чистых продуктов в питании человека. *Вестник магистратуры*, (10), 103–104. EDN: <https://elibrary.ru/SSYGVH>
 13. Султанова, К. Т., Мирошников, М. В., & Крышень, К. Л. (2023). Некоторые видовые особенности анатомии гепатобилиарной системы и состава желчи у лабораторных животных. *Лабораторные животные для научных исследований*,

- (3), 93–99. <https://doi.org/10.57034/2618723X-2023-03-08>. EDN: <https://elibrary.ru/FPYGIR>
14. Халилов, Р. А., Джафарова, А. М., Рабаданова, З. Г., & Джафаров, М. Б. (2024). Влияние дигидрокверцетина на интенсивность оксидативного стресса в митохондриях печени крыс при гипотермии. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*, (6), 945–958. <https://doi.org/10.31857/S0869813924060055>. EDN: <https://elibrary.ru/BERUFG>
15. Шептулина, А. Ф., Широкова, Е. Н., & Ивашкин, В. Т. (2013). Ядерные рецепторы в регуляции транспорта и метаболизма желчных кислот. *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*, 23(5), 32–45. EDN: <https://elibrary.ru/RFMABJ>
16. Шумейко, А. В., & Дикая, М. А. (2023). Молочные продукты и влияние лактозы на организм человека. *Юный ученый*, 3(66), 225–230. EDN: <https://elibrary.ru/UXJQMI>
17. Thomas, J. N., Kelley, M. J., & Story, J. A. (1984). Alteration of regression of cholesterol accumulation in rats by dietary pectin. *Br. J. Nutrition*, 51, 339–345. <https://doi.org/10.1079/BJN19840040>
18. Chen, J., Ding, X., Wu, R., Tong, B., Zhao, L., Lv, H., Meng, X., Liu, Y., Ren, B., Li, J., Jian, T., & Li, W. (2021). Novel sesquiterpene glycoside from loquat leaf alleviates type 2 diabetes mellitus combined with nonalcoholic fatty liver disease by improving insulin resistance, oxidative stress, inflammation, and gut microbiota composition. *J. Agric. Food Chem.*, 69(47), 14176–14191. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c05596>. EDN: <https://elibrary.ru/CRFGKK>
19. Ehrampoush, E., Homayounfar, R., Davoodi, S. H., Zand, H., Askari, A., & Kouhpayeh, S. A. (2020). Ability of dairy fat in inducing metabolic syndrome in rats. *Springer Plus*, 5. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3716-x>. EDN: <https://elibrary.ru/CNIZJD>
20. Helian, M., Niu, X., Zhou, X., Zou, Q., Deng, Z., Liu, R., Zheng, L., & Li, J. (2025). Effects of unsaturated fatty acid-rich diets supplemented with antioxidants on lipid and fatty acid metabolism in high-fat rats. *Food Science of Animal Products*, 3(2), 9240119. <https://doi.org/10.26599/FSAP.2025.9240119>. EDN: <https://elibrary.ru/NURLRK>
21. Maulana, H., & Ridwan, A. (2021). High-fat diets-induced metabolic disorders to study molecular mechanism of hyperlipidemia in rats. *3BIO: Journal of Biological Science, Technology and Management*, 3(2), 37–50. <https://doi.org/10.5614/3bio.2021.3.2.5>. EDN: <https://elibrary.ru/OGKRDI>
22. Wang, M., Han, H., Wan, F., Zhong, R., Do, Y. J., Oh, S.-I., Lu, X., Liu, L., Yi, B., & Zhang, H. (2022). Dihydroquercetin supplementation improved hepatic lipid dys-

metabolism mediated by gut microbiota in high-fat diet (HFD)-fed mice. *Nutrients*, 14(24), 5214. <https://doi.org/10.3390/nu14245214>. EDN: <https://elibrary.ru/IGSDRJ>

References

1. Buyanova, I. V., Uraeva, V. A., Elistratova, D. A., & Shrayner, V. A. (2024). Development of technology for functional dairy products with spices. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, (6), 157–163. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-6-157-163>. EDN: <https://elibrary.ru/JNBPGN>
2. Voloshan, O. A., Gorshkov, D. A., Petrova, O. V., Ivanov, P. A., & Nikulina, D. M. (2023). Determination of blood parameters in laboratory rats with the development of a regional protocol for experimental studies. *Astrakhan Medical Journal*, 18(2), 47–54. <https://doi.org/10.29039/1992-6499-2023-2-47-54>. EDN: <https://elibrary.ru/HQBSJE>
3. Gileva, O. G., Butolin, E. G., Tereshchenko, M. V., & Ivanov, V. G. (2022). Assessment of carbohydrate and lipid metabolism parameters in rats depending on the type of high-calorie diet. *Obesity and Metabolism*, 19(1), 47–52. <https://doi.org/10.14341/omet12712>. EDN: <https://elibrary.ru/HPZGWK>
4. Gorbatova, A. V. (2013). Study of quality indicators of a functional butter-vegetable spread. *Agrarian Bulletin of the Urals*, (1), 37–39. EDN: <https://elibrary.ru/RBJPDJ>
5. Dolmatova, O. I., Lemesheva, V. S., & Zadneprovskaya, L. A. (2020). Milk-containing product with a milk fat substitute, produced using sour cream technology with an extended shelf life. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 82(1), 110–116. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-110-116>. EDN: <https://elibrary.ru/WHVTCS>
6. Drozdov, A. N., Kalmanovich, S. A., Ilyinova, S. A., & Makagonov, S. N. (2006). Butter-vegetable spreads of increased nutritional value. *News of Higher Educational Institutions. Food Technology*, (2–3), 43–44. EDN: <https://elibrary.ru/JTHHGN>
7. Unified sanitary-epidemiological and hygienic requirements for goods subject to sanitary-epidemiological supervision (control): Approved by Decision No. 299 of the Customs Union Commission dated May 28, 2010 (as amended on May 10, 2018). (2011). Moscow: [publisher not specified], 709 pp.
8. Ivkova, I. A., & Ekimova, A. A. (2023). Development of a dry product of increased nutritional value and storage stability based on milk. *Milk Processing*, (12), 58–59. <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2023-12-58-59>. EDN: <https://elibrary.ru/MPGEGZ>
9. Ivkova, I. A., & Pilyaeva, A. S. (2017). Dry milk-containing products for healthy nutrition. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 79(2), 148–152. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-148-152>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJSGDX>

10. Lutsenko, M. T. (2006). Hepatoenteral recirculation of cholesterol. *Bulletin of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences*, (120)(2), 23–28. EDN: <https://elibrary.ru/HUBGKF>
11. Mikaelyan, N. P., Shestopalov, A. V., Mikaelyan, A. A., Komarov, O. S., & Gurina, A. E. (2022). The effect of obesity on the development of insulin resistance and oxidative stress in an experiment. *Russian Pediatric Ophthalmology*, 3, 42–50. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2022-3-42-50>. EDN: <https://elibrary.ru/DXCRJS>
12. Patrusheva, M. A. (2014). The importance of environmentally friendly products in human nutrition. *Vestnik Magistratury*, (10), 103–104. EDN: <https://elibrary.ru/SSYGVH>
13. Sultanova, K. T., Miroshnikov, M. V., & Kryshen, K. L. (2023). Some species-specific features of the anatomy of the hepatobiliary system and bile composition in laboratory animals. *Laboratory Animals for Scientific Research*, (3), 93–99. <https://doi.org/10.57034/2618723X-2023-03-08>. EDN: <https://elibrary.ru/FPYGIR>
14. Khalilov, R. A., Dzhafarova, A. M., Rabadanova, Z. G., & Dzhafarov, M. B. (2024). The effect of dihydroquercetin on the intensity of oxidative stress in liver mitochondria of rats under hypothermia. *Russian Journal of Physiology named after I. M. Sechenov*, (6), 945–958. <https://doi.org/10.31857/S0869813924060055>. EDN: <https://elibrary.ru/BERUFG>
15. Sheptulina, A. F., Shirokova, E. N., & Ivashkin, V. T. (2013). Nuclear receptors in the regulation of bile acid transport and metabolism. *Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*, 23(5), 32–45. EDN: <https://elibrary.ru/RFMABJ>
16. Shumeiko, A. V., & Dikaya, M. A. (2023). Dairy products and the effect of lactose on the human body. *Young Scientist*, 3(66), 225–230. EDN: <https://elibrary.ru/UXJQMI>
17. Thomas, J. N., Kelley, M. J., & Story, J. A. (1984). Alteration of regression of cholesterol accumulation in rats by dietary pectin. *British Journal of Nutrition*, 51, 339–345. <https://doi.org/10.1079/BJN19840040>
18. Chen, J., Ding, X., Wu, R., Tong, B., Zhao, L., Lv, H., Meng, X., Liu, Y., Ren, B., Li, J., Jian, T., & Li, W. (2021). Novel sesquiterpene glycoside from loquat leaf alleviates type 2 diabetes mellitus combined with nonalcoholic fatty liver disease by improving insulin resistance, oxidative stress, inflammation, and gut microbiota composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(47), 14176–14191. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c05596>. EDN: <https://elibrary.ru/CRFGKK>
19. Ehrampoush, E., Homayounfar, R., Davoodi, S. H., Zand, H., Askari, A., & Kouhpayeh, S. A. (2020). Ability of dairy fat in inducing metabolic syndrome in rats. *SpringerPlus*, 5. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3716-x>. EDN: <https://elibrary.ru/CNIZJD>

20. Helian, M., Niu, X., Zhou, X., Zou, Q., Deng, Z., Liu, R., Zheng, L., & Li, J. (2025). Effects of unsaturated fatty acid-rich diets supplemented with antioxidants on lipid and fatty acid metabolism in high-fat rats. *Food Science of Animal Products*, 3(2), 9240119. <https://doi.org/10.26599/FSAP.2025.9240119>. EDN: <https://elibrary.ru/NURLRK>
21. Maulana, H., & Ridwan, A. (2021). High-fat diets-induced metabolic disorders to study molecular mechanism of hyperlipidemia in rats. *3BIO: Journal of Biological Science, Technology and Management*, 3(2), 37–50. <https://doi.org/10.5614/3bio.2021.3.2.5>. EDN: <https://elibrary.ru/OGKRDI>
22. Wang, M., Han, H., Wan, F., Zhong, R., Do, Y. J., Oh, S.-I., Lu, X., Liu, L., Yi, B., & Zhang, H. (2022). Dihydroquercetin supplementation improved hepatic lipid dys-metabolism mediated by gut microbiota in high-fat diet (HFD)-fed mice. *Nutrients*, 14(24), 5214. <https://doi.org/10.3390/nu14245214>. EDN: <https://elibrary.ru/IGSDRJ>

ВКЛАД АВТОРОВ

Зубарева Е.А.: организация эксперимента, проведение патологоанатомического вскрытия крыс, забор материалов для гистологических исследований, физиологическое обоснование результатов исследований.

Ивкова И.А.: разработка состава нового сливочно-растительного спреда. Организация и участие в работе по исследованию хранимо способности продукта.

Екимова А.А.: организация и проведение эксперимента, участие в заборе и исследовании крови, описание и сравнение используемых продуктов.

Надточий А.Ю.: производственная проверка технологии сливочно-растительного спреда в Федеральном исследовательском центре фундаментальной и трансляционной медицины (г. Новосибирск). Установление технических режимов его производства. Согласование и подписание акта выработки продукта. Исследование применяемых продуктов по показателям качества и безопасности в процессе хранения.

Пиляева А.С.: разработка состава сливочно-растительного спреда. Выполнение работ по исследованию сливочно-растительного спреда. Организация и участие в работе по исследованию пищевой ценности и жирно-кислотного состава продукта.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ekaterina A. Zubareva: organization of the experiment, carrying out pathoanatomic autopsy of rats, collection of materials for histological studies, physiological descriptions of the research results.

Irina A. Ivkova: development of the composition of a new creamy vegetable spread. Organizing and participating in research on the storage capacity of the product.

Anastasia A. Ekimova: design and conduct of the experiment, participation in blood sampling and testing, description and comparison of the products used.

Anastasia Yu. Nadtochiy: production test of the technology of the creamy vegetable spread at the Federal Research Center for Fundamental and Translational Medicine (Novosibirsk). Establishment of technical modes of its production. Approval and signing of the product development act. A study of the products used in terms of quality and safety during storage.

Anastasia S. Pilyaeva: development of the composition of the creamy vegetable spread. Performing research on the creamy vegetable spread. Organization and participation in the study of nutritional value and fatty acid composition of the product.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Зубарева Екатерина Александровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры анатомии, гистологии, физиологии и патологической анатомии
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ea.zubareva@omgau.org

Ивкова Ирина Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов растительного и животного происхождения и гигиены с.-х. животных
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ia.ivkova@omgau.org

Екимова Анастасия Андреевна, аспирантка кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов растительного и животного происхождения и гигиены с.-х. животных
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
aa.ekimova20z35@omgau.org

Надточий Анастасия Юрьевна, кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов растительного и животного происхождения и гигиены с.-х. животных
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ayu.nadtochiy@omgau.org

Пилыева Анастасия Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов растительного и животного происхождения и гигиены с.-х. животных
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
as.pilyaeva@omgau.org

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina A. Zubareva, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Anatomy, Histology, Physiology and Pathological Anatomy
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
ea.zubareva@omgau.org
SPIN-code: 8121-8145
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4351-1666>

Irina A. Ivkova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Veterinary and Sanitary Examination of Products of Plant and Animal Origin and Hygiene of Agricultural Animals
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
ia.ivkova@omgau.org
SPIN-code: 7454-9840
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8233-2177>

Anastasia A. Ekimova, post-graduate student at the Department of Veterinary and Sanitary Examination of Plant and Animal Products and Hygiene of Agricultural Animals
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
aa.ekimova20z35@omgau.org
SPIN-code: 6588-8303
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2650-6390>

Anastasia Yu. Nadtochiy, Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor of the Department of Veterinary and Sanitary Examination of Products of Plant and Animal Origin and Hygiene of Agricultural Animals
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin

1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation

ayu.nadtochiy@omgau.org

SPIN-code: 6485-3067

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5315-1425>

Anastasia S. Pilyaeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Veterinary and Sanitary Examination of Products of Plant and Animal Origin and Hygiene of Agricultural Animals

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin

1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation

as.pilyaeva@omgau.org

SPIN-code: 4566-4047

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0754-6919>

Поступила 02.02.2026

После рецензирования 11.03.2026

Принята 16.03.2026

Received 02.02.2026

Revised 11.03.2026

Accepted 16.03.2026

Опыт регионов / Experience of Regions

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1518](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1518)EDN: [XGRWPX](#)

UDC 338.439.4



Ecological agriculture of Tajikistan in the context of legislative novels: Analysis, challenges and prospects

D.S. Samenbetova¹, O.Yu. Patlasov¹, U.R. Karimova²¹*Omsk Humanitarian Academy, Omsk, Russian Federation*²*Tajik agrarian University named Shirinsho Shotemur;**Dushanbe, Republic of Tajikistan*

Abstract

Background. This article analyzes current issues related to the development of organic agriculture in the Republic of Tajikistan within the current legal framework. An ecological approach to economic management as a strategic direction for the development of the agricultural sector includes minimizing negative environmental impacts, preserving soil fertility, wisely using water and biological resources, and improving the country's food security. Particular attention is paid to the analysis of legislative acts, regulatory, and policy documents defining the legal framework and organizational mechanisms for ensuring the greening of agricultural production. Measures are proposed to improve the institutional environment and regulatory framework for the development of the organic agrifood market in the Republic of Tajikistan, as well as updating relevant legislation and government support programs for the industry.

In today's climate of sustainable development, organic agriculture is becoming a key element of food security and natural resource conservation strategies. For the Republic of Tajikistan, where agriculture accounts for a significant share of the national economy and provides employment for a significant portion of the population, the transition to organic production methods represents not only an economic opportunity but also a socio-ecological necessity. Organic agriculture involves eliminating synthetic pesticides and fertilizers, optimizing land use, and ensuring high product quality, which directly aligns with international standards for sustainable development and the improvement of agricultural and food systems.

Purpose. This work is aimed at solving an important scientific and practical problem – the development of sound recommendations for optimizing the legal framework that ensures the development of organic agriculture in Tajikistan, which will enhance

the competitiveness of national agri-food products, strengthen food security and ensure sustainable use of natural resources

Materials and methods. The methodological basis of the research is a systems-structural approach, an analysis of the regulatory framework, a comparative analysis of international and national standards, as well as empirical information on sustainable agricultural production practices.

Results. The research identified key achievements in the legal framework for organic agriculture, as well as limitations hindering the widespread adoption of organic technologies. It was established that despite the existence of specific regulations aimed at regulating environmental aspects of agricultural activities, significant gaps exist in the coordination of legislative initiatives, limited funding for support programs, and insufficient institutional readiness of agricultural enterprises to adapt innovative environmental practices. The identified barriers serve as the basis for formulating recommendations for improving the legislative framework, strengthening government support, updating the roles of institutions regulating the organic market, developing an incentive system for agricultural producers, and integrating international experience into national practices.

Keywords: organic agriculture; legislation; green economy; government regulation

For citation. Samenbetova, D. S., Patlasov, O. Yu., & Karimova, U. R. (2026). Ecological agriculture of Tajikistan in the context of legislative novels: Analysis, challenges and prospects. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 607-626. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1518>

Экологическое сельское хозяйство Таджикистана в контексте законодательных новелл: анализ, проблемы и перспективы

Д.С. Саменбетова¹, О.Ю. Патласов¹, У.Р. Каримова²

¹Омская гуманитарная академия, Омск, Российская Федерация

²Таджикский аграрный университет имени Шириншох Шотемур,
Душанбе, Республика Таджикистан

Аннотация

Обоснование. В статье рассматриваются актуальные вопросы развития экологического сельского хозяйства в Республике Таджикистан на фоне действующей системы правового регулирования. Экологическое сельское хозяйство рассматривается как стратегическое направление устойчивого развития аграрного сектора, обеспечивающее минимизацию негативного воздействия на окружающую среду, сохранение плодородия почв, рациональное использование водных и биологиче-

ских ресурсов, а также повышение продовольственной безопасности страны. Особое внимание уделено анализу действующих законодательных актов, стандартов и программных документов, определяющих правовые основания и организационные механизмы поддержки экологизации аграрного производства. пока отсутствует ясность распределении ролей Предложены меры по совершенствованию институциональной среды и нормативно-правовой базы функционирования рынка органической агропродовольственной продукции в Республике Таджикистан, а также актуализация профильного законодательства и государственных программ поддержки отрасли.

В современных условиях устойчивого развития органическое сельское хозяйство становится важным аспектом развития в рамках стратегий продовольственной безопасности и сохранения природных ресурсов. Для Республики Таджикистан, где сельское хозяйство занимает значительную долю в структуре национальной экономики и обеспечивает занятость значительной части населения, переход к органическим методам производства представляет собой не только экономическую перспективу, но и социально-экологическую необходимость. Органическое сельское хозяйство предполагает отказ от синтетических пестицидов и удобрений, оптимизацию использования земельных ресурсов и обеспечение высокого уровня качества продукции, что напрямую коррелирует с международными стандартами устойчивого развития и оздоровления агропродовольственных систем.

Цель – разработка обоснованных рекомендаций по оптимизации правовой базы, обеспечивающей развитие экологического сельского хозяйства в Таджикистане, что потенцирует повышение конкурентоспособности национальных агропродовольственных продуктов, укрепление продовольственной безопасности и устойчивое использование природных ресурсов.

Материалы и методы. Методологически исследование базируется на системно-структурном подходе, анализе нормативно-правовой базы, сравнительном анализе международных и национальных стандартов, а также эмпирической информации об устойчивых практиках сельскохозяйственного производства.

Результаты. В результате проведённого исследования выявлены основные достижения в правовом обеспечении экологического сельского хозяйства, а также ограничения, препятствующие широкому внедрению экологических технологий. Установлено, что несмотря на наличие отдельных нормативных актов, направленных на регулирование экологических аспектов аграрной деятельности, существуют значительные пробелы в координации законодательных инициатив, ограниченное финансирование программ поддержки и недостаточная институциональная готовность сельских хозяйств адаптировать инновационные экологические практики. Выявленные барьеры служат основанием для формулирования рекоменда-

ций по совершенствованию законодательной базы, усилению государственной поддержки, актуализации ролей институтов, регулирующих рынок органической продукции, развитию системы мотивации для сельхозтоваропроизводителей и интеграции международного опыта в национальную практику.

Ключевые слова: органическое сельское хозяйство; законодательные акты; зеленая экономика; государственное регулирование

Для цитирования. Саменбетова, Д. С., Патласов, О. Ю., & Каримова, У. Р. (2026). Экологическое сельское хозяйство Таджикистана в контексте законодательных новелл: анализ, проблемы и перспективы. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 607-626. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1518>

This article analyzes current issues related to the development of organic agriculture in the Republic of Tajikistan within the current legal framework. An ecological approach to economic management as a strategic direction for the development of the agricultural sector includes minimizing negative environmental impacts, preserving soil fertility, wisely using water and biological resources, and improving the country's food security. Particular attention is paid to the analysis of legislative acts, regulatory, and policy documents defining the legal framework and organizational mechanisms for ensuring the greening of agricultural production. Measures are proposed to improve the institutional environment and regulatory framework for the development of the organic agrifood market in the Republic of Tajikistan, as well as updating relevant legislation and government support programs for the industry.

The methodological basis of the research is a systems-structural approach, an analysis of the regulatory framework, a comparative analysis of international and national standards, as well as empirical information on sustainable agricultural production practices. Identified key achievements in the legal framework for organic agriculture, as well as limitations hindering the widespread adoption of organic technologies. It was established that despite the existence of specific regulations aimed at regulating environmental aspects of agricultural activities, significant gaps exist in the coordination of legislative initiatives, limited funding for support programs, and insufficient institutional readiness of agricultural enterprises to adapt innovative environmental practices. The identified barriers serve as the basis for formulating recommendations for improving the legislative framework, strengthening government support, updating the roles of institutions regulating the organic market, developing an incentive system for agricultural producers, and integrating international experience into national practices.

Introduction

Tajikistan is one of the Central Asian countries where agriculture plays an important role in the economy and food security. Agriculture in Tajikistan is one of the key drivers in the country's economy and is one of the main industries. In 2020, about 30% of the total work force was in this sector of the economy, with the agricultural sector also accounting for approximately 23% of GDP [1]. Major crops farmed in Tajikistan include wheat, barley, oats, rice, corn, cotton, tobacco, fruits and vegetables. It can be argued that the farming sector of Tajikistan is quite vulnerable, since the climate in the country is very volatile, with frequent floods, droughts and high temperatures forcing farmers to adapt. Water resource availability is especially relevant.

Organic agriculture in Tajikistan relies on natural resources and methods that do not harm the environment. It also helps preserve biodiversity and improve soil quality. Tajikistan has vast commercial lands that still see traditional culture of soil cultivation free of synthetic fertilizers and pesticides. This offers a huge priority for this CIS country. In this regard, the role of legal and regulatory frameworks, which define the conditions, mechanisms, and incentives for the implementation of environmentally friendly technologies in agriculture, is increasing.

The purpose of this study is to analyze the legal framework for organic agriculture in the Republic of Tajikistan, identify existing legal and institutional challenges, and substantiate prospects for the development of environmentally sustainable forms of agricultural production in the current socioeconomic conditions.

The research herein puts forward the following hypotheses:

1. With their limited financial capabilities, Tajik agricultural producers cannot afford themselves excessive use of mineral fertilizers and chemical plant protection products, which has created a natural favorable background for organic agriculture.
2. Because there is clear pressure from foreign food imports in local food commerce in capital Dushanbe, the development of organic agriculture without appropriate processing, packaging, transport logistics, storage and sales does not warrant the quality of food even with organic raw materials.
3. Food quality can be improved by the multiplier effect of halal requirements and organic agriculture.

Materials and methods

The methodological basis of the research is a systems-structural approach, an analysis of the regulatory framework, a comparative analysis of international

and national standards, as well as empirical information on sustainable agricultural production practices.

Many scientists of Tajikistan, such as A. Safarov, A. Vazirov, I. Samandarov, J. Piriye, R. Shokirov, are interested in studying the factors of development of organic agriculture in the Republic of Tajikistan. In his thesis work, with the help of a social survey and expert assessments of farm representatives, A. Vazirov was able to project an economic and statistical model of key factors behind eco-friendly agriculture in mountainous regions. These results were used by the authors to analyze the legislative framework of the agro-industrial complex [1].

During the research, the authors delved into the regulatory framework from the standpoint of organic farming in the Republic of Tajikistan. The main instrument governing the organic farming market is the Law of the Republic of Tajikistan on Biological Economic Management and Production No. 1592 dated April 4, 2019 [3]. The authors also took a detailed look at the following provisions: the Law on State Regulation of Maintaining the Fertility of Agricultural Lands, the Law on Soil Protection, the Law on Food Security, the Law on Food Products Safety and other regulatory documents [3,4,-5]. They reviewed measures of state support for organic farming and issued recommendations on how to improve the regulatory framework governing the market for organic products as part of the sustainable development of the region in the context of green entrepreneurship.

Results

According to FiBL statistics, the area of land under organic farming and number of organic farmers in 2020 is presented in Table 1 and Table 2 [21].

Table 1.

Area of land under organic farming in 2020

Country	Russia	Kazakhstan	Azerbaijan	Tajikistan	Uzbekistan	Kyrgyzstan
Area in ha	615188	114886	38080	11818	3781	30259

Table 2.

Organic farmers in 2020

Country	Russia	Kazakhstan	Azerbaijan	Tajikistan	Uzbekistan	Kyrgyzstan
Number	48	15	446	166	26	30259

Source: Willer, Helga, Jan Trávníček, Claudia Meier and Bernhard Schlatter (Eds.) (2022): The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2022. Research Institute of Organic Agriculture FiBL, Frick, and IFOAM [291]

Mineral fertilizers are widely used in agriculture in Tajikistan to increase crop yield and quality. They make it possible to compensate for the lack of

nutrients in soils, which is especially important in high mountain areas. According to the research by international organizations [14], official statistics in the Republic reflect only about 20% of mineral fertilizers and pesticides used nationwide. No studies have been conducted in Tajikistan to learn about the content of pesticides in soil or plants over the past 30 years. However, there is a legislative framework for use of pesticides. According to the List of Chemical and Biological Substances Approved for Use in the Republic of Tajikistan (2004), about 472 types of chemical and biological substances may be used in the country. These include 184 formulations of pesticides and agrochemicals, and plant protection products [14]. An analysis of local regulatory framework for chemical safety showed that there is no definition of “highly hazardous pesticides” (HHPs) in Tajikistan.

The government does not implement actions to reduce the use of HHPs in farming. Like many Central Asian states, Tajikistan actively pursues the efforts to reduce pesticide use and shift to more eco-friendly farming methods. The only action undertaken at the governmental level that somehow helps reduce pesticide use is the introduction of organic farming. Organic farming is based on the principles of crop rotation and use of green manures, which helps maintain soil fertility and prevent the buildup of harmful substances. Elimination of synthetic pesticides and chemical fertilizers enables the natural balance of microorganisms in the soil to be maintained, which contributes to soil fertility and resistance to erosion and degradation.

The main purpose of organic farming in Tajikistan is to improve the welfare of rural communities through higher farmer incomes, and better marketing of organic produce in compliance with international organic farming standards, quality standards, international environmental and social regulation. In this regard, focus is placed on organic agriculture as one of the components of sustainable agricultural development as part of the green economy development agenda.

In Tajikistan, the Center for Development of Organic Products – Sugdagroserv Organic (SAS Organic CDOP) – became the first initiator of organic farming in 2002. SAS Organic was set up with the assistance of the “Partnership for the Development of Private Enterprise” project of the International Finance Corporation and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs. The introduction of organic farming began in the Sughd region with the harvesting of biocotton [11].

In those years, SAS Organic’s partners in organic farming were local state authorities, and international organizations (HELVETAS Swiss Intercooperation, Interfaith Cooperation Development Organization – ICCO, GIZ/German

Agency for International Cooperation) [11]. The main goal of SAS Organic was to make changes to the system of agricultural organic production in Tajikistan, which primarily focused on the country's cotton sector. Later, in 2009, SAS Organic collaborated with 39 farmers, out of which 4 farmers became organic farmers in the first year of the project, encompassing a total irrigation area of 69.9 hectares of land. The project was implemented in collaboration with Bio-Kishovarz in 6 districts of the Sughd Region. In 2014, the number of organic farmers reached 1177 across 3666.4 hectares of organic land, which included 1669.3 hectares for cotton, 413.5 hectares for wheat, 13.8 hectares for mung bean, and 1567.5 hectares for other crops [7].

The main institutions behind the development of the agro-industrial complex have been legislative acts that direct the state policy for organic agriculture. The main law regulating organic farming is the Law of the Republic of Tajikistan dated July 22, 2013 No. 1001 «Biological Economic Management and Production» [3]. The law prescribes a definition of eco-friendly products. Environmentally friendly products are farm produce that is made, processed and sold in accordance with the requirements of biological economic management, as identical to the concepts used in international legal acts such as “biological”, “organic” and “natural” (as amended by the Law of the Republic of Tajikistan dated 04.04.2019 No. 1592) [3].

There is no official statistics on organic farming in the country. The fact that there is no mention in international review “FIBL_organic-world” means that organic farming in Tajikistan is impulsive in nature. A pivotal point in setting up organic agriculture is certification. There are no local certification authorities in the country; only foreign agencies are present such as IMOControl, KIVA, and Bioinspect.

Exports of organic products from Tajikistan have seen significant growth in recent years. Organic cotton, peanuts and apricots are exported on good business terms from Tajikistan to international markets. The main partner countries that import organic produce from Tajikistan include Russia, Kazakhstan, Uzbekistan, Turkey, Germany, France, Italy and other European countries, as well as China [6]. Exports of organic products are growing steadily and make up an important component of the economy of Tajikistan. The success of organic exports from Tajikistan is dependent on several factors such as quality of produce, organic standard certification, development of international logistics and governmental support for this sector. Total area certified for organic farming (fully organic or in transient state) is 4 000 ha. According to the data of 2017, there are some statistics of land areas that were treated with organic fertilizers (Table 3) [11].

Table 3.

Statistics of organic land areas according to the data of 2017

Crops	Cotton and rotational crops	Beyond cotton	Pea-nuts	Beans	Toma-toes	Wheat	Corn	Apricot
Area (ha)	3500	1600	500	200	100	200	200	500

Source: Development of organic agriculture in Central Asia. Proceedings of the International Conference held on August 22-24 2017 in Tashkent and Samarkand, Uzbekistan, 2018. p. 392 [2]

FAO supports legislative changes and better institutional assistance in organic production as part of technical cooperation projects (TCP) in five countries: Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan and Uzbekistan. The legal framework in these states should be based on the provisions of the International Federation of Organic Agricultural Movement (IFOAM) and the principles of the Codex Alimentarius [7]. However, all countries face similar challenges in developing legislation that addresses organic agriculture. Often concepts and goals of legislative regulation of organic production are overridden with the goals of environmental protection and food safety legislation. Specialized organic production laws have been adopted in the following countries: Azerbaijan, Tajikistan, Kazakhstan, with Kyrgyzstan signing the law in 2015, and Uzbekistan in 2022. All laws allocates powers and authorities in organic agriculture, but responsibilities are not always clearly defined and sometimes overlap. National legislation does not always contain provisions on registers of organic producers (most often this register does not exist at all, for example in Kazakhstan and Tajikistan). There are no provisions in national legislation that would regulate import and export. Foreign certification authorities operating in these countries are not regulated, which results in lack of accurate statistical information on the organic products certified by them.

Discussions

The main institutions that regulate and define the environmentally-friendly development of agriculture are, first of all, legislative acts. State policy and the vector of development of ecological agriculture have been designated at the legislative level. As part of the critical analysis of the regulatory framework that governs the organic produce market in Tajikistan, we would like to note the following laws:

1. Law of the Republic of Tajikistan “On Biological Economic Management and Production” No. 1592 dated April 4, 2019 [3]. This Law establishes the legal

and organizational framework for biological economic management and is aimed at production, processing, storage, transportation, packaging, labeling and sale of environmentally friendly products. These institutions are crucial to driving the environmentally-friendly development of agriculture in Tajikistan [3].

2. The National Strategy of the Republic of Tajikistan for Natural Disaster Risk Reduction for 2019-2030 was approved by Decree of the Government of the Republic of Tajikistan No. 602 dated December 29, 2018. The goal of the strategy is to prevent and reduce existing and emerging natural disaster risks by building national capacity to manage these risks (Government of the Republic of Tajikistan 2018) [7]. Agriculture and food security are addressed in this national strategy as one of its strategic objectives to ensure food security and public access to proper food through agricultural development. This sector is one of the priority sectors of the country's economy.

5. The Law of Tajikistan on Food Security (No. 671 dated Dec 29, 201, as last amended in 2019) promotes effective use of irrigation structures, development of production capacities and storage of seeds [4]. The law puts an emphasis on allocation of national funds to local farmers on a competitive basis under the national food security policy but financing ecological agriculture has not been addressed individually. Subsidizing the purchases of organic seeds has also not been addressed.

8. The Law "On Dehkan Farms" (No. 1289 dated March 15, 2016) provides a legislative basis for private farms and their activities [6]. However, aspects and particulars of such farms engaged in organic production have not been described. In general, farmers lack information on ways to optimize the use of fertilizers, pesticides and water. Another challenge is an insufficient degree of freedom that farms can exercise in choosing crops for cultivation. Despite the legislatively enshrined right of dehkan farms to independently determine agricultural production patterns, in practice this right is exercised to a limited extent. Significant barriers are associated with the underdevelopment of market infrastructure, limited access to financial resources, and logistical support. Distribution channels, the supply of seeds, inputs, and agricultural machinery, as well as the operation of irrigation systems, are largely controlled by external economic actors focused primarily on traditional export crops, primarily cotton. As a result, the formally declared freedom of choice is transformed into an economically conditioned dependence, making the cultivation of alternative crops less accessible and associated with increased risks for farms.

9. Medium-term Development Program of the Republic of Tajikistan for 2021-2025 (MDP), as approved by Resolution No. 168 dated April 30, 2021,

as well as FAO report with a proposed national investment plan for food security and sustainable agricultural development for 2021-2030 for the Republic of Tajikistan [21]. A distinctive feature of the updated program is to take over the experience of the COVID-19 pandemic. The basic principles of the strategy pursue the following:

- land inventory in order to introduce land registers, which will further help with targeted and efficient use of land, and aid in improving the structure of seed farms increasing their capacity and efficiency
- improving food security and food quality by means of the principles of organic agriculture and the principles of green entrepreneurship [11].

Over the last decade, Tajikistan has seen a number of projects delivered in agriculture and DRR (Disaster Risk Reduction), EWRS (Early Warning and Response Systems) and agrometeorological services. Most of these initiatives were carried out with the support of international organizations and were focused on strengthening food and nutrition security, enhancing adaptation to climate change, encouraging more efficient and sustainable management of natural resources, as well as improving systems for locust monitoring and control. However, as far as development of organic agriculture is concerned, there is no mention of successful international projects implemented over the past 5 years.

National pesticide management legislation is incomplete. There is no register of pesticides, so pesticides are not controlled. Thus, the market sees many falsified or counterfeit products. An important aspect behind strong organic farming is its legislative aspects, including certification. Absence of their own relevant certification authorities and standards hinders successful implementation of organic agriculture. In this context, the most important aspect for eco-products market development is to establish requisite institutions and infrastructure for this market. Currently, Tajikistan does not have a unified and integrated certification system for organic products, which makes it hard to develop organic agriculture and access to international markets.

The Law of the Republic of Tajikistan “On Biological Economic Management and Production” No. 1592 dated April 4, 2019 [3], and other regulations do not prescribe the creation of additional standards or GOSTs, according to which it would be possible to determine whether a product is environmentally friendly or not. The law also does not address certification. There is now a clearly defined vision of the necessity to update regulations and standards governing the work of all players in the organic market: farmers, traders, and certifying bodies. Next, we would like to highlight several actions in this area. None of the laws in the CIS countries stipulate interest rates for the purchase

of fertilizers for organic farming, or preferential loans and grants for start-up entrepreneurs. The laws also do not regulate subsidies. Thus, the law, as well as other regulations, do not address state support measures which should play an important role in transition to sustainable organic agriculture [270, 282, 29]. At the moment, the law is more of a framework than a delivery plan, so a lot of work is required to be done to prepare by-laws that would create a mechanism to implement the law.

Harmonization of European and Tajik standards requires a lot of focus. This creates challenges for producers that do not know what standards must be met and what procedures must be followed to be granted certification. It should also be noted that control and supervision mechanisms over the production and sale of organic produce have not been sufficiently developed in Tajikistan. Lack of an effective monitoring and control arrangement may lead to violations and decrease confidence in organic products. The issue with many farmers is that it is easier for them to export organic agricultural products than to develop a domestic sales market. There is a need for a complete process flow of eco-clean products from organic agriculture to processing, packaging, transportation and distribution of organic products [3129].

In fact, the state does not provide financial, communication or investment support to organic agriculture. There is no system for collecting information on the number of producers, certified land, market volume and other components, which could further serve as a basis for development forecasts. There is no role distribution between government bodies, ministries and market entities such as producers, consumers, suppliers, and traders which create barriers for development of organic agriculture [2830].

Conclusion

As has been earlier noted by the authors, one of the main challenges in fostering the ecological agriculture is to improve both legislative framework and institutes governing business processes and institutional factors for development of the ecological agriculture. Designing standards for eco-clean products is one of the paramount challenges in delivering the basics of ecological agriculture as part of green entrepreneurship.

Priority should extend beyond measures aimed at reducing soil degradation and limiting the overapplication of pesticides to include the wider adoption of organic nutrient inputs, advanced soil conservation practices, and biologically based approaches to crop protection and rotation, with a clear focus on minimizing anthropogenic pressure on agroecosystems. Thus, it should become a

priority to introduce land cultivation techniques based on organic fertilizers and to establish production and marketing chains of finished eco-clean products in the delivery of government programs for the development of ecological agriculture. In the future, having in place a sophisticated infrastructure for processing companies will in many ways stabilize the environmental situation and rural issues. By expanding the production capacity of the Khujand canning plant, Tajikistan has the potential to re-establish its position in international markets for natural, non-reconstituted juices made from apricots, peaches, quinces, apples, pomegranates, grapes, and tomatoes.

In order to deliver these goals and objectives, we have defined the following actions:

- introduction of innovative irrigation and fertilization techniques, as well of a system for monitoring and forecasting weather conditions
- enhancing the legal and institutional mechanisms governing the application of chemicals in agricultural production requires the formulation and practical enforcement of comprehensive regulations and safety standards. This includes establishing rigorous criteria for assessing the quality and safety of chemical inputs, alongside the systematic monitoring and inspection of their use in farming practices;
- establishing a national crop insurance system for dehqan farms. This will enable agricultural producers to protect their crops from losses caused by adverse weather conditions or other factors and claim compensation for losses;

Developing a mechanism for subsidizing and providing preferential loans specifically to those farms that have begun to implement or are already producing organic output. The transition period from traditional agriculture usually takes 3-5 years, with hectare-by-hectare support to be provided during this period.

- development and implementation of measures to support the export of farm produce. It is necessary to create a designated structure that will deal with export of agricultural products and provide support in taxation, transport benefits and other organizational and economic issues. This will help farmers expand their market and increase their export earnings. Higher added value production, for example, in addition to exporting fruits, helped drastically increase production volumes and product range at the Shirin and Amiri chocolate factories that produce healthy candies such as fruits with nuts in chocolate, apricots, prunes, seedless grapes, and cherries.

Focus needs to be placed on attracting investments from both public and private sector in order to secure ecological growth of agriculture. Creation of

national Tajik food brands that meet both organic and halal standards will increase export potential.

In general, the development of ecological agriculture in Tajikistan requires an integrated approach and joint efforts from the state, producers, consumers and other groups of stakeholders [32]. Organic farming offers a number of environmental benefits that help reduce the negative impact of agriculture on the environment and promote sustainable rural development. However, in order to make sure there is a large-scale transition to organic farming, a number of challenges need to be overcome, such as raising awareness and training of farmers, designing effective organic certification and labeling systems, and support from governments and international organizations.

Список литературы

1. Вазиров, А. К. (2020). Госрегулирование экологической безопасности сельского хозяйства как основа устойчивого развития горного региона. *Вестник Таджикского национального университета. Серия социально-экономических и общественных наук*, (4), 119–205. EDN: <https://elibrary.ru/BVABJU>
2. Всемирный банк. (2021). *Обзор агропродовольственной отрасли и государственных расходов на сельское хозяйство Таджикистана*. Всемирный банк.
3. Закон Республики Таджикистан от 22 июля 2013 года № 1001 «О биологическом хозяйствовании и производстве». Получено с <https://faolex.fao.org/docs/pdf/taj149862.pdf>
4. Закон Таджикистана «О продовольственной безопасности» (№ 671 от 29 декабря 2010 года с учетом последних изменений от 2019 года). Получено с http://portali-huquqi.tj/publicadliya/view_qonunhovview.php?showdetail=&asosi_id=12432
5. Закон «О дехканских хозяйствах» (№ 1289 от 15 марта 2016 года). Получено с https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=84275
6. ЕЭК ООН. *Таджикистан, обзоры результативности экологической деятельности*.
7. Исайнов, Х. Р., Ходиев, Д. А., Хафизов, Х. А. (2018). Приоритетные направления привлечения прямых инвестиций в освоение природно-ресурсного потенциала региона. *Аудит и финансовый анализ*, (2), 270–274. EDN: <https://elibrary.ru/YNUGDB>
8. Козлов, А. Д., Мингалева, Ж. А. (2025). Эффективность реализации государственных экологических проектов для достижения устойчивого развития субъектов Российской Федерации. *Наука Красноярья*, 14(1), 31–53. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2025-14-1-280>. EDN: <https://elibrary.ru/LSWYPC>

9. Одинаев, Х. А., Абдуллоева, Ш. Б. (2018). *Рынок экологических услуг: проблемы и перспективы развития* [Монография]. СИНО.
10. Пириев, Дж. С. (2019). Теоретические основы региональной организации производства и кластерной политики. *Вестник Таджикского национального университета. Серия социально-экономических и общественных наук*, (5), 66–72.
11. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО). (2018). *Развитие органического сельского хозяйства в Центральной Азии: Материалы Международной конференции, проведенной 22–24 августа 2017 года в Ташкенте и Самарканде, Узбекистан*.
12. Ульмасов, Р. У., Носирзода, А. А. (2022). Демографические и миграционные проблемы в Таджикистане. В О. А. Козлова (Ред.) и др., *Глобальные вызовы демографическому развитию: Сборник научных статей. В 2-х томах* (Т. I, с. 438–448). Институт экономики Уральского отделения РАН. <https://doi.org/10.17059/udf-2022-3-14>. EDN: <https://elibrary.ru/RUXBFS>
13. Сеитов, С. К. (2024). Распределение объемов поддержки среди субъектов агропромышленного комплекса в Красноярском крае. *Наука Красноярья*, 13(3), 65–86. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2024-13-3-258>. EDN: <https://elibrary.ru/PHPXAM>
14. *Страновой обзор использования пестицидов и особо опасных пестицидов в Таджикистане* (2021, 15 марта).
15. Ходиева, Д. А., Сафаров, А. Х. (2020). Совершенствование организационно-экономического механизма управления развитием регионов. *Экономика Таджикистана*, (2), 160–166. EDN: <https://elibrary.ru/KRTHRB>
16. Хушвахтзода, К. Х., Имомназарова, Т. А. (2020). Финансово-кредитные ресурсы развития сельского предпринимательства (концептуальные вопросы). *Вестник Таджикского национального университета. Серия социально-экономических и общественных наук*, (8), 5–10. EDN: <https://elibrary.ru/WCYQFV>
17. Черняков, В. М. (2025). Совершенствование механизмов государственной поддержки сельского хозяйства в рамках стратегического планирования. *Наука Красноярья*, 14(1), 174–194. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2025-14-1-289>. EDN: <https://elibrary.ru/XRBRJA>
18. Шокиров, Р. С., Махмудов, М. К. (2019). Возможности использования зарубежного опыта формирования рынка экологически чистой продукции в республике Таджикистан. *Вестник ТГУПБП*, (4). EDN: <https://elibrary.ru/KZXFFR>
19. Эргардт, О. И., Неъматов, Х. Т. (2020). Тенденции развития сельского хозяйства в Республике Таджикистан. *Вестник науки*, 2(11), 99–107. EDN: <https://elibrary.ru/VMLLYT>
20. Bakharev, V., Giyosidinov, B. B., Kirillova, T., Kozlova, N., Sheleiko, V., & Cherkessova, T. (2024). State-run food retail chains as a tool of food security: An analysis

- of existing practices. B T. C. Devezas, M. A. Berawi, S. E. Barykin, & T. Kudryavtseva (Eds.), *Understanding the digital transformation of socio-economic-technological systems* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 951, pp. 45). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56677-6_45
21. FiBL & IFOAM. (2023). *Organic International. FiBL survey 2021: The world of organic agriculture, 2021 edition published – statistics and emerging trends 2020*. Получено с <https://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2021.html>
 22. Kotliarov, I. D. (2022). Heterogeneity of stakeholders as an obstacle to the development of agricultural cooperatives in Russia. *Russian Peasant Studies*, 7(4), 20–32. <https://doi.org/10.22394/2500-1809-2022-7-4-20-32>. EDN: <https://elibrary.ru/LJKEEN>
 23. Popov, V., Minin, V., Maksimov, D., & Zakharov, A. (2023). Prospects and objectives for organic agriculture development in the North-West Russia. B A. Ronzhin & A. Kostyaev (Eds.), *Agriculture digitalization and organic production: Smart innovation, systems and technologies* (p. 331). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7780-0_8
 24. Samenbetova, D. S., & Patlasov, O. Yu. (2022). Model of state support for organic farming of Kazakhstan in the context of creation of international regulatory framework for the industry. *BIO Web of Conferences*, 42. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224206004>. EDN: <https://elibrary.ru/NDMMEB>
 25. Samenbetova, D. S., & Patlasov, O. Yu. (2022). Market analysis of organic agricultural products in Kazakhstan based on consumer behaviour research. B *Proceedings of the 1st International Conference on Methods, Models, Technologies for Sustainable Development — MMTGE* (Vol. Agroclimatic Projects and Carbon Neutrality, pp. 359–364). <https://doi.org/10.5220/0011571900003524>
 26. Semenova, E. (2023). Stimulating the export of organic products. B A. Ronzhin & A. Kostyaev (Eds.), *Agriculture digitalization and organic production: Smart innovation, systems and technologies* (Vol. 331). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7780-0_1
 27. Mikhaylov, A., Barykin, S., Dinets, D., et al. (2025). Smart ecotourism and natural ecology in Kazakhstan. *Research in Ecology*, 7(3), 89–103. <https://doi.org/10.30564/re.v7i3.10233>. EDN: <https://elibrary.ru/WIEABM>
 28. Wang, L. K., et al. (2022). Vermicomposting process for treating agricultural and food wastes. B L. K. Wang, M. H. S. Wang, & Y. T. Hung (Eds.), *Waste treatment in the biotechnology, agricultural and food industries* (Handbook of Environmental Engineering, Vol. 26, p. 3). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03591-3_3
 29. Willer, H., Trávníček, J., Meier, C., & Schlatter, B. (Eds.). (2022). *The world of organic agriculture: Statistics and emerging trends 2022*. Research Institute of Organic Agriculture FiBL, IFOAM – Organic International. Получено с <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1344-organic-world-2022.pdf>

References

1. Vazirov, A. K. (2020). State regulation of environmental safety in agriculture as a basis for sustainable development of a mountain region. *Vestnik of the Tajik National University. Series of Socio-Economic and Social Sciences*, (4), 119–205. EDN: <https://elibrary.ru/BVABJU>
2. World Bank. (2021). *Overview of the agrifood sector and public spending on agriculture in Tajikistan*. World Bank.
3. Law of the Republic of Tajikistan No. 1001, dated July 22, 2013, “On biological farming and production”. Retrieved from <https://faolex.fao.org/docs/pdf/taj149862.pdf>
4. Law of Tajikistan “On Food Security” (No. 671, dated December 29, 2010, as amended in 2019). Retrieved from http://portali-huquqi.tj/publicadliya/view_qonun-hoview.php?showdetail=&asosi_id=12432
5. Law “On Dekhkan Farms” (No. 1289, dated March 15, 2016). Retrieved from https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=84275
6. UNECE. *Tajikistan: Environmental performance reviews*.
7. Isainov, Kh. R., Khodiev, D. A., & Khafizov, Kh. A. (2018). Priority directions for attracting direct investments to develop the natural resource potential of the region. *Audit and Financial Analysis*, (2), 270–274. EDN: <https://elibrary.ru/YNUGDB>
8. Kozlov, A. D., & Mingaleva, Zh. A. (2025). Efficiency of implementing state environmental projects to achieve sustainable development of the Russian Federation subjects. *Siberian Journal of Economic and Business Studies*, 14(1), 31–53. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2025-14-1-280>. EDN: <https://elibrary.ru/LSWYPC>
9. Odinaev, Kh. A., & Abdulloeva, Sh. B. (2018). *Market of environmental services: Problems and development prospects* [Monograph]. SINO.
10. Piriev, J. S. (2019). Theoretical foundations of regional organization of production and cluster policy. *Vestnik of the Tajik National University. Series of Socio-Economic and Social Sciences*, (5), 66–72.
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *Development of organic agriculture in Central Asia: Proceedings of the International Conference held on August 22–24, 2017, in Tashkent and Samarkand, Uzbekistan*.
12. Ulmasov, R. U., & Nosirzoda, A. A. (2022). Demographic and migration problems in Tajikistan. In O. A. Kozlova et al. (Eds.), *Global challenges to demographic development: Collection of scientific articles. In 2 volumes* (Vol. I, pp. 438–448). Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. <https://doi.org/10.17059/udf-2022-3-14>. EDN: <https://elibrary.ru/RUXBFS>
13. Seitov, S. K. (2024). Distribution of support volumes among agro-industrial complex entities in the Krasnoyarsk Territory. *Siberian Journal of Economic and Business*

- Studies*, 13(3), 65–86. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2024-13-3-258>. EDN: <https://elibrary.ru/PHPXAM>
14. *Country overview of pesticide and highly hazardous pesticide use in Tajikistan* (March 15, 2021).
 15. Khodieva, D. A., & Safarov, A. Kh. (2020). Improving the organizational and economic mechanism for managing regional development. *Economy of Tajikistan*, (2), 160–166. EDN: <https://elibrary.ru/KRTHRB>
 16. Khushvaktzoda, K. Kh., & Imomnazarova, T. A. (2020). Financial and credit resources for the development of rural entrepreneurship (conceptual issues). *Vestnik of the Tajik National University. Series of Socio-Economic and Social Sciences*, (8), 5–10. EDN: <https://elibrary.ru/WCYQFV>
 17. Chernyakov, V. M. (2025). Improving mechanisms of state support for agriculture within the framework of strategic planning. *Siberian Journal of Economic and Business Studies*, 14(1), 174–194. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2025-14-1-289>. EDN: <https://elibrary.ru/XRBRJA>
 18. Shokirov, R. S., & Makhmudov, M. K. (2019). Opportunities for using foreign experience in forming a market for environmentally friendly products in the Republic of Tajikistan. *Vestnik of TSUPBP*, (4). EDN: <https://elibrary.ru/KZXFFR>
 19. Ergardt, O. I., & Nematov, Kh. T. (2020). Trends in the development of agriculture in the Republic of Tajikistan. *Science Bulletin*, 2(11), 99–107. EDN: <https://elibrary.ru/VMLLYT>
 20. Bakharev, V., Giyosidinov, B. B., Kirillova, T., Kozlova, N., Sheleiko, V., & Cherkesova, T. (2024). State-run food retail chains as a tool of food security: An analysis of existing practices. In T. C. Devezas, M. A. Berawi, S. E. Barykin, & T. Kudryavtseva (Eds.), *Understanding the digital transformation of socio-economic-technological systems* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 951, p. 45). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56677-6_45
 21. FiBL & IFOAM. (2023). *Organic International. FiBL survey 2021: The world of organic agriculture, 2021 edition published — statistics and emerging trends 2020*. Retrieved from <https://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2021.html>
 22. Kotliarov, I. D. (2022). Heterogeneity of stakeholders as an obstacle to the development of agricultural cooperatives in Russia. *Russian Peasant Studies*, 7(4), 20–32. <https://doi.org/10.22394/2500-1809-2022-7-4-20-32>. EDN: <https://elibrary.ru/LJKEEN>
 23. Popov, V., Minin, V., Maksimov, D., & Zakharov, A. (2023). Prospects and objectives for organic agriculture development in the North-West Russia. In A. Ronzhin & A. Kostyaev (Eds.), *Agriculture digitalization and organic production: Smart innovation, systems and technologies* (p. 331). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7780-0_8

24. Samenbetova, D. S., & Patlasov, O. Yu. (2022). Model of state support for organic farming of Kazakhstan in the context of creation of international regulatory framework for the industry. *BIO Web of Conferences*, 42. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224206004>. EDN: <https://elibrary.ru/NDMMMEB>
25. Samenbetova, D. S., & Patlasov, O. Yu. (2022). Market analysis of organic agricultural products in Kazakhstan based on consumer behaviour research. In *Proceedings of the 1st International Conference on Methods, Models, Technologies for Sustainable Development — MMTGE* (Vol. Agroclimatic Projects and Carbon Neutrality, pp. 359–364). <https://doi.org/10.5220/0011571900003524>
26. Semenova, E. (2023). Stimulating the export of organic products. In A. Ronzhin & A. Kostyaev (Eds.), *Agriculture digitalization and organic production: Smart innovation, systems and technologies* (Vol. 331). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7780-0_1
27. Mikhaylov, A., Barykin, S., Dinets, D., et al. (2025). Smart ecotourism and natural ecology in Kazakhstan. *Research in Ecology*, 7(3), 89–103. <https://doi.org/10.30564/re.v7i3.10233>. EDN: <https://elibrary.ru/WIEABM>
28. Wang, L. K., et al. (2022). Vermicomposting process for treating agricultural and food wastes. In L. K. Wang, M. H. S. Wang, & Y. T. Hung (Eds.), *Waste treatment in the biotechnology, agricultural and food industries* (Handbook of Environmental Engineering, Vol. 26, p. 3). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03591-3_3
29. Willer, H., Trávníček, J., Meier, C., & Schlatter, B. (Eds.). (2022). *The world of organic agriculture: Statistics and emerging trends 2022*. Research Institute of Organic Agriculture FiBL, IFOAM — Organic International. Retrieved from <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1344-organic-world-2022.pdf>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Саменбетова Дилара Сергалиевна, выпускница аспирантуры

Частное учреждение образовательная организация высшего образования
«Омская гуманитарная академия»
ул. 2 Челюскинцев, 4, г. Омск, 644105, Российская Федерация
Dilya-dana@mail.ru

Патласов Олег Юрьевич, д-р экон. наук, профессор кафедры Экономики и управления персоналом

Частное учреждение образовательная организация высшего образования
«Омская гуманитарная академия»
ул. 4-я Челюскинцев, 2А, г. Омск, 644105, Российская Федерация
opatlasov@mail.ru

Каримова Умеда Рахматуллоевна, канд. экон. наук, преподаватель кафедры
«Финансы и кредит в АПК»

*Таджикский аграрный университет имени Шириншох Шотемур
пр. Рудаки, 146, г. Душанбе, 734003, Республика Таджикистан
Umeda_karimova@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dilara S. Samenbetova, postgraduate student

*Omsk Humanitarian Academy
2A, 4th Cheluskintsev Str., Omsk, 644105, Russian Federation
Dilya-dana@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2748-2359>*

Oleg Yu. Patlasov, Doctor of Economic Sciences, Professor

*Omsk Humanitarian Academy
2A, 4th Cheluskintsev Str., Omsk, 644105, Russian Federation
opatlasov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2015-1474>
Scopus Author ID: 56437696900*

Umeda R. Karimova, Candidate of Economic Sciences, Lecturer in the Department of
Finance and Credit in the Agro-Industrial Complex

*Tajik agrarian University named Shirinsho Shotemur
146, Rudaki Ave., Dushanbe, 734003, Republic of Tajikistan
Umeda_karimova@mail.ru*

Поступила 11.12.2025

После рецензирования 20.01.2026

Принята 02.04.2026

Received 11.12.2025

Revised 20.01.2026

Accepted 02.04.2026

Опыт регионов / Experience of Regions

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1565](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1565)EDN: [YNPKFS](https://www.edn.ru/YNPKFS)

УДК 332



Актуальная деловая повестка аграрной отрасли (на примере предприятий агробизнеса юга России)

Ю.М. Складрова¹, Л.А. Латышева¹, Н.В. Банникова¹,
В.А. Ивашова¹, А.П. Исаенко²

¹Ставропольский государственный аграрный университет,
Ставрополь, Российская Федерация

²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Развитие агробизнеса в современной России набирает темпы и играет важную роль не только в обеспечении продовольственной безопасности, но и в сохранении сельских территорий, традиционного уклада жизни населения. Необходимо системное понимание ключевых проблем, которые, с одной стороны, сдерживают развитие, с другой стороны, именно они позволяют сформулировать актуальную деловую повестку развития аграрной отрасли.

Цель – разработать структурную модель проблемного поля сельскохозяйственных предприятий для обоснования актуальной деловой повестки аграрной отрасли на региональном уровне.

Материалы и методы. Экспертный опрос 48 представителей профессионального сообщества финансистов и экономистов сельскохозяйственных предприятий проведен в феврале 2025 года в Ставропольском крае. В информационном блоке вопросов, связанных с оценкой уровня остроты проблем для агропредприятий региона, использована интервальная 7-балльная шкала. База данных экспертного опроса сформирована в статистическом пакете SPSS Statistics (версия 27).

Результаты. Выполнение факторного анализа сгруппировали 18 проблем сельскохозяйственных предприятий в 4 структурных компонента (полная объясненная дисперсия составила 79,993%) актуальной модели проблемного поля агробизнеса Ставропольского края: недостаточная цифровая зрелость и стратегическое планирование в управлении сельскохозяйственным предприятием (47,882%); финансовые ограничения и устаревшая инфраструктура в агробизнесе (15,070%);

недостаточная интеграция и эффективность маркетинга в агропромышленном комплексе (11,050%); экономические и кадровые барьеры для цифровизации сельскохозяйственных процессов (5,992%).

Актуальная деловая повестка аграрной отрасли на региональном уровне представлена основными направлениями: развитие стратегического планирования, цифровизация производственных процессов, внедрение новых механизмов финансирования агропредприятий, обновление материально-технической базы, интеграция ресурсной базы и системное решение кадровых вопросов.

Ключевые слова: сельскохозяйственная отрасль; иерархия проблемного поля аграрных предприятий; экспертное мнение; цифровизация сельскохозяйственных процессов

Для цитирования. Скларова, Ю. М., Латышева, Л. А., Банникова, Н. В., Ивашова, В. А., & Исаенко, А. П. (2026). Актуальная деловая повестка аграрной отрасли (на примере предприятий агробизнеса юга России). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 627-649. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1565>

Current business agenda of the agrarian industry (on the example of agribusiness enterprises in the south of Russia)

Yu.M. Sklyarova¹, L.A. Latysheva¹, N.V. Bannikova¹,
V.A. Ivashova¹, A.P. Isaenko²

¹Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russian Federation

²Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. The development of agribusiness in modern Russia is gaining momentum and plays a vital role not only in ensuring food security but also in preserving rural areas and the traditional way of life of the population. A systematic understanding of the key issues that, on the one hand, hinder development, is essential, while, on the other, they enable the formulation of a relevant business agenda for the development of the agricultural sector.

Purpose. To develop a structural model of the problematic field of agricultural enterprises to substantiate the current business agenda of the agricultural sector at the regional level.

Materials and methods. An expert survey of 48 representatives of the professional community of financiers and economists of agricultural enterprises was conducted in February 2025 in the Stavropol Territory. In the information block of issues related to

assessing the level of severity of problems for agricultural enterprises in the region, an interval 7-point scale was used. The expert survey database is formed in the statistical package SPSS Statistics (version 27).

Results. Performance of factor analysis grouped 18 problems of agricultural enterprises into 4 structural components (the full explained variance was 79.993%) of the current model of the problem field of agribusiness of the Stavropol Territory: insufficient digital maturity and strategic planning in the management of an agricultural enterprise (47,882%); financial constraints and outdated infrastructure in agribusiness (15,070%); insufficient integration and efficiency of marketing in the agro-industrial complex (11,050%); economic and personnel barriers to digitalization of agricultural processes (5,992%).

The current business agenda of the agricultural industry at the regional level is represented by the main areas: the development of strategic planning, digitalization of production processes, the introduction of new mechanisms for financing agricultural enterprises, updating the material and technical base, integrating the resource base and systematically resolving personnel issues.

Keywords: agricultural industry; hierarchy of the problem field of agricultural enterprises; expert opinion; digitalization of agricultural processes

For citation. Sklyarova, Yu. M., Latysheva, L. A., Bannikova, N. V., Ivashova, V. A., & Isaenko, A. P. (2026). Current business agenda of the agrarian industry (on the example of agribusiness enterprises in the south of Russia). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 627-649. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1565>

Введение

Сельское хозяйство относится к системообразующим отраслям экономики любой страны. Несмотря на то что доля сельского хозяйства в ВВП может быть небольшой, особенно в развитых странах, его мультипликативный эффект огромен. Аграрный сектор является драйвером развития ряда отраслей промышленности, а также торговли, логистики, научных исследований. От состояния и темпов роста сельскохозяйственного производства зависят продовольственная безопасность, социальная стабильность, геополитическое влияние государства.

Обзор литературных источников, опубликованных в различных российских журналах в 2022-2025 гг., показал, что среди многочисленных проблем, оказывающих сдерживающее влияние на развитие аграрного сектора российской экономики в современных условиях, основное внимание ученые уделяют следующим вопросам.

Прежде всего, значительная часть публикаций посвящена различным препятствиям на пути процессов цифровизации сельского хозяйства. В центре внимания авторов находятся вопросы недостаточного развития цифровой инфраструктуры, дефицита специалистов с необходимыми компетенциями, ограниченности финансовых ресурсов у сельхозтоваропроизводителей при низком уровне государственной поддержки [2; 5; 12], отсутствия готовности и мотивации к изменениям, в том числе в секторе малого и среднего агробизнеса [7; 9; 23], наличия существенных внутриорганизационных цифровых разрывов [18].

Еще одна важная для сельскохозяйственного производства проблема – это дефицит квалифицированных кадров, причинами которого являются низкая заработная плата, недостаточный уровень развития инфраструктуры сельских территорий, структурное несоответствие между спросом на рабочую силу и ее предложением [3; 4; 8; 21], психологические факторы и проблемы в системе аграрного образования [14; 24].

Большое внимание в научной литературе уделяется вопросам технико-технологической модернизации и инновационно-инвестиционного обеспечения сельского хозяйства. Ученые рассматривают высокий уровень изношенности машинно-тракторного парка [6; 22], сокращение энергетических мощностей [11], отсутствие на государственном уровне эффективного механизма финансирования инновационных проектов [15], тенденции технологического регресса и слабую инвестиционную привлекательность отрасли [16].

Рассматривая внешние для сельского хозяйства проблемы, ученые уделяют внимание вопросам ценообразования и ценового диспаритета [1; 13; 25], ухудшению ситуации с кредитованием [26], совершенствованию агрострахования [20].

Очевидно, что каждая из перечисленных проблем имеет свое значение, однако в условиях ограниченности ресурсов для того, чтобы выделить наиболее значимые векторы развития, на которых, в первую очередь, следует сосредоточить усилия для решения проблем, необходима классификация и ранжирование указанных проблем по степени значимости. Примеры подобных научных исследований представлены в публикациях. Например, систематизация факторов и проблем развития сельского хозяйства проведена на основе монографического метода и SWOT-анализа [19]. Более объективным, на наш взгляд, является исследование проблем сельскохозяйственного производства на основе изучения мнений специалистов-практиков по поводу важности того или иного направления развития.

Результаты подобных исследований представлены в статьях, где экспертами выступили руководители сельхозорганизаций и главы крестьянских (фермерских) хозяйств Вологодской области [17], представители всех форм хозяйствования Ростовской области [6], главы крестьянских (фермерских) хозяйств Алтайского края [10]. Однако, обзор доступных нам литературных источников показал, что в рамках данного подхода в качестве экспертов не привлекались специалисты финансово-экономических служб сельскохозяйственных предприятий, хотя представителей именно этой профессиональной категории работников можно назвать консультантами и стратегическими партнерами руководства, квалифицированно владеющими компетенциями в области анализа ситуации, выявления резервов роста, экономического обоснования целесообразности принятия тех или иных управленческих решений.

Понимание точек роста и ограничений в работе сельскохозяйственной отрасли является актуальным исследовательским вопросом для авторов за рубежом. Об этом свидетельствуют и многочисленные публикации в наукоёмкой базе Скопус.

Природно-климатические условия оказывают существенное влияние на результаты работы аграрного сектора экономики, особенно это касается отрасли растениеводства. Высокий уровень неопределенности и зависимость урожая от погодных факторов является проблемой, решению которой посвящены исследования математиков. Так авторы статьи Shubhpreet Kaur, Sumati Mahajan, Abhishek Chauhan предлагают новый подход в сценарном прогнозировании для сельскохозяйственного сектора [27]. По мнению авторов, интуиционистская нечеткая теория позволяет справляться с неопределенностью в решении многокритериальных задач нелинейного программирования. На примере сельского хозяйства доказана эффективность предлагаемого метода в реальных сценариях. Применение математических методов в решении практических задач неопределенности логически приводит к использованию цифровых технологий для повышения эффективности аграрной отрасли.

Решение задачи оптимизации использования транспортных средств в аграрном производственном процессе дают Xiang Guo, Zhong-Hua Miao, Quan-Ke Pan, Xuan He [28]. В рамках исследования авторами предложена модель маршрутизации транспортных средств (HLSVRP). Возможность оптимизации транспортных расходов сопряжена с дополнительными измерительными процедурами, анализом данных о передвижениях транспортных средств в рабочих процессах и последующим моделированием

их маршрутизации. Сложные расчетные действия и работа с большими данными нас приводят опять к необходимости использования цифровых технологий в аграрной сфере.

Системный подход в управлении сельскохозяйственными кооперативами внедряют исследователи Sophie Martin, Isabelle Alvarez, François Lavallée [29]. Оптимизация принятия решений обеспечивается через ядро гарантированной жизнеспособности сельскохозяйственного кооператива при имеющихся внутренних и внешних ограничениях. Процедуры автоматизированы и обеспечены цифровыми помощниками.

Умное сельское хозяйство соответствует принципам устойчивого развития, что делает его важнейшим направлением будущего сельского хозяйства [30]. Авторы статьи Teng-Yu Chen, Zhong-Hua Miao, Wei-Min Li, Quan-Ke Pan предлагают математическую модель для решения задачи согласованной работы нескольких БПЛА по распылению пестицидов и максимизации общей площади обрабатываемых полей. В связи с нарастающим дефицитом рабочей силы в сельскохозяйственном производстве цифровые решения могут стать одним из важных направлений развития в будущем.

Общая сельскохозяйственная политика в региональном разрезе необходима для поддержания устойчивого развития территорий, так как связывает многие вопросы: экономическую, экологическую, биологическую и продовольственную безопасность, поступательность социально-экономического развития, занятость населения сельских территорий. Авторы статьи Mario Benini, Emanuele Blasi, Paolo Detti, Lorenzo Fosci в своем исследовании рассматривают проблемы распределения сельскохозяйственных культур на пахотных землях с учетом принципов севооборота и стратегий диверсификации, продвигаемых устойчивым сельским хозяйством [31]. Разработаны многолетние модели севооборотов с максимизацией прибыли для фермерских хозяйств и с учетом ограничений национального законодательства Италии в области сельского хозяйства. Данный подход мы видим еще в ряде исследований [37].

Развитие технологических процессов в сельском хозяйстве привело к активному использованию пластмасс и дало возможность получить многочисленные преимущества для агропродовольственного сектора. Вместе с тем, возникла проблема утилизации по истечении срока использования пластмассовых объектов в аграрном производстве и оценке влияния на биологическую безопасность продукции и экологию почвы микро и нано пластиковых частиц. Оценке данного влияния посвящена статья Demetres Briassoulis [32]. По мнению исследователя, необходимо разработать стра-

тегии и политику снижения рисков на региональном и государственном уровне в связи с массовым использованием пластика в работе сельскохозяйственных предприятий. Таким образом, для нашего исследования актуальными являются два основных тезиса этого исследования: развитие технологических процессов не должно ухудшать экологическую и биологическую безопасность производимой сельскохозяйственной продукции и участие государственной и региональной власти необходимо для регулирования системных вопросов в аграрной отрасли и поддержания стратегии устойчивого развития сельских территорий.

Важным аспектом деятельности сельскохозяйственной отрасли является устойчивое развитие цепочки поставок сельскохозяйственной продукции. Актуальность этого вопроса возрастает в связи с расширением практик точного управления сельскохозяйственной деятельностью. Авторы статьи Weihua Liu, Shuang Wei, Siyu Wang, Ming K. Lim, Yujie Wang на основе результатов анализа выделили 4 основные области, которые требуют улучшения в цепочках поставок сельскохозяйственной продукции: согласование цепочек поставок; поддержка производственных ресурсов, научно-технологическое оборудование и построение структурных систем [33]. Таким образом, усложнение любого процесса требует цифровых помощников и дополнительного внимания к системному решению вопросов координации деятельности.

Устойчивое развитие сельского хозяйства связано с развитием инструментов прогнозирования. Особенно большое значение прогнозирования из-за сезонности и неравномерности загрузки производственных мощностей и потребностей в финансовом обеспечении ряда финансово емких процессов. Так, например, в растениеводстве это посевной период, период внесения удобрений, этап уборки сельскохозяйственных культур. Авторы статьи Fajar Delli Wihartiko, Sri Nurdianti, Agus Bueno, Edi Santosa предлагают прогностическую модель, разработанную на основе многолетних наблюдений за процессами ценообразования. Результаты показывают важность и высокую точность прогноза на основе изменений временных рядов [34]. Построение оптимизационных моделей набирает актуальность и в решении задач безопасной и стабильной работы сельскохозяйственной техники [35]. Ряд ученых отмечает необходимость включения в исследовательские процедуры оптимизации производственных процессов работников экономических служб, ученых-социологов, экологов и других [36].

В целом проведенный анализ публикаций позволяет сформулировать ряд выводов:

1. Устойчивое развитие агробизнеса связано с решением проблем научного и практического уровней: расширением практик прогнозирования технико-технологических, финансово-экономических, природно-биологических процессов в сельскохозяйственном производстве.

2. Региональная сельскохозяйственная политика необходима для устойчивого развития территорий: она интегрирует ключевые экономические процессы – спрос и предложение на аграрном рынке, ценовую динамику, издержки и доходность; инвестиции и технологический прогресс; факторы производства (земля, труд, капитал, знания) и их доходы; занятость и мобильность рабочей силы; региональные цепочки добавленной стоимости и кооперацию; риски биологической и экологической устойчивости и продовольственную безопасность через устойчивые поставки; а также институты и координацию между уровнями власти. В региональном контексте аграрная политика становится ядром поступательного развития, связывая экономические, экологические, биологические и продовольственные аспекты и обеспечивая занятость сельского населения.

3. Внедрение цифровых помощников и дополнительное внимание к системному решению вопросов координации производственной деятельности и сбыта позволит своевременно решать стратегические вопросы развития сельхозпредприятий.

4. В числе критических точек развития – внимание к экологическому и биологическому контролю качества на всех этапах производственного цикла в аграрном секторе экономики.

Хотя существуют попытки систематизировать факторы (монографические методы, SWOT) и опираться на мнения специалистов-практиков, исследования часто не привлекают специалистов финансово-экономических служб, что ограничивает экономическую обоснованность решений. Нужна классификация и ранжирование проблем по значимости для рационального распределения ресурсов. В идеале – междисциплинарные команды экономистов, социологов, экологов и др. с включением экономических служб предприятий в экспертные процедуры; развитие прогнозирования, оптимизация и моделирование сельскохозяйственных процессов и цепочек поставок. В связи с актуальностью исследовательского вопроса была сформулирована цель исследования.

Цель исследования – разработать структурную модель проблемного поля сельскохозяйственных предприятий для обоснования актуальной деловой повестки аграрной отрасли на региональном уровне.

Материалы и методы

Теоретические выводы и обобщения положены в основу разработки инструментария экспертного опроса специалистов агропредприятий Ставропольского края, занятых в финансово-экономической и аналитической работе агробизнеса. Экспертный опрос представителей профессионального сообщества финансистов и экономистов сельскохозяйственных предприятий проведен в феврале 2025 года в Ставропольском крае. Сбор информации осуществлен в цифровом формате в гугл-форме. Всего в опросе приняли участие 48 человек. В информационном блоке вопросов (перечень представлен в таблице 2), связанных с оценкой уровня остроты проблем для агропредприятий региона, использована интервальная 7-балльная шкала. 1 балл показывает практически отсутствие данной проблемы в деятельности сельхозпредприятия. 7 баллов – проблема перед предприятием стоит крайне остро. Эксперты могли поставить любое промежуточное значение. База данных экспертного опроса сформирована в статистическом пакете SPSS Statistics (версия 27).

Результаты и обсуждение

Применение статистических процедур факторного анализа для разработки структурной модели значимых проблем сельскохозяйственных предприятий Ставропольского края дает возможность определения полной объясненной дисперсии. По результатам статистической обработки базы данных экспертного опроса в программе SPSS Statistics (версия 27) полная объясненная дисперсия составила 79,993% и определилась 4 компонентами. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Полная объясненная дисперсия

Table 1. Total Explained Variance

Ком- по- нент	Initial eigenvalues			Sums of squares of extraction loads			Sums of squares of rotational loads		
	Total	Discrep- ancy %	Cumula- tive %	Total	Discrep- ancy %	Cumula- tive %	Total	Discrep- ancy %	Cumula- tive %
1	8,619	47,882	47,882	8,619	47,882	47,882	8,619	47,882	47,882
2	2,713	15,070	62,952	2,713	15,070	62,952	2,713	15,070	62,952
3	1,989	11,050	74,002	1,989	11,050	74,002	1,989	11,050	74,002
4	1,078	5,992	79,993	1,078	5,992	79,993	1,078	5,992	79,993
5	0,895	4,972	84,965						
6	0,763	4,240	89,205						
7	0,495	2,750	91,955						

8	0,389	2,164	94,119						
9	0,299	1,660	95,779						
10	0,240	1,335	97,114						
11	0,160	0,888	98,002						
12	0,128	0,710	98,712						
13	0,106	0,587	99,300						
14	0,054	0,299	99,599						
15	0,045	0,250	99,849						
16	0,014	0,078	99,927						
17	0,011	0,060	99,987						
18	0,002	0,013	100,000						

Перечисленные 18 проблем в теоретической модели проблемного поля сельскохозяйственных предприятий были оценены участниками экспертного опроса по семибалльной шкале. В результате факторного анализа, выполненного Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization (Rotation converged in 5 iterations), проблемы были сгруппированы в 4 структурных компонента. Данные представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Матрица повернутых компонент, описывающая структуру проблемного поля сельскохозяйственных предприятий Ставропольского края

Table 2. Matrix of rotated components describing the structure of the problem space for agricultural enterprises in the Stavropol Krai

Перечень проблем	Компонент			
	1	2	3	4
1. Низкие темпы внедрения технологических инноваций в процессы производства сельскохозяйственной продукции	0,234	0,595	0,471	-0,137
2. Сохраняющийся диспаритет цен на сельскохозяйственную продукцию и ресурсы для АПК	0,136	0,773	0,236	0,186
3. Проблемы материального обеспечения основного производственного процесса (наличие на рынке и доступность приобретения семенного, посадочного материала, техники и т.п.)	0,228	0,207	0,767	0,054
4. Устаревшая сельскохозяйственная техника, оборудование	0,116	0,867	0,196	0,091
5. Кадровые проблемы (дефицит специалистов и рабочих; недостаточность навыков и низкая мотивированность к внедрению инновационных технологий и т.д.)	0,199	0,580	0,360	0,591
6. Недостаточное внимание предприятия к лучшим практикам развития агробизнеса в регионе и стране	0,870	0,162	0,260	0,287
7. Большие затраты на цифровизацию основных сельскохозяйственных процессов на предприятии	0,173	-0,024	0,253	0,921
8. Проблемы сбыта продукции АПК у предприятий	0,308	0,136	0,675	0,099
9. Отсутствие или слабая работа маркетинговых инструментов на предприятиях АПК	0,337	0,056	0,750	0,259
10. Отсутствие устойчивых межхозяйственных связей в области сбыта, снабжения и т.д.	-0,001	0,123	0,794	0,187

11. Высокая закредитованность предприятия	0,498	0,615	-0,017	0,000
12. Недостаточность обеспечения собственным оборотным капиталом	0,299	0,862	0,021	-0,054
13. Отсутствие возможностей инвестирования в основные средства из-за недостаточности собственных финансовых ресурсов	0,069	0,955	0,052	-0,007
14. Недостаточное понимание значимости экономического анализа для принятия обоснованных решений у руководителей и специалистов предприятия	0,867	0,335	0,060	0,057
15. Недооценка значимости проведения эконометрического анализа для выявления факторов роста доходности	0,837	0,309	0,228	0,044
16. Отсутствие системы планирования текущей и перспективной деятельности на предприятии	0,878	0,165	0,285	0,179
17. Низкий уровень цифровизации анализа и бизнес-процессов в управлении предприятием	0,921	0,151	0,138	0,095
18. Отсутствие необходимого информационно-консультационного сопровождения деятельности финансово-экономической и других служб предприятия	0,786	-0,004	0,507	-0,154

Данные интерпретации структурных элементов модели, описывающей структуру проблемного поля сельскохозяйственных предприятий Ставропольского края, представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Интерпретация структурных элементов модели, описывающей структуру проблемного поля сельскохозяйственных предприятий Ставропольского края

Table 3. Interpretation of the structural elements of the model describing the structure of the problem field of agricultural enterprises in the Stavropol Krai

Структурный компонент модели	Переменные, определяющие содержание структурного компонента с коэффициентом факторной нагрузки	Интерпретация структурного компонента модели
1 структурный компонент	Низкий уровень цифровизации анализа и бизнес-процессов в управлении предприятием (коэффициент факторной нагрузки 0,921); отсутствие системы планирования текущей и перспективной деятельности на предприятии (коэффициент факторной нагрузки 0,878); недостаточное внимание предприятия к лучшим практикам развития агробизнеса в регионе и стране (коэффициент факторной нагрузки 0,870); недостаточное понимание значимости экономического анализа для принятия обоснованных решений у руководителей и специалистов предприятия (коэффициент факторной нагрузки 0,867); недооценка значимости проведения эконометрического анализа для выявления факторов роста доходности (коэффициент факторной нагрузки 0,837); отсутствие необходимого информационно-консультационного сопровождения деятельности финансово-экономической и других служб предприятия (коэффициент факторной нагрузки 0,786).	Недостаточная цифровая зрелость и стратегическое планирование в управлении предприятием.

2 структурный компонент	Отсутствие возможностей инвестирования в основные средства из-за недостаточности собственных финансовых ресурсов (коэффициент факторной нагрузки 0,955); устаревшая сельскохозяйственная техника, оборудование (коэффициент факторной нагрузки 0,867); недостаточность обеспечения собственным оборотным капиталом (коэффициент факторной нагрузки 0,862); сохраняющийся диспаритет цен на сельскохозяйственную продукцию и ресурсы для АПК (коэффициент факторной нагрузки 0,773); высокая закредитованность предприятия (коэффициент факторной нагрузки 0,615); низкие темпы внедрения технологических инноваций в процессы производства сельскохозяйственной продукции (коэффициент факторной нагрузки 0,595).	Финансовые ограничения и устаревшая инфраструктура в агробизнесе.
3 структурный компонент	Отсутствие устойчивых межхозяйственных связей в области сбыта, снабжения и т.д. (коэффициент факторной нагрузки 0,794); отсутствие или слабая работа маркетинговых инструментов на предприятиях АПК (коэффициент факторной нагрузки 0,750); проблемы сбыта продукции АПК у предприятий (коэффициент факторной нагрузки 0,675).	Недостаточная интеграция и эффективность маркетинга в агропромышленном комплексе.
4 структурный компонент	Большие затраты на цифровизацию основных сельскохозяйственных процессов на предприятии (коэффициент факторной нагрузки 0,921); кадровые проблемы (дефицит специалистов и рабочих; недостаточность навыков и низкая мотивированность к внедрению инновационных технологий и т.д.) (коэффициент факторной нагрузки 0,591).	Экономические и кадровые барьеры для цифровизации сельскохозяйственных процессов.

Выполнение факторного анализа методом выделения главных компонент распределили 18 проблем сельскохозяйственных предприятий в 4 структурных компонента актуальной структурной модели проблемного поля агробизнеса Ставропольского края:

1. Недостаточная цифровая зрелость и стратегическое планирование в управлении сельскохозяйственным предприятием. Доля компонента 1 в полной объясненной дисперсии составляет 47,882%.

2. Финансовые ограничения и устаревшая инфраструктура в агробизнесе. Доля компонента 2 в полной объясненной дисперсии составляет 15,070%.

3. Недостаточная интеграция и эффективность маркетинга в агропромышленном комплексе. Доля компонента 3 в полной объясненной дисперсии составляет 11,050%.

4. Экономические и кадровые барьеры для цифровизации сельскохозяйственных процессов. Доля компонента 4 в полной объясненной дисперсии составляет 5,992%.

Проведенное исследование дало возможность получить математически обоснованную структурную модель проблемного поля сельскохозяйствен-

ных предприятий Ставропольского края и выделить критические точки развития агробизнеса.

Заключение

Проведенное исследование актуальной деловой повестки аграрной отрасли на примере предприятий агробизнеса юга России дает возможность сформулировать теоретические и прикладные выводы.

Обзор и анализ научной литературы привели к выработке следующих тезисов.

1. Большая часть публикаций фокусируется на препятствиях на пути цифровизации производственных процессов в сельском хозяйстве: недостаточно развита цифровая инфраструктура, дефицит специалистов с необходимыми компетенциями, ограниченность финансовых ресурсов у сельхозпроизводителей при низком уровне государственной поддержки, отсутствие готовности и мотивации к изменениям (особенно в малом и среднем агробизнесе) и значимые внутриорганизационные цифровые разрывы.

2. Проблемы сельскохозяйственных предприятий тесно связаны с нехваткой квалифицированных кадров: низкая заработная плата, слабое развитие инфраструктуры сельских территорий, структурное несоответствие спроса и предложения рабочей силы, а также психологические факторы и проблемы в системе аграрного образования.

3. В исследованиях уделяется много внимания модернизации технических и технологических процессов: изношенность машино-тракторного парка, сокращение энергетических мощностей, отсутствие на государственном уровне эффективного механизма финансирования инновационных проектов и общая тенденция к регрессу технологий и слабой инвестиционной привлекательности отрасли.

4. Внешние для сельскохозяйственного предприятия экономические условия существенно влияют на устойчивость в целом аграрного сектора. Обсуждаются вопросы ценообразования и ценового диспаритета, ухудшение ситуации с кредитованием, необходимость совершенствования агрострахования; развитие региональной и государственной политики как инструмента поддержки устойчивого развития сельских территорий и цепочек поставок, включая координацию и ресурсное обеспечение агропроизводства. Проблемы в цепочках поставок и координации усилий требуют системного подхода и цифровых инструментов.

В эмпирической части разработана математически обоснованная структурная модель проблемного поля сельскохозяйственных предприя-

тий Ставропольского края и представлена иерархия проблем развития регионального агробизнеса. Структурная модель проблемного поля развития агробизнеса состоит из 4 структурных компонентов, расположенных по степени значимости:

1. Недостаточная цифровая зрелость и стратегическое планирование в управлении предприятием.
2. Финансовые ограничения и устаревшая инфраструктура в агробизнесе.
3. Недостаточная интеграция и эффективность маркетинга в агропромышленном комплексе.
4. Экономические и кадровые барьеры для цифровизации сельскохозяйственных процессов.

Актуальная деловая повестка аграрной отрасли на региональном уровне представлена основными направлениями: развитие стратегического планирования, цифровизация производственных процессов, внедрение новых механизмов финансирования агропредприятий, обновление материально-технической базы, интеграция ресурсной базы и системное решение кадровых вопросов.

Полученные данные исследования могут быть использованы в разработке региональной аграрной политики, направленной на сохранение устойчивости сельскохозяйственной отрасли и сельских территорий Юга России.

Список литературы

1. Барчо, М. Х., & Адаменко, А. А. (2024). Проблема ценового диспаритета как сдерживающий фактор повышения доходности в сельском хозяйстве. *Естественно-гуманитарные исследования*, 1(51), 22–26. EDN: <https://elibrary.ru/QLHOTN>
2. Бута, П. М., & Салиенко, Н. В. (2022). Цифровизация сельского хозяйства: анализ проблем и прогнозирование развития. *Обществознание и социальная психология*, (13-1), 150–158. EDN: <https://elibrary.ru/AGVQKM>
3. Герасимов, А. Н., Григорьева, О. П., & Костюкова, Е. И. (2022). Проблемы занятости населения в сельском хозяйстве. *АПК: экономика, управление*, 1, 30–35. <https://doi.org/10.33305/221-30>. EDN: <https://elibrary.ru/NAMGTE>
4. Дульзон, С. В. (2023). Закрепление кадров в сельском хозяйстве: современные проблемы и мероприятия по содействию трудоустройству. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*, (3), 193–200. <https://doi.org/10.33938/233-193>. EDN: <https://elibrary.ru/IRGZZS>
5. Еремин, С. Г. (2025). Цифровые технологии и большие данные в трансформации сельского хозяйства: возможности и проблемы. *Аграрная наука*, 3, 160–

164. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-160-164>. EDN: <https://elibrary.ru/МРОНУД>
6. Исаева, О. В., & Криничная, Е. П. (2022). Ключевые проблемы функционирования многоукладного сельского хозяйства России, определяющие уровень инновационно-технологического развития отрасли. *Учет и статистика*, 4(68), 41–53. <https://doi.org/10.54220/1596.2023.54.27.005>. EDN: <https://elibrary.ru/DPNVWL>
7. Каманина, А. Н. (2023). Цифровая трансформация экономической деятельности сельского хозяйства: проблемы и перспективы развития. *Вестник евразийской науки*, 15(S1). EDN: <https://elibrary.ru/BQBXPI>
8. Климентова, Э. А., & Дубовицкий, А. А. (2023). Актуальные проблемы использования трудовых ресурсов в контексте формирования устойчивости сельского хозяйства. *Наука и Образование*, 6(3). EDN: <https://elibrary.ru/XSJKZL>
9. Косников, С. Н., Ашикарьян, А. А., & Якимиди, А. П. (2022). Проблемы цифровизации сельского хозяйства. *Естественно-гуманитарные исследования*, 39(1), 154–160. <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2022-1-39-154-160>. EDN: <https://elibrary.ru/FHАОGH>
10. Кундиус, В. А., & Голубева, Е. В. (2022). Проблемы и ограничения развития сельского хозяйства в Алтайском крае. *Grand Altai Research & Education*, 1(17), 26–33. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2410-485X.2022.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/VETHSY>
11. Захарова, Г. П., Сафиуллин, И. Н., Рахматуллина, Л. И., & Огородникова, Е. П. (2024). Материально-техническое обеспечение сельского хозяйства: состояние, проблемы, направления совершенствования. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*, 19(3), 105–111. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2024-105-111>. EDN: <https://elibrary.ru/JPXDXУ>
12. Минеева, Н. Н. (2022). Проблемы цифровизации сельского хозяйства России. *Эпомен*, 67, 35–47. EDN: <https://elibrary.ru/DRLZYQ>
13. Миненко, А. В., & Селиверстов, М. В. (2024). Комплексный подход при решении проблем диспаритета цен в сельском хозяйстве. *Дневник науки*, (5). EDN: <https://elibrary.ru/PUMCSU>
14. Никольский, Я. С. (2024). Кадровый дефицит молодежи в сельском хозяйстве: проблема и вызовы для конкурентоспособности АПК. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*, 8, 235–241. EDN: <https://elibrary.ru/SMFFOO>
15. Овинников, В. А. (2023). Проблемы финансирования инновационных проектов в сельском хозяйстве. *Самара АгроВектор*, 3(3), 3–14. https://doi.org/10.55170/29493536_2023_3_3_3. EDN: <https://elibrary.ru/VLGVHJ>

16. Паршуков, Д. В. (2023). Инвестиционная деятельность в сельском хозяйстве региона: Состояние, проблемы и механизмы стимулирования. *Социально-экономический и гуманитарный журнал*, (4), 56–69. <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2023-4-56-69>. EDN: <https://elibrary.ru/PQHZMZ>
17. Патракова, С. С. (2022). Проблемы развития сельского хозяйства Вологодской области: оценки аграриев. *Вопросы территориального развития*, 10(2). <https://doi.org/10.15838/tdi.2022.2.62.7>. EDN: <https://elibrary.ru/QDNWUC>
18. Плахин, А. Е., Огородникова, Е. С., & Ростовцев, К. В. (2024). Проблемы становления цифровой модели в сельском хозяйстве. *Аграрная наука*, 8, 188–193. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-188-193>. EDN: <https://elibrary.ru/PSDDXA>
19. Шамин, А. Е., Фролова, О. А., Вертакова, Ю. В., et al. (2023). Проблемы развития сельского хозяйства и пути их решения. *Вестник НГИЭИ*, (10), 109–125. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-10-109-125>. EDN: <https://elibrary.ru/AUCMOE>
20. Савкина, Г. М. (2024). Аграрное страхование — как инструмент организационно-экономического механизма обеспечения воспроизводственных процессов в сельском хозяйстве. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*, 9(115), 62–72. <https://doi.org/10.33938/249-62>. EDN: <https://elibrary.ru/WSDUIF>
21. Татаровская, Т. Е. (2024). Проблемы формирования кадрового потенциала организаций сельского хозяйства Самарской области. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*, 5, 75–80. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2024-0-5-75-80>. EDN: <https://elibrary.ru/VUSCZM>
22. Тю, Л. В., & Басарева, В. Г. (2024). Проблемы инновационно-инвестиционного обеспечения сельского хозяйства. *Экономика сельского хозяйства России*, 4, 2–9. <https://doi.org/10.32651/244-2>. EDN: <https://elibrary.ru/TAWGOK>
23. Шинделова, О. С., & Гаврюк, С. А. (2024). Идентификация основных проблем и вызовов в области цифровой трансформации в сельском хозяйстве: роль и место малых форм хозяйствования. *Инновации и продовольственная безопасность*, 4(46), 159–169. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2024-46-4-159-169>. EDN: <https://elibrary.ru/THQGHD>
24. Щетинина, И. В., & Деревянко, Ю. О. (2022). Проблемы сохранения и развития человеческого капитала в сельском хозяйстве (на примере некоторых сибирских регионов). *Регион: Экономика и Социология*, (3), 212–238. <https://doi.org/10.15372/REG20220309>. EDN: <https://elibrary.ru/XSQZGP>
25. Эвиева, Б. Э., Самаева, Е. В., & Эрдниева, Э. В. (2023). Проблемы сельского хозяйства Калмыкии. *Экономическая политика и финансовые ресурсы*, 2(3), 36–44. <https://doi.org/10.53315/2949-1177-2023-2-3-36-44>. EDN: <https://elibrary.ru/LXWAGS>

26. Юрченко, Т. В., Попова, М. И., & Марьяненко, В. П. (2024). Отраслевые проблемы кредитования в условиях повышенной ключевой ставки (на примере сельского хозяйства). *Экономика и управление: проблемы, решения*, 6(5), 200–206. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.05.06.025>. EDN: <https://elibrary.ru/TJHDSA>
27. Kaur, S., Mahajan, S., & Chauhan, A. (2025). Modified γ -operator technique for intuitionistic fuzzy multi-objective nonlinear programming problems with application in agriculture. *Expert Systems with Applications*, 273, 126874. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126874>
28. Guo, X., Miao, Z.-H., Pan, Q.-K., & He, X. (2024). Hybrid loading situation vehicle routing problem in the context of agricultural harvesting: A reconstructed MOEA/D with parallel populations. *Swarm and Evolutionary Computation*, 91, 101730. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101730>. EDN: <https://elibrary.ru/YGZGVI>
29. Martin, S., Alvarez, I., & Lavallée, F. (2024). Solving viability problems in dynamic games using individual strategies derived from guaranteed viability kernels: Application to an agricultural cooperative model. *Automatica*, 167, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111752>
30. Chen, T.-Y., Miao, Z.-H., Li, W.-M., & Pan, Q.-K. (2024). A learning-based memetic algorithm for a cooperative task allocation problem of multiple unmanned aerial vehicles in smart agriculture. *Swarm and Evolutionary Computation*, 91, 101694. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101694>
31. Benini, M., Blasi, E., Detti, P., & Fosci, L. (2023). Solving crop planning and rotation problems in a sustainable agriculture perspective. *Computers & Operations Research*, 159, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106316>
32. Briassoulis, D. (2023). Agricultural plastics as a potential threat to food security, health, and environment through soil pollution by microplastics: Problem definition. *Science of The Total Environment*, 892, 164533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164533>. EDN: <https://elibrary.ru/JNVRDJ>
33. Liu, W., Wei, S., Wang, S., Lim, M. K., & Wang, Y. (2022). Problem identification model of agricultural precision management based on smart supply chains: An exploratory study from China. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131622. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131622>
34. Wihartiko, F. D., Nurdianti, S., Buono, A., & Santosa, E. (2023). Solving agricultural price recommendation problem using smart reading algorithms. *Procedia Computer Science*, 217, 784–795. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.275>
35. Han, J., Xiang, Q., Zeng, B., Lei, Y., & Luo, L. (2022). A multi-objective dynamic covering location problem for hierarchical agricultural machinery maintenance facilities. *Knowledge-Based Systems*, 252, 109462. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2022.109462>

36. De Groote, H. (2022). Economic analysis of pest problems in agriculture and food chains in Africa. *Current Opinion in Insect Science*, 54, 100969. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100969>
37. Kuila, D., & Ghosh, S. (2022). Aspects, problems and utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.crimi-cr.2022.100107>

References

1. Barcho, M. Kh., & Adamenko, A. A. (2024). The problem of price disparity as a constraining factor in increasing profitability in agriculture. *Natural and Humanitarian Research*, 1(51), 22–26. EDN: <https://elibrary.ru/QLHOTN>
2. Buta, P. M., & Salienko, N. V. (2022). Digitalization of agriculture: Analysis of problems and forecasting of development. *Social Studies and Social Psychology*, (13-1), 150–158. EDN: <https://elibrary.ru/AGVQKM>
3. Gerasimov, A. N., Grigorieva, O. P., & Kostyukova, E. I. (2022). Problems of employment in agriculture. *AIC: Economics and Management*, 1, 30–35. <https://doi.org/10.33305/221-30>. EDN: <https://elibrary.ru/NAMGTE>
4. Dulzon, S. V. (2023). Staff retention in agriculture: Current problems and measures to promote employment. *Economics, Labor, and Management in Agriculture*, (3), 193–200. <https://doi.org/10.33938/233-193>. EDN: <https://elibrary.ru/IRGZZS>
5. Eremin, S. G. (2025). Digital technologies and big data in the transformation of agriculture: Opportunities and challenges. *Agricultural Science*, 3, 160–164. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-160-164>. EDN: <https://elibrary.ru/MPOHUD>
6. Isaeva, O. V., & Krinichnaya, E. P. (2022). Key problems in the functioning of multi-structure agriculture in Russia determining the level of innovative and technological development of the sector. *Accounting and Statistics*, (4), 41–53. <https://doi.org/10.54220/1596.2023.54.27.005>. EDN: <https://elibrary.ru/DPNVWL>
7. Kamanina, A. N. (2023). Digital transformation of economic activities in agriculture: Problems and development prospects. *Bulletin of Eurasian Science*, 15(S1). EDN: <https://elibrary.ru/BQBXPI>
8. Klimentova, E. A., & Dubovitsky, A. A. (2023). Current problems of labor resource utilization in the context of building sustainable agriculture. *Science and Education*, 6(3). EDN: <https://elibrary.ru/XSJKZL>
9. Kosnikov, S. N., Ashikaryan, A. A., & Yakimidi, A. P. (2022). Problems of digitalization in agriculture. *Natural and Humanitarian Research*, 39(1), 154–160. <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2022-1-39-154-160>. EDN: <https://elibrary.ru/FHAOGH>
10. Kundius, V. A., & Golubeva, E. V. (2022). Problems and limitations of agricultural development in the Altai Krai. *Grand Altai Research & Education*, 1(17), 26–33.

- <https://doi.org/10.25712/ASTU.2410-485X.2022.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/VETHSY>
11. Zakharova, G. P., Safiullin, I. N., Rakhmatullina, L. I., & Ogorodnikova, E. P. (2024). Material and technical support of agriculture: State, problems, and directions for improvement. *Bulletin of Kazan State Agrarian University*, 19(3), 105–111. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2024-105-111>. EDN: <https://elibrary.ru/JPXDXY>
 12. Mineeva, N. N. (2022). Problems of digitalization of agriculture in Russia. *Epomen*, 67, 35–47. EDN: <https://elibrary.ru/DRLZYQ>
 13. Minenko, A. V., & Seliverstov, M. V. (2024). An integrated approach to solving the problems of price disparity in agriculture. *Diary of Science*, (5). EDN: <https://elibrary.ru/PUMCSU>
 14. Nikolsky, Ya. S. (2024). Youth staff shortage in agriculture: The problem and challenges to the competitiveness of the agro-industrial complex. *Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*, 8, 235–241. EDN: <https://elibrary.ru/SMFFOO>
 15. Ovinnikov, V. A. (2023). Problems of financing innovative projects in agriculture. *Samara AgroVector*, 3(3), 3–14. https://doi.org/10.55170/29493536_2023_3_3_3. EDN: <https://elibrary.ru/VLGVHJ>
 16. Parshukov, D. V. (2023). Investment activity in the regional agriculture: Status, problems, and stimulation mechanisms. *Socio-Economic and Humanitarian Journal*, (4), 56–69. <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2023-4-56-69>. EDN: <https://elibrary.ru/PQHZMZ>
 17. Patrakova, S. S. (2022). Problems of agricultural development in the Vologda Oblast: Farmers' assessments. *Territorial Development Issues*, 10(2). <https://doi.org/10.15838/tdi.2022.2.62.7>. EDN: <https://elibrary.ru/QDNWUC>
 18. Plakhin, A. E., Ogorodnikova, E. S., & Rostovtsev, K. V. (2024). Problems in establishing a digital model in agriculture. *Agricultural Science*, 8, 188–193. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-188-193>. EDN: <https://elibrary.ru/PSDDXA>
 19. Shamin, A. E., Frolova, O. A., Vertakova, Yu. V., et al. (2023). Problems of agricultural development and ways to solve them. *Bulletin of NGIEI*, (10), 109–125. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-10-109-125>. EDN: <https://elibrary.ru/AUCMOE>
 20. Savkina, G. M. (2024). Agricultural insurance as a tool of the organizational and economic mechanism to ensure reproduction processes in agriculture. *Economics, Labor, and Management in Agriculture*, (9), 62–72. <https://doi.org/10.33938/249-62>. EDN: <https://elibrary.ru/WSDUIF>
 21. Tatarovskaya, T. E. (2024). Problems of forming the human resource potential of agricultural organizations in the Samara Oblast. *Economics of Agricultural and Processing Enterprises*, 5, 75–80. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2024-0-5-75-80>. EDN: <https://elibrary.ru/VUSCZM>

22. Tyu, L. V., & Basareva, V. G. (2024). Problems of innovation and investment support in agriculture. *Russian Agricultural Economics*, 4, 2–9. <https://doi.org/10.32651/244-2>. EDN: <https://elibrary.ru/TAWGOK>
23. Shindelova, O. S., & Gavryuk, S. A. (2024). Identification of the main problems and challenges in the field of digital transformation in agriculture: The role and place of small-scale farming. *Innovations and Food Security*, (4), 159–169. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2024-46-4-159-169>. EDN: <https://elibrary.ru/THQGHD>
24. Shchetinina, I. V., & Derevyanko, Yu. O. (2022). Problems of preserving and developing human capital in agriculture (a case study of some Siberian regions). *Region: Economics and Sociology*, (3), 212–238. <https://doi.org/10.15372/REG20220309>. EDN: <https://elibrary.ru/XSQZGP>
25. Evieva, B. E., Samaeva, E. V., & Erdnieva, E. V. (2023). Problems of agriculture in Kalmykia. *Economic Policy and Financial Resources*, 2(3), 36–44. <https://doi.org/10.53315/2949-1177-2023-2-3-36-44>. EDN: <https://elibrary.ru/LXWAGS>
26. Yurchenko, T. V., Popova, M. I., & Maryanenko, V. P. (2024). Sectoral problems of lending under elevated key rates (a case study of agriculture). *Economics and Management: Problems and Solutions*, 6(5), 200–206. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.05.06.025>. EDN: <https://elibrary.ru/TJHDSA>
27. Kaur, S., Mahajan, S., & Chauhan, A. (2025). Modified γ -operator technique for intuitionistic fuzzy multi-objective nonlinear programming problems with application in agriculture. *Expert Systems with Applications*, 273, 126874. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126874>
28. Guo, X., Miao, Z.-H., Pan, Q.-K., & He, X. (2024). Hybrid loading situation vehicle routing problem in the context of agricultural harvesting: A reconstructed MOEA/D with parallel populations. *Swarm and Evolutionary Computation*, 91, 101730. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101730>. EDN: <https://elibrary.ru/YGZGVI>
29. Martin, S., Alvarez, I., & Lavallée, F. (2024). Solving viability problems in dynamic games using individual strategies derived from guaranteed viability kernels: Application to an agricultural cooperative model. *Automatica*, 167, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111752>
30. Chen, T.-Y., Miao, Z.-H., Li, W.-M., & Pan, Q.-K. (2024). A learning-based memetic algorithm for a cooperative task allocation problem of multiple unmanned aerial vehicles in smart agriculture. *Swarm and Evolutionary Computation*, 91, 101694. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101694>
31. Benini, M., Blasi, E., Detti, P., & Fosci, L. (2023). Solving crop planning and rotation problems in a sustainable agriculture perspective. *Computers & Operations Research*, 159, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106316>
32. Briassoulis, D. (2023). Agricultural plastics as a potential threat to food security, health, and environment through soil pollution by microplastics: Problem defini-

- tion. *Science of The Total Environment*, 892, 164533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164533>. EDN: <https://elibrary.ru/JNVRDJ>
33. Liu, W., Wei, S., Wang, S., Lim, M. K., & Wang, Y. (2022). Problem identification model of agricultural precision management based on smart supply chains: An exploratory study from China. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131622. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131622>
34. Wihartiko, F. D., Nurdianti, S., Buono, A., & Santosa, E. (2023). Solving agricultural price recommendation problem using smart reading algorithms. *Procedia Computer Science*, 217, 784–795. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.275>
35. Han, J., Xiang, Q., Zeng, B., Lei, Y., & Luo, L. (2022). A multi-objective dynamic covering location problem for hierarchical agricultural machinery maintenance facilities. *Knowledge-Based Systems*, 252, 109462. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2022.109462>
36. De Groote, H. (2022). Economic analysis of pest problems in agriculture and food chains in Africa. *Current Opinion in Insect Science*, 54, 100969. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100969>
37. Kuila, D., & Ghosh, S. (2022). Aspects, problems and utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100107>

ВКЛАД АВТОРОВ

Склярова Ю.М.: разработка концепции исследования и дизайна статьи, редактирование статьи с целью повышения ее научной значимости.

Латышева Л.А.: подготовка обзора российских и зарубежных публикаций.

Банникова Н.В.: окончательное одобрение версии работы, которая будет опубликована.

Ивашова В.А.: организация сбора, анализа и интерпретации полученных данных.

Исаенко А.П.: организация сбора, анализа и интерпретации полученных данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yulia M. Sklyarova: development of the research concept and article design, editing the article to enhance its scientific significance.

Lyudmila A. Latysheva: preparation of the review of Russian and international publications.

Natalya V. Bannikova: final approval of the version of the work to be published.

Valentina A. Ivashova: organization of data collection, analysis, and interpretation.

Alexander P. Isaenko: organization of data collection, analysis, and interpretation.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Склярова Юлия Михайловна, доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой финансового менеджмента
Ставропольский государственный аграрный университет
пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
k.finmen@stgau.ru

Латышева Людмила Анатольевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры финансового менеджмента
Ставропольский государственный аграрный университет
пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
k.finmen@stgau.ru

Банникова Наталья Владимировна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры агроэкономики и маркетинга
Ставропольский государственный аграрный университет
пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
nbannikova@mail.ru

Ивашова Валентина Анатольевна, кандидат социологических наук, доцент, доцент кафедры агроэкономики и маркетинга
Ставропольский государственный аграрный университет
пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
vivashov@mail.ru

Исаенко Александр Павлович, кандидат экономических наук, доцент кафедры общего и проектного менеджмента
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
Ленинский проспект, 49/2, г. Москва, 125167, Российская Федерация
isaenko.aleksandr@bk.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Yulia M. Sklyarova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Financial Management
Stavropol State Agrarian University
12, Zootekhnicheskij Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation *k.finmen@stgau.ru*
SPIN-code: 8669-5239
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7999-2679>
ResearcherID: N-9662-2016
Scopus Author ID: 57201291889

Lyudmila A. Latysheva, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Financial Management

Stavropol State Agrarian University

12, Zootekhnicheskiiy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation k.finmen@stgau.ru

SPIN-code: 8150-9686

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7012-061X>

ResearcherID: MIO-6811-2025

Scopus Author ID: 57190674832

Natalia V. Bannikova, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Agroecconomics and Marketing

Stavropol State Agrarian University

12, Zootekhnicheskiiy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation nbannikova@mail.ru

SPIN-code: 6690-6110

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9796-9656>

ResearcherID: AAG-6241-2019

Scopus Author ID: 56674431600

Valentina A. Ivashova, Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agroecconomics and Marketing

Stavropol State Agrarian University

12, Zootekhnicheskiiy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation vivashov@mail.ru

SPIN-code: 2416-6150

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7670-7278>

ResearcherID: AAR-6517-2021

Scopus Author ID: 56203510400

Alexander P. Isaenko, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of General and Project Management

Financial University under the Government of the Russian Federation

49/2, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125167, Russian Federation isaenko.aleksandr@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7086-7724>

Поступила 08.01.2026

После рецензирования 26.02.2026

Принята 16.03.2026

Received 08.01.2026

Revised 26.02.2026

Accepted 16.03.2026

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научно-практический рецензируемый журнал **Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture** издается с целью пропаганды фундаментальных и фундаментально-прикладных региональных достижений в области медицины, биологии, сельского хозяйства и смежных дисциплин на территории Российской Федерации и за рубежом.

Требования к оформлению статей

Объем рукописи	15-24 страницы формата А4, включая таблицы, иллюстрации, список литературы; для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук – 7-10.
Поля	все поля – по 20 мм
Шрифт основного текста	Times New Roman
Размер шрифта основного текста	14 пт
Межстрочный интервал	полуторный
Отступ первой строки абзаца	1,25 см
Выравнивание текста	по ширине
Автоматическая расстановка переносов	включена
Нумерация страниц	не ведется
Формулы	в редакторе формул MS Equation 3.0
Рисунки	по тексту
Ссылки на формулу	(1)
Ссылки на литературу	[2, с.5], цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания

**ЗАПРЕЩАЕТСЯ ИСПОЛЬЗОВАТЬ
ССЫЛКИ-СНОСКИ ДЛЯ УКАЗА-
НИЯ ИСТОЧНИКОВ**

Обязательная структура статьи

УДК

ЗАГЛАВИЕ (на русском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на русском языке)

Аннотация (на русском языке)

Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой
(на русском языке)

ЗАГЛАВИЕ (на английском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на английском языке)

Аннотация (на английском языке)

Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой
(на английском языке)

Текст статьи (на русском языке)

1. Введение.

2. Цель работы.

3. Материалы и методы исследования.

4. Результаты исследования и их обсуждение.

5. Заключение.

6. Информация о конфликте интересов.

7. Информация о спонсорстве.

8. Благодарности.

Список литературы

Библиографический список по ГОСТ Р 7.05-2008

References

Библиографическое описание согласно требованиям журнала

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна (на русском языке)

Электронный адрес

SPIN-код в SCIENCE INDEX:

DATA ABOUT THE AUTHORS

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: дом, улица, город, индекс, страна (на английском языке)

Электронный адрес

AUTHOR GUIDELINES

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture is a multi-field dedicated peer reviewed scientific journal designed to promote both fundamental and applied regional achievements in the field of medicine, biology, agriculture and related sciences on the territory of the Russian Federation and abroad.

Requirements for the articles to be published

Volume of the manuscript	15-24 pages A4 format, including tables, figures, references; for post-graduates pursuing degrees of candidate and doctor of sciences – 7–10.
Margins	all margins –20 mm each
Main text font	Times New Roman
Main text size	14 pt
Line spacing	1.5 interval
First line indent	1,25 cm
Text align	justify
Automatic hyphenation	turned on
Page numbering	turned off
Formulas	in formula processor MS Equation 3.0
Figures	in the text
References to a formula	(1)
References to the sources	[2, p.5], references are given in a single list at the end of the manuscript in the order in which they appear in the text

DO NOT USE FOOTNOTES
AS REFERENCES

Article structure requirements

TITLE (in English)

Author(s): surname and initials (in English)

Abstract (in English)

Keywords: separated with semicolon (in English)

Text of the article (in English)

1. Introduction.

2. Objective.

3. Materials and methods.

4. Results of the research and Discussion.

5. Conclusion.

6. Conflict of interest information.

7. Sponsorship information.

8. Acknowledgments.

References

References text type should be Chicago Manual of Style

DATA ABOUT THE AUTHORS

Surname, first name (and patronymic) in full, job title, academic degree, academic title

Full name of the organization – place of employment (or study) without compound parts of the organizations' names, full registered address of the organization in the following sequence: street, building, city, postcode, country

E-mail address

SPIN-code in SCIENCE INDEX:

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

- Effect of synbiotic supplementation on growth performance, nutrient digestibility, rumen fermentation, and blood metabolites in Arabi lambs**
J.A.A. Bannai, A.N. Khalaf, H.A.J. Al-Galbi, A.A. Almayyahi 11
- Level of CTLA-4 and some other future markers for predicting preeclampsia in pregnant women: a correlation study**
R.A. Abdualhay, A.J.M. Al-Fartosy 28
- Physiological and histopathological changes associated with aluminum induced toxicity on liver in experimental male rats**
N.H. Abd Al-Aziz, I.A. Al-Rufaei, S.A. Abduljaleel 45
- The role of-318C/T and +49A/G polymorphisms in the CTLA-4 gene in systemic lupus erythematosus Iraqi patients**
T.M. Jasiem 60
- Морфофункциональные изменения системы крови и органов периферической иммунной системы у морских свинок при экспериментальном моделировании трихинеллезной инвазии и иммунной недостаточности**
О.Б. Жданова, О.В. Часовских 73

ЭКОЛОГИЯ

- Seasonal fluctuations of aliphatic petroleum hydrocarbons in soil and vegetation: A case study near Al-Qurna oil field, Basrah, Iraq**
Noor A. Ismael, Nayyef M. Azeez, Widad M. Tahir 89
- Популяционная структура комплекса среднеевропейских зеленых лягушек как индикатор геоэкологической ситуации на территории урбанизированных ландшафтов и водных объектах юга среднерусской возвышенности**
А.С. Бархатов, Э.А. Снегин, В.В. Киселев, Е.А. Снегина, А.Г. Корнилов, М.В. Раевская 103

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Using effective moisture content to predict sorptivity

Faris A. Al-Wazzan 129

БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

Генетически детерминированные заболевания симментальской породы крупного рогатого скота: современные вызовы и перспективы селекции (обзор)

*Н.А. Безбородова, О.В. Соколова,
А.В. Зверев, Н.А. Мартынов, Е.В. Романов,
Ч.Р. Юсупова, О.С. Зайцева, А.М. Шаповалова* 142

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

Изучение разных схем защиты посевов сахарной свеклы от сорняков в северо-западной части Центрального Черноземья

*В.А. Гулидова, Р.В. Шұчка, В.Л. Захаров,
В.А. Кравченко, Б.А. Сотников* 176

Оптимизация технологии возделывания сои с использованием инокулянтов и микроудобрений для снижения гербицидной нагрузки

А.Н. Никольский, А.Г. Вишняков, Д.В. Бочкарев, А.В. Бардин 197

Активность агрономически ценных эколого-трофических групп почвенной микробиоты под воздействием природных и агрогенных факторов

*Н.Н. Шулико, А.Ю. Тимохин, А.А. Киселёва,
Е.В. Тукмачева, М.С. Шаповал* 214

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ

Семеноводство *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori в условиях Акмолинской области Казахстана

*Н.В. Малицкая, М.А. Кузнецова, И.Б. Острецова,
С.Е. Жумабаева, О.Д. Шойкин, М.Ж. Аширбеков* 233

**АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ,
ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ**

**Влияние кислотно-основных свойств бурой лесной
кислой почвы на урожайность зеленого чайного листа
(*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) сорта Колхида
в условиях субтропиков России**

А.В. Великий 254

**САДОВОДСТВО, ОВОЩЕВОДСТВО,
ВИНОГРАДАРСТВО И ЛЕКАРСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ**

**Фенотипическое разнообразие
и селекционный потенциал местных форм
абрикоса 'Харджи' (*Prunus armeniaca* L.)
для устойчивого горного садоводства в Армении**

*Ж.А. Акопян, Е.М. Навасардян,
Д.М. Анатов, В.Б. Гогинян, С.А. Мамаджанян,
А.В. Рудов, Г.М. Зароян, Г.С. Габриелян* 277

**ЛЕСОВЕДЕНИЕ,
ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ,
АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ,
ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ**

**Результаты имитационного
моделирования и оптимизации конструктивных
параметров лесных граблей**

*А.А. Платонов, Д.Ю. Дручинин, М.А. Гнусов,
А.В. Школьных, М.А. Попов* 306

ГИГИЕНА

**Нейросетевая классификация
комплексного индекса профессионального
риска здоровью работников агропромышленного
комплекса периферийных зон мегаполиса:
данные Ленинградской области**

Ли Инь, О.Т. Ергунова, А.Б. Титов, А.Г. Сомов 323

**ОБЩЕСТВЕННОЕ ЗДОРОВЬЕ,
ОРГАНИЗАЦИЯ И СОЦИОЛОГИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ,
МЕДИКО-СОЦИАЛЬНАЯ ЭКСПЕРТИЗА**

Валидация прогноза расходов потребителей товаров аптечного ассортимента на основе технологий машинного обучения <i>А.С. Пантелеев, Ж.В. Мироненкова, О.Д. Немятых, Ф.Ш. Сатдарова, Л.М. Габдулхакова</i>	349
--	-----

Закономерности общей уязвимости к посттравматическому стрессовому расстройству и аддикциям у осужденных – участников боевых действий, состоящих на учете у нарколога <i>Н.А. Цветкова, П.А. Кисляков, К.Е. Лагвилава</i>	367
--	-----

Особенности социальной адаптации и поведенческих реакций у подростков, страдающих акне <i>П.И. Тихоненко, Л.Е. Дерягина, Н.С. Цикунова, А.О. Пятибрат</i>	393
---	-----

Жизнестойкость как предиктор доверия к врачу и приверженности лечению у пациентов – участников специальной военной операции и у обычных пациентов <i>И.И. Корягина, В.Г. Маралов, Г.А. Голубева</i>	423
---	-----

Разработка и верификация регрессионной модели для прогнозирования интегрального показателя функционального состояния у работающих лиц пенсионного возраста <i>Е.В. Невзорова, Е.В. Ивашенцева, А.Б. Бобокулов</i>	444
---	-----

Формирование коммуникативной компетенции будущих иностранцев средствами видеоресурсов <i>М.П. Бердина, О.В. Макарова</i>	475
--	-----

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Беспилотные авиационные системы и их влияние на деятельность аграрных предприятий <i>Е.Д. Коровин, А.Е. Трубин, А.Ю. Анисимов, А.Н. Алексахин, С.А. Алексахина</i>	494
--	-----

Young farmers in agriculture: Synthesis of resilience factors to empirical gaps and new conceptual integration design (literature review)*M.Y. Wardhana, Agussabti, M.S. Samsurijan, T.S. Bahri* 519**Исследование технологических свойств нетрадиционных видов муки при производстве мучных кулинарных изделий***А.Т. Васюкова, И.У. Кусова, О.А. Суворов* 537**Повышение эффективности работы газотурбинных двигателей в сфере сельскохозяйственного производства и энергетики***И.А. Иванов, Г.Е. Персиянова* 569**Определение влияния инновационного высокоэнергетического молочносодержащего продукта на живой организм в эксперименте***Е.А. Зубарева, И.А. Ивкова, А.А. Екимова,
А.Ю. Надточий, А.С. Пиляева* 585**ОПЫТ РЕГИОНОВ****Экологическое сельское хозяйство Таджикистана в контексте законодательных новелл: анализ, проблемы и перспективы***Д.С. Саменбетова, О.Ю. Патласов, У.Р. Каримова* 607**Актуальная деловая повестка аграрной отрасли (на примере предприятий агробизнеса юга России)***Ю.М. Складорова, Л.А. Латышева, Н.В. Банникова,
В.А. Ивашова, А.П. Исаенко* 627**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ** 650

CONTENTS

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

- Effect of synbiotic supplementation on growth performance, nutrient digestibility, rumen fermentation, and blood metabolites in Arabi lambs**
J.A.A. Bannai, A.N. Khalaf, H.A.J. Al-Galbi, A.A. Almayyahi 11
- Level of CTLA-4 and some other future markers for predicting preeclampsia in pregnant women: a correlation study**
R.A. Abdualhay, A.J.M. Al-Fartosy 28
- Physiological and histopathological changes associated with aluminum induced toxicity on liver in experimental male rats**
N.H. Abd Al-Aziz, I.A. Al-Rufaei, S.A. Abduljaleel 45
- The role of-318C/T and +49A/G polymorphisms in the CTLA-4 gene in systemic lupus erythematosus Iraqi patients**
T.M. Jasiem 60
- Morphofunctional changes of the blood system and peripheral immune system organs in rabbits during experimental modeling of trichinella invasion and immune deficiency**
O.B. Zhdanova, O.V. Chasovskikh 73

ECOLOGY

- Seasonal fluctuations of aliphatic petroleum hydrocarbons in soil and vegetation: A case study near Al-Qurna oil field, Basrah, Iraq**
Noor A. Ismael, Nayyef M. Azeez, Widad M. Tahir 89
- Population structure of the Central European green frog complex as an indicator of the geoecological situation in urbanized landscapes and water bodies in the south of the Central Russian Upland**
A.S. Barkhatov, E.A. Snegin, V.V. Kiselev, E.A. Snegina, A.G. Kornilov, M.V. Raevskaya 103

SOIL SCIENCE

Using effective moisture content to predict sorptivity

Faris A. Al-Wazzan 129

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

Genetically determined diseases of the Simmental cattle breed: Modern challenges and prospects of breeding (review)

*N.A. Bezborodova, O.V. Sokolova, A.V. Zverev,
N.A. Martynov, E.V. Romanov, Ch.R. Yusupova,
O.S. Zaitseva, A.M. Shapovalova* 142

GENERAL AGRICULTURE AND CROP PRODUCTION

Study of different schemes for protecting sugar beet crops from weeds in the northwestern part of the Central Black Earth Region

*V.A. Gulidova, R.V. Shchuchka, V.L. Zakharov,
V.A. Kravchenko, B.A. Sotnikov* 176

Optimizing soybean production through inoculation and boron foliar feeding in herbicide-stressed environments

A.N. Nikolskii, A.G. Vishnyakov, D.V. Bochkarev, A.V. Bardin 197

Activity of agronomically valuable ecological-trophic groups of soil microbiota under the influence of natural and agrogenic factors

*N.N. Shuliko, A.Y. Timokhin, A.A. Kiseleva,
E.V. Tukmacheva, M.S. Shapoval* 214

BREEDING, SEED PRODUCTION, AND BIOTECHNOLOGY

Seed production of *Aconogonum divaricatum* (L.) Nakai ex T. Mori in the conditions of the Akmola region of Kazakhstan

*N.V. Malitskaya, M.A. Kuznetsova, I.B. Ostretsova,
S.E. Zhumabaeva, O.D. Shoykin, M.Zh. Ashirbekov* 233

AGRICULTURAL CHEMISTRY, SOIL SCIENCE, PLANT PROTECTION AND QUARANTINE

The effect of acid-base properties of brown forest acid soil on the yield of green tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) of the Colchis variety in the subtropical conditions of the Russian Federation

A.V. Velikii 254

HORTICULTURE, VEGETABLE GROWING, VITICULTURE, AND MEDICINAL CROPS

Phenotypic diversity and breeding potential of the ‘Kharji’ apricot landrace (*Prunus armeniaca* L.) for sustainable mountain horticulture in Armenia

*J.A. Akopian, Y.M. Navasardyan, D.M. Anatov, V.B. Goginyan,
S.A. Mamajanyan, A.V. Rudov, G.M. Zaroyan, G.S. Gabrielyan* 277

FOREST SCIENCE, SILVICULTURE, FOREST CULTIVATION, AGROFORESTRY, GREENING, FOREST PYROLOGY, AND FOREST INVENTORY

Results of simulation modeling and optimization of design parameters of forest rake

*A.A. Platonov, D.Yu. Druchinin, M.A. Gnusov,
A.V. Shkolnykh, M.A. Popov* 306

HYGIENE

Neural network classification of a comprehensive occupational health risk index for agricultural workers in the peripheral zones of a megacity: Data from the Leningrad Region

Li Yin, O.T. Ergunova, A.B. Titov, A.G. Somov 323

PUBLIC HEALTH, HEALTH ORGANIZATION, SOCIOLOGY OF HEALTH, MEDICAL AND SOCIAL EXPERTISE

Validation of consumer spending forecasts for pharmacy products based on machine learning technologies

*A.S. Panteleev, Zh.V. Mironenkova, O.D. Nemyatykh,
F.Sh. Satdarova, L.M. Gabdulkhakova* 349

Patterns of general vulnerability to post-traumatic stress disorder and addictions among convicted combatants registered with a narcologist <i>N.A. Tsvetkova, P.A. Kislyakov, K.E. Lagvilava</i>	367
Features of social adaptation and behavioral reactions in adolescents suffering from acne <i>P.I. Tikhonenko, L.E. Deryagina, N.S. Tsikunova, A.O. Pyatibrat</i>	393
Resilience as a predictor of doctor trust and compliance with treatment among patients participating in a special military operation and random patients <i>I.I. Koryagina, V.G. Maralov, G.A. Golubeva</i>	423
Development and verification of a regression model for predicting an integral indicator of functional state in working people of retirement age <i>E.V. Nevzorova, E.V. Ivashentseva, A.B. Bobokulov</i>	444
Developing communicative competence of future foreign doctors using video resources <i>M.P. Berdina, O.V. Makarova</i>	475
МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
Unmanned aerial systems and their impact on the activities of agricultural enterprises <i>E.D. Korovin, A.E. Trubin, A.Yu. Anisimov, A.N. Aleksakhin, S.A. Aleksakhina</i>	494
Young farmers in agriculture: Synthesis of resilience factors to empirical gaps and new conceptual integration design (literature review) <i>M.Y. Wardhana, Agussabti, M.S. Samsurijan, T.S. Bahri</i>	519
Study of the technological properties of non-traditional flour types in the production of flour culinary products <i>A.T. Vasyukova, I.U. Kusova, O.A. Suvorov</i>	537
Improving the efficiency of gas turbine engines in the field of agricultural production and energy <i>I.A. Ivanov, G.E. Persiyanova</i>	569

Determining the effects of an innovative, high-energy, milk-based product on a living organism in an experiment

*E.A. Zubareva, I.A. Ivkova, A.A. Ekimova,
A.Y. Nadtochiy, A.S. Pilyaeva* 585

EXPERIENCE OF REGIONS**Ecological agriculture of Tajikistan in the context of legislative novels:
Analysis, challenges and prospects**

D.S. Samenbetova, O.Yu. Patlasov, U.R. Karimova 607

**Current business agenda of the agrarian industry
(on the example of agribusiness enterprises in the south of Russia)**

*Yu.M. Sklyarova, L.A. Latysheva, N.V. Bannikova,
V.A. Ivashova, A.P. Isaenko* 627

RULES FOR AUTHORS 650

Дата выхода в свет (размещено на сайте) 30.06.2026.

Формат 60×84/16. Объем издания: 38,59 усл. печ. л.

Тираж: печать по требованию (print-on-demand).

Свободная цена.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Авторская Мастерская»
(ИП Давгуненко А.А. ИНН 344210747590), ул. Проезд Добролюбова 3 стр. 2,
г. Москва, 127254, Россия.