

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

Siberian journal **of Life Sciences and Agriculture**

SjLSA

www.discover-journal.ru



Volume 18, Number 2
2026

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

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

**Volume 18, Number 2
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, № 2, 2026 / Vol. 18, No 2, 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, МБА, 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 (Мггиши, 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)

Поползухина 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 (VNISSOK, 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. Gryzakin, 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: 10.12731/2658-6649-2026-18-2-1781

EDN: ONUTCZ

УДК 159.923:612.017:612.182:332.1



Влияние типа темперамента на десинхроноз параметров артериального давления у жителей северного региона

Д.В. Суринов¹, О.Н. Рагозин¹, И.А. Шевнин¹, А.А. Бейсембаев²¹БУ «Ханты-Мансийская государственная медицинская академия»,
Ханты-Мансийск, Российская Федерация²Кыргызско-Российский Славянский университет имени первого Президента
Российской Федерации Б.Н. Ельцина, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация

Обоснование. В структуре сердечно-сосудистых заболеваний артериальная гипертензия (АГ) является одной из самых распространенных патологий. Распространенность АГ в России достигла 53,9%. Вследствие воздействия на организм неблагоприятных факторов Севера, развиваются нарушения структуры циркадианных ритмов, в том числе и ритмов АД. Многие авторы расценивают это как сигнал об угрозе развития АГ.

Цель. Изучить структуру ритмов параметров АД у жителей северного региона России (г. Ханты-Мансийск) с артериальной гипертензией в зависимости от типа темперамента.

Материалы и методы. Всем участникам исследования проводили оценку АД с помощью общепринятого метода – СМАД. Оценку типа ВНД осуществляли с помощью теста-опросника ЕРІ Айзенка в модификации Шмелева А. Г., по результатам тестирования каждый участник исследования был отнесен к одному из следующих типов темперамента: меланхолик, сангвиник, холерик или флегматик. С целью обнаружения циркадианных и ультрадианных ритмов, а также десинхроноза использовали компьютерную программу «Исследование биологических ритмов методом вейвлет-анализа». Для оценки ритмов параметров АД в зависимости от типа темперамента общая выборка была разделена на группу без АГ и группу с АГ. С целью выявления различий параметров АД у лиц с разным темпераментом был применен дисперсионный анализ Краскала-Уоллиса.

Результаты. В группе лиц без АГ у холериков выявлены статистически значимо более высокие значения САД *ночь* и ДАД *ночь* по сравнению с меланхоликами. Также

у холериков наблюдаются статистически значимо более высокие значения ДАД *ночь* по сравнению с флегматиками. В группе лиц с АГ наблюдается статистически значимо более высокое значение ДАД *день* у сангвиников по сравнению с меланхоликами.

В группе без АГ демонстрирует лица с холерическим, а также с флегматическим типом темперамента имеют циркадианные ритмы: САД, ДАД у холериков и САД, ДАД и ЧСС у флегматиков. У сангвиников наблюдаются ультрадианные ритмы САД и ДАД, а также дезорганизация ритма ЧСС. У меланхоликов наблюдается дезорганизация ритмов САД, ДАД и ЧСС – что свидетельствует о десинхронозе.

В группе с АГ у сангвиников отмечаются циркадианные ритмы САД, ДАД и ЧСС. У флегматиков один циркадианный ритм – САД, а у холериков два ультрадианных ритма – ДАД и ЧСС. У меланхоликов наблюдается дезорганизация ритмов САД и ДАД и циркадианный ритм ЧСС.

Заключение. Учитывая результаты исследования при проведении диагностики АГ и оценки эффективности антигипертензивной хронотерапии необходимо учитывать тип высшей нервной деятельности.

Ключевые слова: Север; десинхроноз; циркадианный ритм; ультрадианный ритм; артериальное давление; артериальная гипертензия

Для цитирования. Суринов, Д. В., Рагозин, О. Н., Шевнин, И. А., & Бейсембаев, А. А. (2026). Влияние типа темперамента на десинхроноз параметров артериального давления у жителей северного региона. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 11–28. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1781>

The influence of temperament type on blood pressure desynchronization in residents of the Northern Region

D.V. Surinov¹, O.N. Ragozin¹, I.A. Shevnin¹, A.A. Beisembaev²

¹Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

²Kyrgyz-Russian Slavic University named after the first President of the Russian Federation B.N. Yeltsin, Bishkek, Kyrgyzstan

Abstract

Background. Arterial hypertension (AH) is one of the most common cardiovascular diseases. Its prevalence in Russia has reached 53.9%. Exposure to the unfavorable factors of the North leads to disruptions in circadian rhythms, including blood pressure. Many authors consider this a sign of the risk of developing AH.

Purpose. To study the structure of blood pressure rhythms in residents of the northern region of Russia (Khanty-Mansiysk) with arterial hypertension depending on temperament type.

Materials and methods. All study participants had their blood pressure assessed using the generally accepted ABPM method. Higher nervous activity type was assessed using the Eysenck EPI questionnaire modified by A.G. Shmelev. Based on the test results, each participant was classified into one of the following temperament types: melancholic, sanguine, choleric, or phlegmatic. The “Wavelet Analysis of Biological Rhythms” computer program was used to detect circadian and ultradian rhythms, as well as desynchronization. To assess blood pressure rhythms depending on temperament type, the total sample was divided into a group without hypertension and a group with hypertension. Kruskal-Wallis analysis of variance was used to identify differences in blood pressure parameters between individuals with different temperaments.

Results. In the group of individuals without hypertension, choleric individuals had statistically significantly higher nighttime SBP and nighttime DBP values compared to melancholic individuals. Cholerics also had statistically significantly higher nighttime DBP values compared to phlegmatic individuals. In the group of individuals with hypertension, sanguine individuals had statistically significantly higher daytime DBP values compared to melancholic individuals. In the group without hypertension, individuals with both choleric and phlegmatic temperaments exhibited circadian rhythms: SBP and DBP in choleric individuals, and SBP, DBP, and HR in phlegmatic individuals. Sanguine individuals exhibited ultradian SBP and DBP rhythms, as well as disorganized HR rhythms. Melancholic individuals exhibited disorganized SBP, DBP, and HR rhythms, indicating desynchronization. In the group with hypertension, sanguine individuals exhibited circadian rhythms of SBP, DBP, and HR. Phlegmatic people have one circadian rhythm – systolic blood pressure (SBP), while choleric people have two ultradian rhythms – diastolic blood pressure (DBP) and heart rate (HR). Melancholic people exhibit disorganization of the SBP and DBP rhythms and a circadian rhythm of heart rate.

Conclusion. When diagnosing hypertension and assessing the effectiveness of anti-hypertensive chronotherapy, it is important to consider the type of higher nervous activity.

Keywords: North; desynchronization; circadian rhythm; ultradian rhythm; blood pressure; arterial hypertension

For citation. Surinov, D. V., Ragozin, O. N., Shevnin, I. A., & Beisembaev, A. A. (2026). The influence of temperament type on blood pressure desynchronization in residents of the Northern Region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 11–28. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1781>

Введение

Заболевания сердечно-сосудистой системы представляют собой ведущую причину смерти в мировой популяции на протяжении многих лет. В структуре сердечно-сосудистых заболеваний артериальная гипертензия

(АГ) является одной из самых распространенных патологий [11]. Выявлены традиционные факторы риска (ФР), которые способствуют развитию АГ [24]. Актуальность выявления новых факторов риска развития обуславливает постоянный интерес исследователей к данной проблеме, поэтому многие ученые продолжают искать новые ФР развития данной патологии [20; 21; 23]. По данным исследования ЭССЕ-РФ3 (ЭССЕ-РФ. Третье обследование) распространенность АГ в России достигла 53,9% [1]. Достаточно отчетливо проявляются региональные климатогеографические особенности распространенности АГ в Сибири и районах Крайнего Севера [9].

Вследствие воздействия на организм неблагоприятных факторов Севера, развиваются нарушения структуры циркадианных ритмов, в том числе и ритмов АД. Многие авторы расценивают это как сигнал об угрозе развития АГ [2; 8; 18].

О влиянии функциональной активности высшей нервной деятельности (ВНД) человека на регуляцию соматических функций в норме и патологии высказывался Сеченов И.М. в своем главном труде под названием «Рефлексы головного мозга» [10]. Также Павлов И.П. в своих работах, рассуждая о дизрегуляторных процессах нервной системы, делал акцент на конституциональную предрасположенность [14]. Ланг Г.Ф. в своей книге «Гипертоническая болезнь» формулирует неврогенную теорию гипертонической болезни [3].

Исходя из вышеперечисленного, представляется актуальным провести исследование *целью* которого является изучение структуры ритмов параметров АД у жителей северного региона России (г. Ханты-Мансийск) с артериальной гипертензией в зависимости от типа темперамента.

Материал и методы

Обследованию подвергались лица, обратившиеся за медицинской помощью в консультационно-диагностическую поликлинику Окружной клинической больницы г. Ханты-Мансийска по поводу периодического повышения АД. Все участники обследовались один раз. Исследования проводились в дни близкие к датам весеннего и осеннего равноденствия, чтобы избежать влияний измененного фотопериода северного региона [17].

Критерии исключения из исследования: занятия спортивной деятельностью, диагностированные заболевания сердечно-сосудистой, дыхательной, эндокринной, мочевыводящей систем, острые воспалительные заболевания.

Всем участникам исследования проводили оценку АД с помощью общепринятого метода – СМАД (NBREP, США, 1990 г). Продолжительность исследования составляла 48 часов, включая дневной и ночной периоды. Оценивали следующие показатели: САД, ДАД, пульсовое АД (ПАД) и ЧСС. Интерпретацию результатов исследования проводили при 80% и более успешных измерений. Перед проведением СМАД у пациентов проводился сбор анамнестических данных с целью выявления приема лекарственных препаратов, оказывающих влияние на уровень АД. Лица, принимавшие препараты, влияющие на уровень АД были исключены из исследования с целью минимизации искажения результатов.

Оценку типа ВНД осуществляли с помощью теста-опросника ЕРІ Айзенка в модификации Шмелева А. Г. [13]. По результатам тестирования каждый участник исследования был отнесен к одному из следующих типов темперамента: меланхолик, сангвиник, холерик или флегматик.

С целью обнаружения циркадианных и ультрадианных ритмов, а также десинхроноза использовали компьютерную программу «Исследование биологических ритмов методом вейвлет-анализа» [16]. Основываясь на методе вейвлет-анализа, это программное обеспечение позволяет обнаруживать биологические ритмы и представляет следующие их характеристики: мезор (среднесуточный уровень), периоды биологических ритмов, их энергию и значимость.

Для оценки ритмов параметров АД в зависимости от типа темперамента общая выборка была разделена на группу без АГ (с оптимальным и нормальным уровнем АД) и группу с АГ. Для градации респондентов по уровню АД использовали классификацию артериального давления на основании СМАД, предложенную европейским обществом изучения гипертонии (2003 г). Диагноз АГ устанавливали согласно критериям диагностики [12]. Группа лиц без АГ представлена 94 респондентами, средний возраст $29,2 \pm 6,0$ лет). Группа лиц с АГ представлена 85 респондентами (средний возраст $29,4 \pm 5,8$ лет).

С целью выявления различий параметров АД у лиц с разным темпераментом был применен медианный тест – непараметрический ранговый дисперсионный анализ Краскела-Уоллиса. Для представления общей картины распределения данных были использованы медиана (Me), а также верхний и нижний квартили (Q1-Q3), очерчивающие границы основной массы значений. Статистически значимыми различиями считали значения при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

При оценке распределения типов ВНД в группе обследованных без АГ (с оптимальным и нормальным АД, $n=94$) процент холериков составляет 28,7%, флегматиков – 23,4%, сангвиников – 22,4% и меланхоликов 25,5%. У пациентов с диагностированной АГ ($n=85$) соотношение следующее: холерики – 24,7%; флегматики – 25,8%; сангвиники – 22,4%; меланхолики – 27,1%.

Сравнение параметров СМАД у лиц с разным типом темперамента и уровнем АД представлено в таблицах 1 и 2. В группе лиц без АГ у холериков выявлены статистически значимо более высокие значения САД *ночь* и ДАД *ночь* по сравнению с меланхоликами ($p<0,014$ и $p<0,032$ соответственно). Также у холериков наблюдаются статистически значимо более высокие значения ДАД *ночь* по сравнению с флегматиками ($p<0,026$). В группе лиц без АГ, анализ других параметров СМАД не выявил статистически значимых различий между различными типами темперамента.

В группе лиц с АГ наблюдается статистически значимо более высокое значение ДАД *день* у сангвиников по сравнению с меланхоликами ($p<0,047$). Анализ остальных параметров СМАД не выявил статистически значимых различий в подгруппах с разным типом темперамента.

Следующим этапом после выявления элементов десинхронизации параметров АД явилось изучение циркадианной структуры ритмов АД в исследуемых группах.

Вейвлет анализ ритмов показателей СМАД у лиц с разным типом темперамента в группе без АГ демонстрирует следующее (таблица 3). Лица с холерическим, а также с флегматическим типом темперамента имеют наиболее благополучную биоритмологическую картину, о чем свидетельствуют циркадианные, высокоэнергетические ритмы: САД, ДАД у холериков и САД, ДАД и ЧСС у флегматиков с периодами 23,3 часа.

Таблица 1.

Сравнение среднесуточных показателей СМАД у лиц без АГ в зависимости от типа темперамента

Table 1. Comparison of average daily ABPM readings in individuals without hypertension, by temperament type

Параметры	ХОЛ	Q1-Q3	ФЛЕГМ	Q1-Q3	МЕ-ЛАН	Q1-Q3	САНГ	Q1-Q3	p*	
	1		2		3		4			
	САД день	130,5	125,5-133,5	126,0	123,0-129,0	121,0	114,0-126,0	126,0	112,0-131,0	1-2 p=0,433 1-3 p=0,061 1-4 p=0,344
ДАД день	78,0	74,5-80,5	75,5	74,5-78,5	76,5	74,5-79,0	78	73,0-81,0	1-2 p=0,171 1-3 p=0,732 1-4 p=0,849	2-3 p=0,750 2-4 p=0,684 3-4 p=1,0

ПАД день	51,0	47,5-56,5	49,0	46,0-55,5	42,5	37,0-48,5	50,0	37,0-52,0	1-2 p=0,732 1-3 p=0,072 1-4 p=0,340	2-3 p=0,058 2-4 p=0,271 3-4 p=0,483
ЧСС день	76,0	74,5-78,0	72,0	65,0-84,0	80,5	72,0-89,5	78,0	69,0-84	1-2 p=0,610 1-3 p=0,496 1-4 p=0,566	2-3 p=0,293 2-4 p=0,771 3-4 p=0,448
САД ночь	116,0	114,0-117,5	109,5	102,1-114,0	104,6	97,5-110,5	112,0	102,1-115,0	1-2 p=0,050 1-3 p=0,014 1-4 p=0,071	2-3 p=0,268 2-4 p=0,861 3-4 p=0,223
ДАД ночь	67,0	67,0-68,0	59,5	57,0-65,0	62,5	60,0-66,5	66,0	64,0-67,0	1-2 p=0,026 1-3 p=0,056 1-4 p=0,099	2-3 p=0,205 2-4 p=0,128 3-4 p=0,448
ПАД ночь	49,0	46,0-50,5	45,5	43,0-53,5	41,0	36,5-46,0	43,0	37,0-51,0	1-2 p=0,733 1-3 p=0,032 1-4 p=0,253	2-3 p=0,073 2-4 p=0,181 3-4 p=0,450
ЧСС ночь	62,5	56,0-66,5	57,5	52,5-62,5	62,0	51,0-66,0	61,0	57,0-70,0	1-2 p=0,394 1-3 p=0,925 1-4 p=0,849	2-3 p=0,602 2-4 p=0,271 3-4 p=0,798

Примечания: *Ранговый дисперсионный анализ Краскела-Уолиса, статистически значимые при $p < 0,05$; Значения представлены в виде медианы; Q1-Q3 – верхний и нижний квартиль; ХОЛ – холерики; ФЛЕГМ – флегматики; МЕЛАН – меланхолики; САНГ – сангвиники.

Таблица 2.

**Сравнение среднесуточных показателей СМАД у лиц с АГ
в зависимости от типа темперамента**

Table 2. Comparison of average daily ABPM readings in individuals
with hypertension by temperament type

Параметры	ХОЛ	Q1-Q3	ФЛЕГМ	Q1-Q3	МЕЛАН	Q1-Q3	САНГ	Q1-Q3	p*	
	1		2		3		4			
САД день	136,5	131,0-141,0	142,0	135,0-151,0	130,0	129,0-136,0	142,0	127,0-149,0	1-2 p= 0,127 1-3 p=0,379 1-4 p=0,320	2-3 p=0,125 2-4 p=0,794 3-4 p=0,281
ДАД день	87,0	83,5-89,0	88,0	85,0-94,0	83,0	81,0-85,0	87,0	84,0-90,0	1-2 p=0,636 1-3 p=0,077 1-4 p=0,678	2-3 p=0,075 2-4 p=0,884 3-4 p=0,047
ПАД день	48,0	45,5-52,5	52,0	48,0-61,0	47,0	43,0-60,0	51,0	40,0-62,0	1-2 p=0,146 1-3 p=0,826 1-4 p= 0,901	2-3 p=0,400 2-4 p= 0,382 3-4 p= 0,955
ЧСС день	84,0	68,5-88,5	75,0	72,0-84,0	79,0	71,0-80,0	80,0	76,0-88,0	1-2 p=0,717 1-3 p=0,420 1-4 p=0,901	2-3 p=0,693 2-4 p=0,192 3-4 p=0,307
САД ночь	119,5	118,0-123,0	126,0	123,0-131,0	115,0	115,0-124	121,0	115,0-134,0	1-2 p=0,110 1-3 p=0,462 1-4 p=0,901	2-3 p=0,167 2-4 p=0,258 3-4 p=0,609
ДАД ночь	75,5	71,5-77,5	72,0	68,0-76,0	70,0	70,0-77,0	74,0	72,0-79,0	1-2 p=0,328 1-3 p=0,266 1-4 p=0,901	2-3 p=0,961 2-4 p=0,504 3-4 p=0,363

ПАД									1-2 p=0,059	2-3 p=0,348
ночь	46,0	45,0-47,0	57,0	45,0-59,0	53,0	38,0-54,0	46,0	39,0-54,0	1-3 p=0,557	2-4 p=0,139
									1-4 p=0,868	3-4 p=0,955
ЧСС									1-2 p=0,664	2-3 p=0,843
ночь	68,0	60,0-81,0	64,0	62,0-74,0	65,0	62,0-77,0	68,0	57,0-73,0	1-3 p=0,714	2-4 p=0,706
									1-4 p=0,869	3-4 p=0,820

Примечания: *Ранговый дисперсионный анализ Краскела-Уолиса, статистически значимые при $p < 0,05$; Значения представлены в виде медианы; Q1-Q3 – верхняя и нижняя квартиль; ХОЛ – холерики; ФЛЕГМ – флегматики; МЕЛАН – меланхолики; САНГ – сангвиники.

Биоритмологическая картина сангвиников характеризуется наличием ультрадианных ритмов САД и ДАД с периодом 12,2 часа, а также дезорганизацией ритма ЧСС – что указывает на наличие десинхроноза. Биоритмологическая картина меланхоликов характеризуется дезорганизацией ритмов САД, ДАД и ЧСС – что позволяет предположить наличие патологического десинхроноза.

Таблица 3.

Суточные вариации АД и ЧСС жителей без АГ с различным типом высшей нервной деятельности (n=85)

Table 3. Daily Variations in Blood Pressure and Heart Rate Among Individuals Without Hypertension and With Different Types of Higher Nervous Activity (n=85)

Параметры	MESOR ($M \pm \sigma$)	Энергия ритма (усл. ед.)	Период ритма (часы)	<i>p</i>
Холерический тип (n=21)				
САД мм рт. ст.	125,0 $\pm$ 1,30	4,801	23,2	0,001
ДАД мм рт. ст.	75,5 $\pm$ 1,01	5,825	23,2	0,001
ЧСС уд/мин	76,3 $\pm$ 1,08	---	---	---
Сангвинический тип (n=19)				
САД мм рт. ст.	118,3 $\pm$ 1,09	1,839	12,1	0,011
ДАД мм рт. ст.	72,7 $\pm$ 0,98	1,729	12,1	0,014
ЧСС уд/мин	71,7 $\pm$ 0,95	---	---	---
Флегматический тип (n=22)				
САД мм рт. ст.	120,5 $\pm$ 1,62	6,877	23,2	0,001
ДАД мм рт. ст.	74,1 $\pm$ 1,25	6,714	23,2	0,001
ЧСС уд/мин	68,50 $\pm$ 1,09	5,934	23,2	0,001
Меланхолический тип (n=23)				
САД мм рт. ст.	113,8 $\pm$ 1,25	---	---	---
ДАД мм рт. ст.	72,0 $\pm$ 1,10	---	---	---
ЧСС уд/мин	72,7 $\pm$ 1,41	---	---	---

У лиц с АГ наблюдается иная биоритмологическая картина (таблица 4). У сангвиников отмечаются высокэнергетические ритмы САД, ДАД и ЧСС с периодом 23,2 часа – что свидетельствует о более физиологической хроноструктуре параметров СМАД. У флегматиков наблюдается один циркадианный ритм – САД с периодом 23,2 часа, а у холериков два ультрадианных ритма – ДАД и ЧСС с периодами 12,1 часа. У меланхоликов наблюдается дезорганизация ритмов САД и ДАД, несмотря на сохранение циркадианного ритма ЧСС – таким образом, с хронофизиологической точки зрения, меланхолики являются самым неблагоприятным типом темперамента в отношении развития десинхроноза.

Таблица 4.

Суточные вариации АД и ЧСС жителей Севера с АГ с различным типом высшей нервной деятельности (n=94)

Table 4. Daily Variations in Blood Pressure and Heart Rate Among Northern Residents with Hypertension and Different Types of Higher Nervous Activity (n=94)

Параметры	MESOR (M±σ)	Энергия ритма (усл. ед.)	Период ритма (часы)	p
Холерический тип (n=27)				
САД мм рт. ст.	132,6±1,39	---	---	---
ДАД мм рт. ст.	83,4±1,02	1,524	12,1	0,043
ЧСС уд/мин	74,07±1,02	1,584	12,1	0,025
Сангвинический тип (n=21)				
САД мм рт. ст.	138,0±1,45	5,832	23,2	0,001
ДАД мм рт. ст.	84,5±1,01	5,487	23,2	0,001
ЧСС уд/мин	78,9±0,97	5,775	23,2	0,001
Флегматический тип (n=22)				
САД мм рт. ст.	138,4±1,23	6,058	23,2	0,001
ДАД мм рт. ст.	85,4±1,04	---	---	---
ЧСС уд/мин	74,2±1,09	---	---	---
Меланхолический тип (n=24)				
САД мм рт. ст.	131,5±1,30	---	---	---
ДАД мм рт. ст.	80,0±0,95	---	---	---
ЧСС уд/мин	73,7±0,99	3,381	23,2	0,001

Результаты анализа СМАД у лиц с различными типами темперамента демонстрируют признаки десинхроноза, предположительно связанного с климатическими факторами. Наиболее выраженные проявления десинхроноза наблюдаются у представителей меланхолического типа темперамента, которые характеризуются слабым и неуравновешенным типом нервной системы.

По данным литературы в общечеловеческой популяции 30-35% составляют холерики, 25-35 % – сангвиники, 20-25% – меланхолики и 10-20% – флегматики [4; 5; 7]. Распределение типов ВНД в климатогеографических популяциях показывает, что в средней полосе России (Курская область) [6] преобладающим типом темперамента стали сангвиники – 47,3%, холерики составили 10%, флегматики 15,4%, меланхолики 10,3%. Исследование здоровых студентов Нижневартковского государственного университета [15] показали, что в северной популяции тоже преобладают сангвиники (44%), далее по нисходящей следуют флегматики (24%), холерики (17%) и меланхолики (15%). В большинстве цитируемых исследований приводятся цифры распределения типов ВНД без межполовых особенностей или отсутствия межполовых различий, поэтому в обсуждении мы приводим наши данные о типах ВНД у лиц мужского пола с оптимальным/нормальным уровнем АД и АГ. Проводились исследования корреляций типов ВНД и АГ, в том числе и в высоких широтах (г. Киров). Было обнаружено, что у пациентов с АГ преобладает меланхолический тип темперамента, составляющий 40,0%, далее следуют холерики (33,4%). Меньше всего среди опрошенных с АГ сангвиников и флегматиков, их соответственно по 13,3% [19]. Несмотря на близость г. Кирова и Ханты-Мансийска по географической широте разброс процентного распределения типов ВНД достаточно велик. Скорее всего принадлежность человека к определенному типу ВНД или психотипу не является предиктором нарушения регуляции АД [22], тогда как реакция параметров АД в виде десинхроноза является более чувствительным диагностическим критерием для донозологической диагностики АГ и оценке эффективности лечения АГ у представителей разных типов темперамента. Рекомендуем при проведении диагностического алгоритма АГ проводить опрос на тип ВНД и ввести в анализ суточного профиля АД определение варианта десинхроноза (мезорный, гиперамплитудный, фазовый, ультраниантный).

Заключение

1. При изучении вариаций АД у здоровых людей с учетом типа темперамента наблюдаются признаки климатического десинхроноза, которые наиболее выражены у представителей меланхолического типа темперамента.

2. При изучении вариаций АД у лиц с АГ с учетом типа темперамента наблюдается нозогенный фактор десинхроноза, наиболее характерный для лиц с меланхолическим типом темперамента.

3. Климатообусловленные нарушения регуляции АД проявляются в виде мезорного, гиперамплитудного, фазового и ультранианного вариантов десинхроноза.

Учитывая результаты исследования при проведении диагностики АГ и оценки эффективности антигипертензивной хронотерапии необходимо учитывать тип высшей нервной деятельности.

Список литературы

1. Баланова, Ю. А., Драпкина, О. М., Куценко, В. А., и др. (2023). Артериальная гипертензия в российской популяции в период пандемии COVID-19: гендерные различия в распространённости, лечении и его эффективности. Данные исследования ЭССЕ-РФ3. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 22(8S), 3785. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3785>. EDN: <https://elibrary.ru/YRUNUX>
2. Ветошкин, А. С., Шуркевич, Н. П., Гапон, Л. И., Губин, Д. Г., Симонян, А. А., & Пошинов, Ф. А. (2019). Роль ритма природной освещённости в формировании десинхроноза в условиях заполярной вахты. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*, 34(4), 91–100. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2019-34-4-91-100>. EDN: <https://elibrary.ru/MDSEPZ>
3. Ланг, Г. Ф. (1950). *Гипертоническая болезнь*. Медгиз, Ленингр. отд-ние. 496 с.
4. Гладков, М. В. (2021). Темперамент у разных наций и этносов. В *Наука и социум: Материалы XII международной научно-практической конференции* (с. 87–88). Новосибирск. https://doi.org/10.38163/978-5-6045317-2-3_2021_87. EDN: <https://elibrary.ru/UNPGPM>
5. Двойникова, Е. Ю. (2024). Особенности эмоционального выгорания студентов с разным типом темперамента. *Мир науки. Педагогика и психология*, 12(3). EDN: <https://elibrary.ru/SYFCKD>
6. Ефремова, Ю. О., Курбакова, А. Н., & Репалова, Н. В. (2023). Влияние типологических свойств высшей нервной деятельности человека на уровень личностной тревожности студентов. *Молодой ученый*, (460), 50–53. <https://moluch.ru/archive/460/101192>. EDN: <https://elibrary.ru/JVFFOY>
7. Захарченко, В. А., Белоусова, Н. И., Петрова, Е. В., & Ткаченко, П. В. (2022). Реактивность сердечно-сосудистой системы у лиц с различными индивидуально-психологическими чертами личности. *Молодой ученый*, (443), 554–556. EDN: <https://elibrary.ru/UHMRCT>
8. Иванова, Е. Г., & Фомин, И. В. (2024). Климатогеографические условия как фактор риска сердечно-сосудистых заболеваний у некоторых жителей Западной Сибири. *Современные проблемы науки и образования*, (1), 24. <https://doi.org/10.17513/spno.33283>. EDN: <https://elibrary.ru/IPBNUU>

9. Иванова, Е. Г., Потеемина, Т. Е., Двойникова, О. О., Зейналова, Э. К., Минакова, Н. И., & Фадеева, В. А. (2022). Особенности клинического течения артериальной гипертензии у пришлых жителей Западной Сибири с установлением закономерностей метаболических изменений. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врач и Здоровье*, 12(3), 78–86. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2022.3.CLIN.3>. EDN: <https://elibrary.ru/QUDLXT>
10. Коштыянец, Х. С. (Ред.). (1952–1956). *Избранные произведения* (2 т.). Изд-во Акад. Наук СССР.
11. Кириленко, Н. П., & Ильина, Н. Н. (2023). Гипертоническая болезнь в популяции и профилактика в амбулаторных условиях: проблемы и пути решения. *Профилактическая медицина*, 26(3), 23–29. <https://doi.org/10.17116/profmed20232603123>. EDN: <https://elibrary.ru/LGRPVU>
12. Кобалава, Ж. Д., Конради, А. О., Недогода, С. В., и др. (2024). Артериальная гипертензия у взрослых. Клинические рекомендации 2024. *Российский кардиологический журнал*, 29(9), 230–329. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-6117>. EDN: <https://elibrary.ru/GUEWLU>
13. Олейник, Ю. Н., & Маслова, М. Н. (2023). Различия хронотипов и режимов рабочего времени человека. *Институт Российской академии наук. Социальная и экономическая психология*, 8(3), 183–201. https://doi.org/10.38098/ipran.sep_2023_31_3_08. EDN: <https://elibrary.ru/PKUPLR>
14. Павлов, И. П. (1951). *Полное собрание сочинений* (Т. 3, ч. 1). Издательство Академии наук.
15. Постникова, В. В., & Погонишева, И. А. (2017). Уровень адаптации и стрессоустойчивости студентов в зависимости от типа высшей нервной деятельности. В *Материалы XIX Всероссийской студенческой научно-практической конференции Нижневартковского государственного университета: Сборник статей* (с. 225–229). EDN: <https://elibrary.ru/ZFSEJN>
16. Рагозин, О. Н., Бочкарев, М. В., Косарев, А. Н., Кот, Т. Л., & Татаринцев, П. Б. (2014). Программа «Исследование биологических ритмов методом вейвлет-анализа» [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611398].
17. Рагозин, О. Н., Татаринцев, П. Б., Погонишева, И. А., Гудков, А. Б., Шаламова, Е. Ю., Погонишев, Д. А., & Бейсембаев, А. А. (2023). Поправки при анализе временных рядов с учётом географических различий фотопериода. *Экология человека*, 30(2), 139–149. <https://doi.org/10.17816/humeco117532>. EDN: <https://elibrary.ru/VVYOJA>
18. Самойлов, А. С., Рылова, Н. В., Жолинский, А. В., Большаков, И. В., & Казаков, В. Ф. (2021). Применение мелатонина для профилактики и лечения наруше-

- ния циркадианных ритмов. *Практическая медицина*, 19(2), 34–38. <https://doi.org/10.32000/2072-1757-2021-2-34-38>. EDN: <https://elibrary.ru/MMSHZA>
19. Слобожанинова, Е. В., Савиных, Е. А., Чепурных, А. Я., & Шамсутдинова, Р. А. (2020). Взаимосвязь личностной тревожности и типа темперамента с приверженностью к лечению у больных гипертонической болезнью. *Вятский медицинский вестник*, (3), 81–84. <https://doi.org/10.24411/2220-7880-2020-10112>. EDN: <https://elibrary.ru/KLVQOF>
20. Стрижаков, Л. А., Бабанов, С. А., & Борисова, Д. К. (2021). Артериальная гипертензия с позиции оценки профессиональных рисков. *Профилактическая медицина*, 24(1), 118–123. <https://doi.org/10.17116/profmed202124011118>. EDN: <https://elibrary.ru/THSVRG>
21. Толстов, П. В., Калягин, А. Н., & Татарина, М. Б. (2023). Влияние гелиофизических природно-климатических факторов на сердечно-сосудистую систему (обзор литературы). *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 22(8), 92–102. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3599>. EDN: <https://elibrary.ru/TTOLAW>
22. Цибульская, Н. Ю. (2022). Суточные профили артериального давления у больных артериальной гипертензией различных психотипов. *Системные гипертензии*, 19(4), 27–30. <https://doi.org/10.38109/2075-082X-2022-4-27-30>. EDN: <https://elibrary.ru/SLALPE>
23. Шишкова, В. Н. (2023). Эмоциональные нарушения, связанные со стрессом, у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. *Медицинский совет*, 17(21), 70–80. <https://doi.org/10.21518/ms2023-322>. EDN: <https://elibrary.ru/PZQFPC>
24. Шульга, М. А., Погорелова, Е. И., & Панина, О. А. (2021). Распространенность основных факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний среди различных групп населения. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*, 10(S2), 183. EDN: <https://elibrary.ru/XCCTJT>

References

1. Balanova, Yu. A., Drapkina, O. M., Kutsenko, V. A., et al. (2023). Arterial hypertension in the Russian population during the COVID-19 pandemic: Gender differences in prevalence, treatment, and its effectiveness. Data from the ESSE-RF3 study. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 22(8S), 3785. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3785>. EDN: <https://elibrary.ru/YRUNUX>
2. Vetoshkin, A. S., Shurkevich, N. P., Gapon, L. I., Gubin, D. G., Simonyan, A. A., & Poshinov, F. A. (2019). The role of natural light rhythm in the formation of desynchronization under polar shift work conditions. *Siberian Journal of Clinical and*

- Experimental Medicine*, 34(4), 91–100. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2019-34-4-91-100>. EDN: <https://elibrary.ru/MDSEPZ>
3. Lang, G. F. (1950). *Hypertensive disease*. Medgiz, Leningrad Branch. 496 pp.
 4. Gladkov, M. V. (2021). Temperament in different nations and ethnic groups. In *Science and Society: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference* (pp. 87–88). Novosibirsk. https://doi.org/10.38163/978-5-6045317-2-3_2021_87. EDN: <https://elibrary.ru/UNPGPM>
 5. Dvoynikova, E. Yu. (2024). Features of emotional burnout in students with different temperament types. *World of Science. Pedagogy and Psychology*, 12(3). EDN: <https://elibrary.ru/SYFCKD>
 6. Efremova, Yu. O., Kurbakova, A. N., & Repalova, N. V. (2023). The influence of typological properties of human higher nervous activity on the level of personal anxiety in students. *Young Scientist*, (460), 50–53. <https://moluch.ru/archive/460/101192>. EDN: <https://elibrary.ru/JVFFOY>
 7. Zakharchenko, V. A., Belousova, N. I., Petrova, E. V., & Tkachenko, P. V. (2022). Reactivity of the cardiovascular system in individuals with different individual psychological personality traits. *Young Scientist*, (443), 554–556. EDN: <https://elibrary.ru/UHMRCT>
 8. Ivanova, E. G., & Fomin, I. V. (2024). Climatic and geographical conditions as a risk factor for cardiovascular diseases in some residents of Western Siberia. *Modern Problems of Science and Education*, (1), 24. <https://doi.org/10.17513/spno.33283>. EDN: <https://elibrary.ru/IPBNUU>
 9. Ivanova, E. G., Potemina, T. E., Dvoynikova, O. O., Zeynalova, E. K., Minakova, N. I., & Fadeeva, V. A. (2022). Features of the clinical course of arterial hypertension in newcomers to Western Siberia with the identification of patterns of metabolic changes. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ". Rehabilitation, Doctor and Health*, 12(3), 78–86. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2022.3.CLIN.3>. EDN: <https://elibrary.ru/QUDLXT>
 10. Koshtoyants, Kh. S. (Ed.). (1952–1956). *Selected works* (Vols. 1–2). Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR.
 11. Kirilenko, N. P., & Ilyina, N. N. (2023). Hypertensive disease in the population and prevention in outpatient settings: Problems and solutions. *Preventive Medicine*, 26(3), 23–29. <https://doi.org/10.17116/profmed20232603123>. EDN: <https://elibrary.ru/LGRPVU>
 12. Kobalava, Zh. D., Konradi, A. O., Nedogoda, S. V., et al. (2024). Arterial hypertension in adults. Clinical guidelines 2024. *Russian Journal of Cardiology*, 29(9), 230–329. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-6117>. EDN: <https://elibrary.ru/GUEWLU>

13. Oleinik, Yu. N., & Maslova, M. N. (2023). Differences in chronotypes and working time regimes of humans. *Institute of the Russian Academy of Sciences. Social and Economic Psychology*, 8(3), 183–201. https://doi.org/10.38098/ipran.sep_2023_31_3_08. EDN: <https://elibrary.ru/PKUPLR>
14. Pavlov, I. P. (1951). *Complete works* (Vol. 3, Part 1). Publishing House of the Academy of Sciences.
15. Postnikova, V. V., & Pogonysheva, I. A. (2017). The level of adaptation and stress resistance of students depending on the type of higher nervous activity. In *Proceedings of the 19th All-Russian Student Scientific and Practical Conference of Nizhnevartovsk State University: Collection of Articles* (pp. 225–229). EDN: <https://elibrary.ru/ZFSEJN>
16. Ragozin, O. N., Bochkarev, M. V., Kosarev, A. N., Kot, T. L., & Tatarintsev, P. B. (2014). *Program "Study of biological rhythms by wavelet analysis method"* [Certificate of state registration of computer program No. 2014611398].
17. Ragozin, O. N., Tatarintsev, P. B., Pogonysheva, I. A., Gudkov, A. B., Shalamova, E. Yu., Pogonyshchev, D. A., & Beisembaev, A. A. (2023). Corrections in the analysis of time series taking into account geographical differences in photoperiod. *Human Ecology*, 30(2), 139–149. <https://doi.org/10.17816/humeco117532>. EDN: <https://elibrary.ru/VVYOJA>
18. Samoylov, A. S., Rylova, N. V., Zholinsky, A. V., Bolshakov, I. V., & Kazakov, V. F. (2021). The use of melatonin for the prevention and treatment of circadian rhythm disorders. *Practical Medicine*, 19(2), 34–38. <https://doi.org/10.32000/2072-1757-2021-2-34-38>. EDN: <https://elibrary.ru/MMSHZA>
19. Slobozhanina, E. V., Savinykh, E. A., Chepurnykh, A. Ya., & Shamsutdinova, R. A. (2020). The relationship between personal anxiety, temperament type, and treatment adherence in patients with hypertensive disease. *Iyatka Medical Bulletin*, (3), 81–84. <https://doi.org/10.24411/2220-7880-2020-10112>. EDN: <https://elibrary.ru/KLVQOF>
20. Strizhakov, L. A., Babanov, S. A., & Borisova, D. K. (2021). Arterial hypertension from the perspective of occupational risk assessment. *Preventive Medicine*, 24(1), 118–123. <https://doi.org/10.17116/profmed202124011118>. EDN: <https://elibrary.ru/THSVRG>
21. Tolstov, P. V., Kalyagin, A. N., & Tatarinova, M. B. (2023). The influence of heliophysical and natural-climatic factors on the cardiovascular system (literature review). *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 22(8), 92–102. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3599>. EDN: <https://elibrary.ru/TTOLAW>
22. Tsibulskaya, N. Yu. (2022). Daily blood pressure profiles in patients with arterial hypertension of different psychotypes. *Systemic Hypertension*, 19(4), 27–30. <https://doi.org/10.38109/2075-082X-2022-4-27-30>. EDN: <https://elibrary.ru/SLALPE>

23. Shishkova, V. N. (2023). Emotional disorders associated with stress in patients with cardiovascular diseases. *Medical Council*, 17(21), 70–80. <https://doi.org/10.21518/ms2023-322>. EDN: <https://elibrary.ru/PZQFPC>
24. Shulga, M. A., Pogorelova, E. I., & Panina, O. A. (2021). Prevalence of major risk factors for cardiovascular diseases among different population groups. *Complex Problems of Cardiovascular Diseases*, 10(S2), 183. EDN: <https://elibrary.ru/XCCTJT>

ВКЛАД АВТОРОВ

Суринов Д.В.: набор первичного материала, анализ данных, составление черновика рукописи.

Рагозин О.Н.: существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, окончательное утверждение рукописи.

Шевнин И.А.: редактирование черновика рукописи, анализ данных.

Бейсембаев А.А.: разработка концепции научной работы, анализ данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Daniil V. Surinov: collection of primary material, data analysis, drafting of the manuscript.

Oleg N. Ragozin: substantial contribution to the concept and design of the study, final approval of the manuscript.

Igor A. Shevnin: editing the manuscript draft, data analysis.

Anvar A. Beisembaev: development of the concept of scientific work, data analysis.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Суринов Даниил Владимирович, старший преподаватель кафедры госпитальной терапии

БУ «Ханты-Мансийская государственная медицинская академия»
ул. Мира, 40, г. Ханты-Мансийск, 628011, Российская Федерация
dv.surinov@hmgma.ru

Рагозин Олег Николаевич, доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии

БУ «Ханты-Мансийская государственная медицинская академия»
ул. Мира, 40, г. Ханты-Мансийск, 628011, Российская Федерация
oragozin@mail.ru

Шевнин Игорь Андреевич, кандидат медицинских наук, доцент кафедры анатомии человека с курсом оперативной хирургии и топографической анатомии

*БУ «Ханты-Мансийская государственная медицинская академия»
ул. Мира, 40, г. Ханты-Мансийск, 628011, Российская Федерация
ia.shevnin@hmgma.ru*

Бейсембаев Анвар Акулкеримович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры анатомии, топографической анатомии и оперативной хирургии медицинского факультета
*Кыргызско-Российский Славянский университет имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина
ул. Киевская, 44, г. Бишкек, 720000, Кыргызстан
anvar.kg@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Daniil V. Surinov, Senior Lecturer, Department of Hospital Therapy
*Khanty-Mansiysk State Medical Academy
40, Mira Str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russian Federation
dv.surinov@hmgma.ru
SPIN-code: 6585-5009
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5822-8575>
ResearcherID: GZG-4674-2022*

Oleg N. Ragozin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Department of Hospital Therapy
*Khanty-Mansiysk State Medical Academy
40, Mira Str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russian Federation
oragozin@mail.ru
SPIN-code: 7132-3844
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5318-9623>
Researcher ID: JPA-6193-2023
Scopus Author ID: 6507880447*

Igor A. Shevnin, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Human Anatomy with a course in operative surgery and topographic anatomy
*Khanty-Mansiysk State Medical Academy
40, Mira Str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russian Federation
ia.shevnin@hmgma.ru
SPIN-code: 3116-7611
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1772-1026>*

Anvar A. Beisembaev, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of Anatomy, Topographic Anatomy, and Operative Surgery, Faculty of Medicine *Kyrgyz-Russian Slavic University named after the first President of the Russian Federation B.N. Yeltsin*
44, Kyivskaya Str., Bishkek, 720000, Kyrgyzstan
anvar.kg@gmail.com
SPIN-code: 3876-8206
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7922-3367>
ResearcherID: ABP-2930-2022
Scopus Author ID: 58286967600

Поступила 10.01.2026

После рецензирования 21.02.2026

Принята 26.02.2026

Received 10.01.2026

Revised 21.02.2026

Accepted 26.02.2026

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427)

EDN: PQCEBS

УДК 636.5.033: 636.03:612.118



Факторы естественной противоинойфекционной резистентности сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres: связь с составом кишечного микробиома и ассоциации с зоотехническими показателями продуктивности

Д.Г. Дерябин¹, Л.В. Власенко¹, И.Ф. Каримов^{1,2}, Г.К. Дускаев¹

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Российская Федерация

²Оренбургский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, Оренбург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Исследование бактерицидных факторов сыворотки крови является традиционным подходом к оценке уровня естественной противоинойфекционной резистентности сельскохозяйственных животных и птицы.

Целью исследования явился анализ возможных взаимосвязей профиля гуморальных факторов естественной противоинойфекционной резистентности и состава кишечного микробиома сельскохозяйственной птицы, а также поиск ассоциаций названных иммунологических и микробиологических параметров с эффективностью мясного птицеводства.

Материалы и методы. В исследование включены 28 групп цыплят-бройлеров, находившихся на базовом рационе, а также выкармливаемых с использованием различных добавок (пробиотик, антибиотик, малые молекулы растительного происхождения и их сочетания). В полученных от них образцах сыворотки крови определены бактерицидная активность (БАК) по отношению к *Escherichia coli*, лизоцимная активность (ЛАК) по степени лизиса *Micrococcus luteus* var. *lysodeikticus*, а также активность тромбocyтарного катионного белка – ТКБ (бета-лизи́на) в тесте ингибирования *Bacillus subtilis*. Состав кишечных микробиомов исследован методом высокопроизводительного секвенирования на платформе MiSeq (Illumina Inc., США). Межгрупповые различия эффективности птицеводства оценены с использованием стандартных зоотехнических индексов.

Результаты. Показана обратная зависимость между уровнями БАСК и ЛАСК как показателей высокого уровня естественной резистентности организма птицы, а с другой – активностью ТКБ (бета-лизина) как индикатора истощения названных защитных механизмов. Определены перечни бактериальных таксонов, присутствие которых в микробиоме кишечника цыплят-бройлеров является условием для нормального развития естественного иммунитета (20 родов) или его «срыва» с индукцией воспалительного процесса, сопровождающегося дегрануляцией тромбоцитов (17 родов). Установлено, что повышенный уровень ТКБ ассоциирован с увеличенным расходом корма на прирост 1 кг биомассы, а присутствие в кишечном микробиоме ряда ТКБ-индуцирующих таксонов помимо негативного воздействия на конверсию корма в ряде случаев результируется в уменьшении итогового веса цыплят-бройлеров.

Заключение. Результаты исследования обосновывают анализ баланса сывороточных факторов (БАСК+ЛАСК)/ТКБ как информативных параметров, зависящих от состава кишечного микробиома и ассоциированных с эффективностью кормления сельскохозяйственной птицы.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры; естественный иммунитет; бактерицидная активность сыворотки крови; лизоцимная активность сыворотки крови; тромбоцитарный катионный белок (бета-лизин); кишечный микробиом; эффективность птицеводства

Для цитирования. Дерябин, Д. Г., Власенко, Л. В., Каримов, И. Ф., & Дускаев, Г. К. (2026). Факторы естественной противоинойфекционной резистентности сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres: связь с составом кишечного микробиома и ассоциации с зоотехническими показателями продуктивности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 29–54. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427>

Innate immunity components in the blood serum of Arbor Acres broiler chickens: Links with the gut microbiome composition and associations with zootechnical productivity indicators

D.G. Deryabin¹, L.V. Vlasenko¹, I.F. Karimov^{1,2}, G.K. Duskaev¹

*¹Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies
of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation*

*²Orenburg State Medical University of the Ministry of Health of Russia,
Orenburg, Russian Federation*

Abstract

Background. Evaluation of blood serum bactericidal indices is a traditional approach to assessing the innate immune defense of farm animals and poultry.

The **purpose** of this study was to analyze the links between the serum innate immunity components and the gut microbiome composition in Arbor Acres broiler chickens, as well as to search for associations between these immunological and microbiological parameters and the poultry farming efficiency.

Materials and methods. The analysis included 28 broilers chicken's groups fed a basal diet and also receiving various feed additives (probiotic, antibiotic, plant-derived compounds or their compositions). Individual chicken blood samples were collected and assessed for serum bactericidal activity (SBA) against *Escherichia coli*, serum lysozyme activity (SLA) in the *Micrococcus luteus* var. *lysodeikticus* lysis assay, and platelet cationic protein – PCP (also known as beta-lysin) in the *Bacillus subtilis* inhibition test. Chicken gut microbiomes were studied by high-throughput sequencing using the MiSeq platform (Illumina Inc., USA). Intergroup differences in poultry farming efficiency were assessed using zootechnical lot indicators.

Results. An opposite distribution was shown between SBA and SLA levels as indicators of a sufficient innate immune response, in contrast to PCP (beta-lysine) activity, which marks depletion of anti-infective defense mechanisms. Lists of the gut microbiome bacterial taxa that are significant for the innate immunity development have been identified, including 20 genera that ensure its normal state and 17 genera that involved in the defense “breakdown”, accompanied by platelet degranulation. It was found that elevated serum PCP levels were associated with increased feed intake per kg biomass gain, as several PCP-inducing bacteria in the gut microbiome not only negatively affected the feed conversion ratio but also reduced the achieved broiler chickens weight.

Conclusion. The study results showed the (SBA+LSA)/PCP balance in the blood serum of broiler chickens is an informative biomarker dependent on the gut microbiome composition and suitable for monitoring of feed efficiency in poultry farming.

Keywords: broiler chickens; innate immunity; serum bactericidal activity; serum lysozyme activity; platelet cationic protein (beta-lysin); gut microbiome; poultry farming efficiency

For citation. Deryabin, D. G., Vlasenko, L. V., Karimov, I. F., & Duskaev, G. K. (2026). Innate immunity components in the blood serum of Arbor Acres broiler chickens: Links with the gut microbiome composition and associations with zootechnical productivity indicators. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 29–54. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427>

Введение

Гуморальные (сывороточные) бактерицидные факторы являются важной составляющей естественного противои инфекционного иммунитета сельскохозяйственных животных и птицы, обеспечивающих им неспец-

ифическую устойчивость к широкому кругу бактериальных патогенов [15]. При этом в основе данного защитного механизма лежит присутствие в сыворотке крови нескольких белков и белковых систем, дифференцированно реализующих свой антимикробный потенциал через прямое воздействие на жизнеспособность грамотрицательных и грамположительных бактерий [29].

Среди подобных факторов в животноводческой (птицеводческой) и ветеринарной практике наиболее распространенным является анализ «бактерицидной активности сыворотки крови» (сокр. – БАСК), тестируемой в отношении различных штаммов *Escherichia coli* и преимущественно определяемой активностью белков системы комплемента, при активации по классическому или альтернативному путям формирующих мембраноатакующий комплекс, направленный на клеточную стенку грамотрицательных бактерий [21]. В качестве другого часто определяемого параметра следует назвать «лизосимную активность сыворотки крови» (сокр. – ЛАСК), обусловленную активностью фермента лизоцима (мурамидазы; КФ 3.2.1.17), расщепляющего пептидогликан (муреин) в клетках *Micrococcus luteus var. lysodeikticus* и других грамположительных бактерий, клеточная стенка которых состоит из лизоцим-чувствительного муреина [24]. Третьим распространенным тестом является определение активности термостабильного сывороточного бактерицидного фактора – бета-лизина, оцениваемого в отношении *Bacillus subtilis* и названного так в противоположность термочувствительному альфа-лизину, в дальнейшем охарактеризованному как комплемент (см. выше) [26]. При этом по современным представлениям бета-лизин является катионным антимикробным пептидом, появляющимся в сыворотке крови в результате дегрануляции тромбоцитов, что определило его название как «тромбоцитарного катионного белка» (сокр. – ТКБ) [1].

В современной лабораторной практике анализ БАСК, ЛАСК и ТКБ остаётся традиционным подходом к оценке уровня естественной противомикробной резистентности сельскохозяйственных животных и птицы при различных физиологических и патологических состояниях [11], а также всё чаще используется для оценки эффективности вновь разрабатываемых кормовых добавок неорганической [18] и органической [27] природы. В то же время причины модифицирующих эффектов кормовых добавок остаются во многом ещё не изученными и предположительно могут опосредоваться первичным воздействием на микробиом кишечника сельскохозяйственных животных и птицы, в дальнейшем определяю-

щих состояние естественного противоинфекционного иммунитета через генерацию различных стимулирующих и супрессирующих сигналов [30].

В этой связи *целью* настоящего исследования явился анализ возможных взаимосвязей профиля гуморальных факторов естественной противоинфекционной резистентности и состава кишечного микробиома сельскохозяйственной птицы, сформированных на фоне применения различных кормовых добавок, а также поиск ассоциаций названных иммунологических и микробиологических параметров с продуктивностью птицеводства.

Материалы и методы исследования

Объектами изучения являлись цыплята-бройлеры кросса Arbor Acres (Aviagen LLC, Россия), из которых на всем протяжении исследования (2019-2024 гг.) были сформированы 5 контрольных и 23 экспериментальных групп по 15-30 голов каждая. Контрольные группы выкармливались до возраста 42 суток с использованием двухфазного базового рациона, рекомендуемого для птиц данного кросса [14], в то время как в схемы кормления отдельных экспериментальных групп в дополнение к базовому рациону входили: пробиотическая добавка на основе *Bacillus cereus* IP 5832 (Laboratoires AVENTIS, Франция) [17], антибиотик хлортетрациклин (ООО ПО «Сиббиофарм», Россия) [4; 5], а также химически синтезированные аналоги малых молекул растительного происхождения – гамма-октанолактон, 7-гидроксикумарин, ванилин/ванилиновая кислота, 4-гексилрезорцинол, кверцетин или их комбинации [4; 5; 6; 7; 16; 17; 28].

Содержание птиц осуществлялось в соответствии с нормативами, оговорёнными в Модельном законе Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», ст.20, № 29-17 от 31.10.2007 г. В динамике экспериментов у цыплят-бройлеров контрольных и опытных групп измерялись: живая масса, среднесуточный и абсолютный прирост, сохранность поголовья, поедаемость корма. Исходя из количества потребленного корма (за весь период эксперимента) и величины абсолютного прироста живой массы птицы рассчитывали затраты корма на 1 кг прироста живой массы [8]. Детали экспериментов описаны в публикациях [4; 5; 6; 7; 16; 17; 28].

Для количественной оценки профиля гуморальных *факторов естественной противоинфекционной резистентности* у 42-суточных цыплят-бройлеров прижизненно был проведен забор крови из подкрыльцовой вены в вакуумные пробирки с коагулянтом – активатором свертывания

(Zhejiang Gongdong Medical Technology Co, Ltd, Китай). После ретракции сгустков сыворотки отделяли центрифугированием при 1500 об/мин.

Дальнейшие исследования, основанные на измерении оптических плотностей (ОП) бактериальных суспензий, проводили в микропланшетном формате с использованием ридера Infinite 200 (Tecan Austria GmbH, Австрия), снаряженного светофильтрами 450 и 610 нм.

Бактерицидную активность сыворотки крови (БАСК) определяли по степени подавления роста *Escherichia coli* K12 TG1 в жидкой питательной среде с добавлением (опыт) и без добавления (контроль) испытуемой сыворотки. Расчет БАСК проводили по формуле:

$$\text{БАСК} = 100 - \left(\frac{\text{ОП}_\text{после инкубации} - \text{ОП}_\text{до инкубации}}{\text{ОПк}_\text{после инкубации} - \text{ОПк}_\text{до инкубации}} \right) \times 100\%,$$

где ОП_п и ОП_к – значения оптической плотности опытных и контрольных проб до и после 3 часов инкубации при 37°C [11].

Лизоцимную активность сыворотки крови (ЛАСК) тестировали по отношению к *Micrococcus luteus* var. *lysodeikticus* ATCC 4698. Микробную суспензию разводили в фосфатном буфере (pH=7,2-7,4), а тестируемую сыворотку предварительно инактивировали нагреванием в водяной бане (56°C, 30 минут) для устранения комплемент-зависимой цитотоксичности. Степень лизиса бактериальной культуры определяли по формуле:

$$\text{ЛАСК} = \left(\frac{\text{ОП}_\text{до инкубации} - \text{ОП}_\text{после инкубации}}{\text{ОП}_\text{до инкубации}} - \frac{\text{ОПк}_\text{до инкубации} - \text{ОПк}_\text{после инкубации}}{\text{ОПк}_\text{до инкубации}} \right) \times 100\%,$$

где ОП_п и ОП_к – значения оптической плотности опытных и контрольных проб до и после инкубации в течение 1 часа при 37°C [12].

Оценка активности тромбоцитарного катионного белка – ТКБ (бета-лизина) была проведена по отношению к *Bacillus subtilis* ГИСК 010011. При этом суточную тест-культуру разводили в 0,75 М растворе сахарозы (pH=6,2), сыворотку крови термоинактивировали в описанном выше режиме, а их смеси инкубировали в течение 2 часов при 37°C. Активность ТКБ рассчитывали по формуле:

$$\text{ТКБ} = \frac{\text{ОП}_\text{до инкубации} - \text{ОП}_\text{после инкубации}}{\text{ОП}_\text{до инкубации}} \times 100\%,$$

где ОП – значения оптической плотности опытных проб до и после инкубации [11].

Для исследования состава *кишечного микробиома* цыплят-бройлеров в возрасте 42 суток гуманно забивали, после чего у рандомно выбранных птиц контрольных и экспериментальных групп в асептических условиях производили отбор содержимого парных слепых кишок в стерильные криогенные пробирки, которые хранили в морозильной камере 803CV (Thermo Fisher Scientific, Германия) при температуре -80°C. Выделение тотальной ДНК из

отобранных проб в проводили с использованием наборов Fast DNA SPIN Kit for Feces (MP Biomedicals Inc., США) или QIAamp Fast DNA Stool Mini Kit (Qiagen GmbH, Германия). Качество выделенной ДНК контролировали с помощью электрофореза в 1 % агарозном геле, а концентрацию определяли с использованием набора для высокочувствительного анализа dsDNA на флуориметре Qubit 4 (Life Technologies, США). Дальнейшая подготовка библиотек ДНК, ориентированных на область V3-V4 гена 16S рPHK, а также их высокопроизводительное парное секвенирование 2×250 п.н. выполнено на платформе MiSeq (Illumina Inc., США) с использованием соответствующих наборов реагентов в соответствии с рекомендациями производителя. Таксономическая принадлежность полученных прочтений проведена в соответствии с интернет-браузером NCBI и базой данных GTDB.

Статистический анализ полученных результатов выполнен с использованием программного пакета Statistica 8.0 (StatSoft Inc., США); первичные данные и результаты их анализа хранились в многофункциональном приложении Microsoft Excel 2019 (Microsoft, США). Распределение анализируемых величин было оценено с использованием модуля «непараметрическая статистика» и представлено в формате медианных [Q1–Q3] значений. Соответствия между уровнями маркеров естественной противомикробной резистентности, относительными долями бактериальных таксонов в кишечном микробиоме и зоотехническими параметрами проанализированы с применением модуля «корреляционный анализ»; для оценки силы влияния рассчитывали коэффициент детерминации r^2 . При построении «тепловой карты» группировка бактериальных таксонов проведена с использованием модуля «кластерный анализ». Рассматриваемыми уровнями статистической значимости являлись значения $p < 0,05$; $p < 0,01$ и $p < 0,001$.

Результаты исследования и их обсуждение

Тестирование исследуемых сывороток крови против *E. coli* K12 TG1, *M. luteus* var. *lysodeikticus* ATCC 4698 и *B. subtilis* ГИСК 010011 позволило дать комплексную оценку присутствующих в них бактерицидных факторов в отношении модельных грамотрицательного и грамположительных микроорганизмов. При этом интегральная БАСК против *E. coli* K12 TG1 характеризовалась медианным значением 29,90 % с межквартирным размахом [Q1–Q3], показывающим разброс 50 % центральных данных, в диапазоне 27,40–41,88 %. ЛАСК, оценивающая интенсивность гидролиза пептидогликана в клетках *M. luteus* var. *lysodeikticus*

АТСС 4698 в аналогичном формате представления данных составила 43,52 [41,15–48,00] %. В свою очередь подавление жизнеспособности *B. subtilis* ГИСК 010011 как проявление активности ТКБ, описывалось значениями 60,06 [55,30–71,90] %.

Сравнение сывороток крови цыплят-бройлеров контрольных и опытных групп не позволило зафиксировать статистически значимых различий, хотя использование кормовых добавок обеспечивало более широкий разброс определяемых значений и в ряде случаев приводило к существенному росту их бактерицидного потенциала. Так наиболее высокие уровни БАСК, соответствующие четвертому квартилю [$Q4_{\text{БАСК}}$], были достигнуты с использованием 4-гексилрезорцинола и его комбинаций с 7-гидроксикумарином и гамма-октанолактоном, а наиболее высокая активность лизоцима [$Q4_{\text{ЛАСК}}$] отмечена в группах, получавших ванилиновую кислоту (ванилин), гамма-октанолактон и их сочетание. Кроме того, при анализе межгруппового распределения названных гуморальных факторов между ними обнаруживалась слабая положительная корреляционная взаимосвязь: $r=0,4126$; $p=0,0291$ (рис. 1А), согласующаяся с представлениями о бактерицидной активности сыворотки крови в отношении грамотрицательных бактерий как результате взаимодополняющего действия белков системы комплемента и лизоцима [3]. При этом наиболее выраженное совместное повышение БАСК и ЛАСК [$Q4_{\text{БАСК}}$]:[$Q4_{\text{ЛАСК}}$] было показано в экспериментальных группах с кормовым использованием кверцетина: изолированно или в комбинации с 7-гидроксикумарином.

С другой стороны, между уровнями БАСК и ТКБ зафиксирована слабая отрицательная корреляционная взаимосвязь: $r=-0,4574$; $p=0,0144$ (рис. 1Б), характеризующая их как в определенной степени альтернативные факторы неспецифического гуморального иммунитета сельскохозяйственных животных и птицы [10]. В подобном контексте высокий уровень БАСК может рассматриваться как индикатор высокой естественной противомикробной резистентности, истощение которого при воздействии различных экстремальных факторов ведет к индукции эндогенного воспаления с дегрануляцией тромбоцитов и компенсаторным высвобождением ТКБ [1; 13]. При этом в анализируемой выборке наиболее высокие значения активности данного фактора [$Q4_{\text{ТКБ}}$] установлены в группах цыплят-бройлеров, выкармливаемых с использованием гамма-октанолактона (изолированно или в комбинации с ванилиновой кислотой), в то время как зона его пересечения со сниженными значениями БАСК [$Q1_{\text{БАСК}}$]:[$Q4_{\text{ТКБ}}$] не включала ни одного наблюдения.

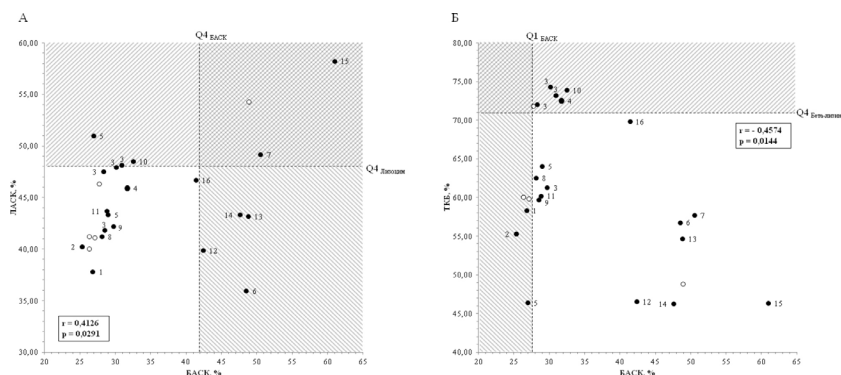


Рис. 1. Распределение величин, характеризующих активность бактерицидных факторов сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres на плоскостях «БАСК:ЛАСК» (А) и «БАСК:ТКБ» (Б).

Обозначения: белые круги – контрольные группы, черные круги – экспериментальные группы, получавшие различные кормовые добавки, в том числе: 1 – пробиотический препарат на основе *B. cereus* IP 5832, 2 – антибиотик хлортетрациклин, 3 – гамма-октанолактон, 4 – 7-гидроксикумарин, 5 – ванилиновая кислота (ванилин), 6 – 4-гексилрезорцинол, 7 – кверцетин, 8 – пробиотический препарат на основе *B. cereus* IP 5832 и 7-гидроксикумарин, 9 – антибиотик хлортетрациклин и гамма-октанолактон, 10 – гамма-октанолактон и ванилиновая кислота (ванилин), 11 – антибиотик хлортетрациклин и 7-гидроксикумарин, 12 – гамма-октанолактон и 4-гексилрезорцинол, 13 – 7-гидроксикумарин и 4-гексилрезорцинол, 14 – гамма-октанолактон, 7-гидроксикумарин и 4-гексилрезорцинол, 15 – 7-гидроксикумарин и кверцетин, 16 – 7-гидроксикумарин и ванилиновая кислота (ванилин). Штриховкой выделены зоны, соответствующие первому [Q1] и четвертому [Q4] квартилям.

Fig. 1. Distribution of values characterizing the activity of bactericidal factors in the blood serum of Arbor Acres crossbred broiler chickens on the “BASK:LASK” (A) and “BASK:TKB” (B) planes. Legend: white circles – control groups; black circles – experimental groups receiving various feed additives, including: 1 – a probiotic preparation based on *B. cereus* IP 5832, 2 – the antibiotic chlortetracycline, 3 – gamma-octanolactone, 4 – 7-hydroxycoumarin, 5 – vanillic acid (vanillin), 6 – 4-hexylresorcinol, 7 – quercetin, 8 – a probiotic preparation based on *B. cereus* IP 5832 and 7-hydroxycoumarin, 9 – the antibiotic chlortetracycline and gamma-octanolactone, 10 – gamma-octanolactone and vanillic acid (vanillin), 11 – the antibiotic chlortetracycline and 7-hydroxycoumarin, 12 – gamma-octanolactone and 4-hexylresorcinol, 13 – 7-hydroxycoumarin and 4-hexylresorcinol, 14 – gamma-octanolactone, 7-hydroxycoumarin, and 4-hexylresorcinol; 15 – 7-hydroxycoumarin and quercetin; 16 – 7-hydroxycoumarin and vanillic acid (vanillin). The shaded areas correspond to the first [Q1] and fourth [Q4] quartiles.

С целью анализа причин, повлекших сочетанное изменение профиля БАСК:ЛАСК:ТКБ при различных режимах кормления, на следующем этапе исследования нами были охарактеризованы зависимости названных факторов естественной противоинойфекционной резистентности от состава кишечного микробиома цыплят-бройлеров, потенциально способного вызывать их индукцию/истощение.

Проведенное с этой целью множественное параллельное секвенирование переменных участков гена 16S рРНК показало присутствие в кишечных микробиомах цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres восьми крупных таксономических групп – филумов, среди которых доминировали *Bacillota* и *Bacteroidota*, обнаруженные в 100% анализируемых проб и составляющие 75,65 [58,00–81,58] % и 22,18 [13,49–41,19] % от общей численности идентифицированных прочтений, соответственно. В свою очередь каждый из филумов *Actinomycetota*, *Pseudomonadota*, *Cyanobacteriota* и *Thermodesulfobacteriota* присутствовал не менее чем в 50 % анализируемых микробиомов, представляя не более 1 % от их относительной численности, а филумы *Mycoplasmata* и *Verrucomicrobiota* обнаруживались лишь спорадически с относительной численностью $\leq 0,01$ %. Дальнейший биоинформатический анализ выделял в составе названных филумов 16 классов, подразделяемых на 23 порядка, 36 семейств, на наиболее детализированном таксономическом уровне представленных 112 родами.

Последующее проведение множественного корреляционного анализа позволило идентифицировать 37 бактериальных родов или приравненных к ним таксономических категорий, на статистически значимом уровне ($p < 0,05$) ассоциированных с вариациями активности гуморальных факторов естественной противоинфекционной резистентности.

Представление полученных данных в формате «тепловой карты» (рис. 2) свидетельствовало о разделении значимых родов на два примерно равновеликих кластера, первый из которых (кластер I) включал 20 бактериальных таксонов, прямо ассоциированных с высокими уровнями БАСК+ЛАСК, и обратно – с активностью ТКБ. При этом умеренно выраженные положительные корреляционные связи с уровнем БАСК (в диапазоне значений r от 0,5 до 0,7 и более) зафиксированы для родов *Bacteroides*, *Lachnospira*, *Ruthenibacterium*, *Vampirovibrio*, *Peptacetobacter*, *Dielma*, *Anaeroplasmata*, *Anaerotignum* и *Lawsonibacter*. Два, входящие в состав кластера I, рода (*Hungatella* и упомянутый выше *Peptacetobacter*) с аналогичной силой положительно коррелировали с активностью лизоцима, в то время как для 14 родов установлена статистически значимая отрицательная взаимосвязь с уровнем ТКБ.

В свою очередь кластер II включал 17 родов, для 10 из которых констатированы слабые отрицательные корреляционные связи (в диапазоне значений r от -0,3 до -0,5) с уровнем БАСК, а для 4 – с уровнем ЛАСК. В свою очередь роды *Aestuariuspira*, *Alistipes*, *Subdoligranulum*, *Anaerofilum*, *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII) и *Fusicatenibacter* с аналогичной силой

положительно коррелировали с активностью ТКБ, а наиболее высокий коэффициент корреляции в паре «бактериальный таксон : ТКБ» зафиксирован для рода *Parasutterella* ($r=0,5910$; $p=0,0009$), одновременно обратно ассоциированного с уровнем БАСК ($r=-0,4328$; $p=0,0214$).

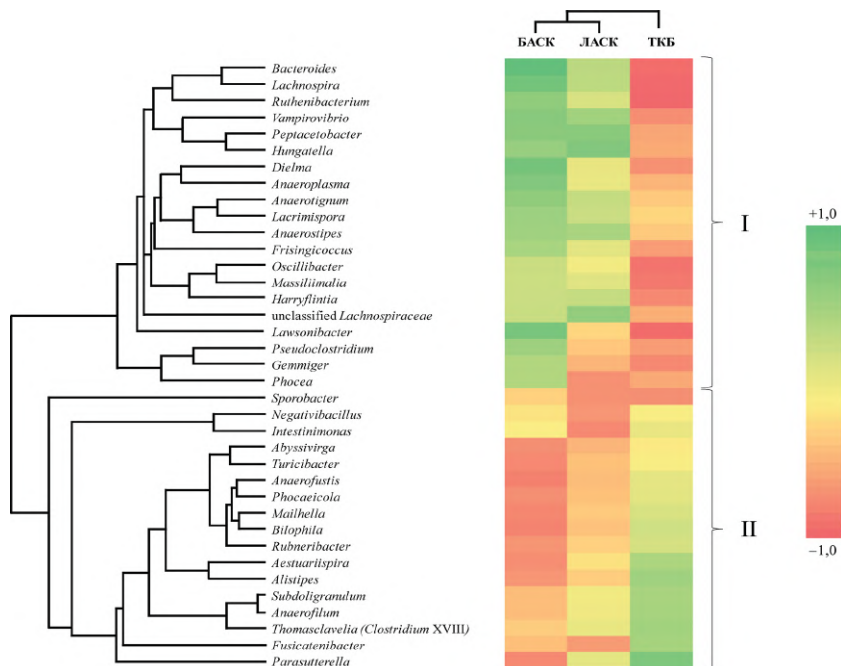


Рис. 2. Тепловая карта, представляющая ассоциации бактериальных таксонов, присутствующих в кишечном микробиоме (слева) с уровнями гуморальных факторов естественной противоинойфекционной резистентности в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres (сверху). Градации цвета отражают степень взаимосвязи: от прямой (зеленый) до обратной (красный). Справа указаны кластеры I и II, альтернативно связанные с активностями БАСК/ЛАСК/ТКБ.

Fig. 2. A heat map showing the associations between bacterial taxa present in the gut microbiome (left) and the levels of humoral factors of innate anti-infective resistance in the blood serum of Arbor Acres crossbred broiler chickens (top). The color gradations reflect the degree of correlation: from positive (green) to negative (red). Clusters I and II, which are alternatively associated with BASK/LASK/TKB activities, are shown on the right.

Дополнительный анализ микробного сообщества кишечника птицы показал наличие множественных сильных положительных коэффициентов корреляции ($r>0,7$; $p<0,001$), связывающих отдельные присутствующие

в нем бактериальные таксоны. В наибольшей степени это было характерно для представителей I кластера, 15 из 20 входящих в который родов формировали разветвленную корреляционную плеяду, каждый из членов которой был ассоциирован с другими от 1 до 7 корреляционными связями (рис. 3). Тем самым совокупность полученных данных, включающая высокую степень структурированности I кластера, характерного для птиц с высоким уровнем естественной противоинойфекционной резистентности (БАСК+ЛАСК), позволяет рассматривать его как часть «корового микробиома», обеспечивающего нормальное развитие защитных иммунных реакций у цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres.

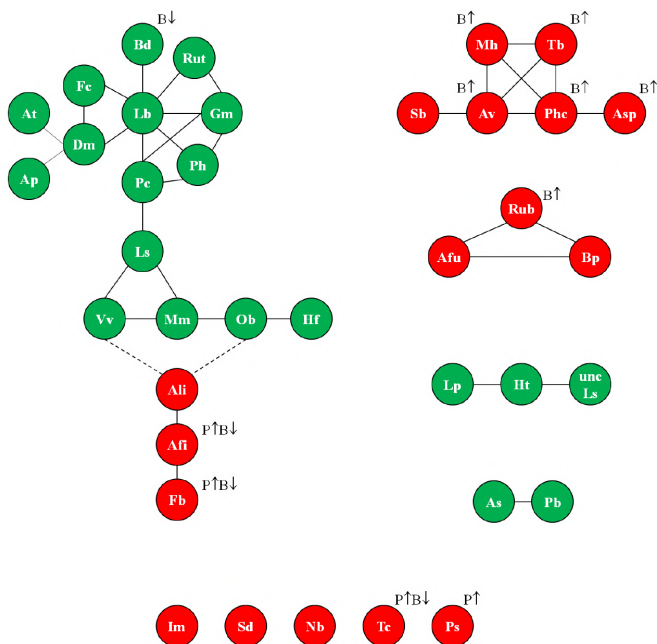


Рис. 3. Корреляционные взаимосвязи, характеризующие совместное присутствие бактериальных таксонов в кишечном микробиоме цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres. Прямые взаимосвязи указаны сплошными линиями, обратные – пунктирными линиями.

Зеленым цветом выделены таксоны I кластера, красным – II кластера (см. рис. 2). Буквенные обозначения: Bd – *Bacteroides*; Ls – *Lachnospira*; Rut – *Ruthenibacterium*; Vv – *Vampirovibrio*; Pb – *Peptacetobacter*; Ht – *Hungatella*; Dm – *Dielma*; Ap – *Anaeroplasm*; At – *Anaerotignum*; Lm – *Lacrimispora*; As – *Anaerostipes*; Fc – *Frisingicoccus*; Ob – *Oscillibacter*; Mm – *Massiliimalia*; Hf – *Harryflintia*; uncs – unclassified *Lachnospiraceae*; Lb – *Lawsonibacter*; Pc – *Pseudoclostridium*;

Ge – *Gemmiger*; Ph – *Phoceia*; Sb – *Sporobacter*; Nb – *Negativibacillus*; Im – *Intestinimonas*; Av – *Abyssivirga*; Tb – *Turicibacter*; Afu – *Anaerofustis*; Phc – *Phocaeicola*; Mh – *Mailhella*; Bp – *Bilophila*; Rub – *Rubneribacter*; Asp – *Aestuariespira*; Ali – *Alistipes*; Sg – *Subdoligranulum*; Afi – *Anaerofilum*; Tc – *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII); Fb – *Fusicatenibacter*; Pt – *Parasutterella*. Дополнительные обозначения (возле таксонов): P – расход корма на 1 кг биомассы; B – вес (живая масса) цыплят-бройлеров на 42 сут.; направление стрелок показывает повышение или снижение соответствующих параметров продуктивности.

Fig. 3. Correlation relationships characterizing the co-occurrence of bacterial taxa in the gut microbiome of Arbor Acres crossbred broiler chickens. Direct relationships are indicated by solid lines; inverse relationships by dashed lines.

Taxa from Cluster I are highlighted in green, and those from Cluster II in red (see Fig. 2). Letter abbreviations: Bd – *Bacteroides*; Ls – *Lachnospira*; Rut – *Ruthenibacterium*; Vv – *Vampirovibrio*; Pb – *Peptacetobacter*; Ht – *Hungatella*; Dm – *Dielma*; Ap – *Anaeroplasma*; At – *Anaerotignum*; Lm – *Lacrimispora*; As – *Anaerostipes*; Fc – *Frisingicoccus*; Ob – *Oscillibacter*; Mm – *Massiliimalia*; Hf – *Harryflintia*; uncles – unclassified *Lachnospiraceae*; Lb – *Lawsonibacter*; Pc – *Pseudoclostridium*; Ge – *Gemmiger*; Ph – *Phoceia*; Sb – *Sporobacter*; Nb – *Negativibacillus*; Im – *Intestinimonas*; Av – *Abyssivirga*; Tb – *Turicibacter*; Afu – *Anaerofustis*; Phc – *Phocaeicola*; Mh – *Mailhella*; Bp – *Bilophila*; Rub – *Rubneribacter*; Asp – *Aestuariespira*; Ali – *Alistipes*; Sg – *Subdoligranulum*; Afi – *Anaerofilum*; Tc – *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII); Fb – *Fusicatenibacter*; Pt – *Parasutterella*.

Additional symbols (next to taxa): P – feed consumption per 1 kg of biomass; W – weight (live weight) of broiler chickens at 42 days; the direction of the arrows indicates an increase or decrease in the corresponding productivity parameters.

В противоположность этому, представители II кластера были относительно разрознены, в том числе 5 из них (*Intestinimonas*, *Subdoligranulum*, *Negativibacillus*, *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII) и *Parasutterella*) не показали значимых взаимосвязей с какими-либо другими членами микробного сообщества, а трехкомпонентная ассоциация «*Alistipes* – *Anaerofilum* – *Fusicatenibacter*» демонстрировала выраженную обратную взаимосвязь ($r < -0,7$; $p < 0,001$) с описанной выше корреляционной плеядой I кластера (рис. 3). При этом присутствие названных выше бактериальных таксонов в составе кишечного микробиома птицы представляется неблагоприятным феноменом, являющимся вероятной причиной истощения гуморальных факторов естественной противомикробной резистентности (БАСК+ЛАСК) с последующей компенсаторной индукцией ТКБ.

В контексте проведенного исследования представляется важным, что наличие и численность ряда бактериальных таксонов II кластера в кишечных микробиомах модулировалось использованием кормовых добавок, обладающих прямым антибактериальным эффектом [2] или нарушающих химическую коммуникацию в бактериальных сообществах [20]. В частности, относительное содержание родов *Subdoligranulum* и *Anaerofilum* имело тенденцию к снижению в присутствии 4-гексилрезорцинола, а роды

Thomasclavelia (*Clostridium* XVIII) и *Fusicatenibacter* частично ингибировались в присутствии кверцетина. В свою очередь присутствие рода *Parasutterella* наиболее выражено отрицательно коррелировало с кормовым использованием 7-гидроксикумарина ($r=-0,3894$ $p=0,0406$). Соответственно, приведенные выше данные могут частично объяснять эффекты кормовых добавок на профиль факторов естественной противоинойфекционной резистентности сыворотки крови цыплят-бройлеров через воздействие на компоненты их кишечного микробиома, ассоциированные с изменением баланса (БАСК+ЛАСК):ТКБ.

В завершение исследования уровни факторов естественной резистентности, состав кишечных микробиомов цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres и эффекты кормовых добавок были сопоставлены с зоотехническими показателями продуктивности, принятыми для оценки эффективности мясного птицеводства [8].

В первом варианте анализа единственная статистически значимая ассоциация ($r=0,4585$; $p=0,0141$) была зафиксирована между уровнем ТКБ и расходом корма на 1 кг биомассы (рис. 4). При этом наиболее вероятным объяснением подобной зависимости является перенаправление питательных веществ в сторону от продуктивных метаболических процессов с их расходованием на активацию иммунного ответа и поддержание воспаления [22], маркером которых является повышенный уровень ТКБ.

В свою очередь, оценка роли микробиома показала связь повышенного расхода корма на 1 кг биомассы с рядом бактериальных таксонов, для которых ранее была продемонстрирована ассоциированность с повышенным уровнем сывороточного ТКБ (рис. 3). В частности, снижение эффективности конверсии корма в биомассу зафиксировано для родов *Parasutterella* ($r=0,6922$; $p=0,00005$), *Anaerofilum* ($r=0,6962$; $p=0,00003$), *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII) ($r=0,4333$ $p=0,0213$) и *Fusicatenibacter* ($r=0,4218$; $p=0,0254$), что в трёх последних случаях сопровождалось статистически значимым негативным эффектом на итоговый вес тела птицы к 42 суткам выкармливания. В то же время указанные зависимости в связке «микробиом – продуктивность» не могут быть интерпретированы как однозначно однонаправленные: для некоторых таксонов II кластера показан стимулирующий эффект на итоговую биомассу, потенциально объясняемый не столько их взаимодействием с систему естественной противоинойфекционной резистентности, сколько вероятной реализацией метаболических путей, важных для эффективного пластического метаболизма в теле птицы.

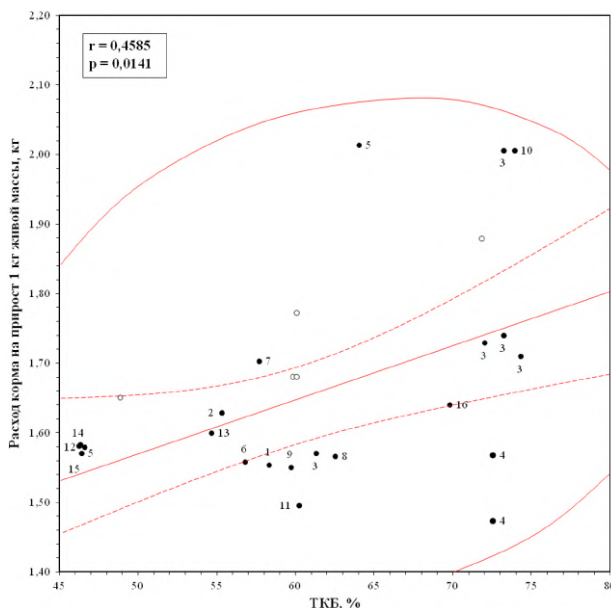


Рис. 4. Распределение величин, характеризующих расход корма на 1 кг биомассы, в зависимости от уровней ТКБ в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres.

Обозначения 1-16 аналогичны рис. 1. Красными линиями обозначены параметры связи между анализируемыми параметрами: сплошная линия отражает коэффициент линейной регрессии; пунктирные линии обозначают 95 % доверительный интервал; сплошная линия эллипса ограничивает облако рассеяния значений исследуемой выборки.

Fig. 4. Distribution of values characterizing feed conversion per 1 kg of biomass, depending on TKB levels in the blood serum of Arbor Acres crossbred broiler chickens.

Legend 1–16 is the same as in Fig. 1. The red lines indicate the relationships between the analyzed parameters: the solid line represents the linear regression coefficient; the dashed lines denote the 95% confidence interval; the solid line of the ellipse bounds the scatter plot of the values from the study sample.

Наконец, учет эффектов отдельных кормовых добавок показал, что некоторые из них, вызывающие сопряженные изменения в составах кишечных микробиомов и профилях факторов естественной резистентности, позволяют снижать расход корма на прирост 1 кг биомассы. Указанная тенденция обнаруживалась для пробиотического препарата на основе *B. cereus* IP 5832, антибиотика хлортетрациклина и 4-гексилрезорцинола, будучи наиболее выраженной при кормовом использовании 7-гидроксикумарина ($r=-0,4570$; $p=0,0145$).

Заключение

Результаты проведенного исследования впервые позволяют оценить ассоциации профиля факторов естественной противомикробной резистентности в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres с составом их кишечного микробиома, а также рядом показателей сельскохозяйственной продуктивности, и на этой основе сформировать представления о причинно-следственных взаимосвязях в системе «микробиом – естественный иммунитет – эффективность птицеводства».

Во-первых, четко обозначена обратная зависимость между уровнями БАСК и ЛАСК как показателей высокого уровня естественной устойчивости организма птицы к бактериальной агрессии, а с другой – повышенной активностью ТКБ (бета-лизуна) как индикатора истощения названных защитных механизмов.

Во-вторых, определены перечни бактериальных таксонов, присутствие которых в микробиоме кишечника цыплят-бройлеров является условием для нормального развития естественного иммунитета или его «срыва» с индукцией воспалительного процесса, сопровождающегося дегрануляцией тромбоцитов.

В-третьих, показано, что развитие эндогенного воспаления, обусловленного определенными членами кишечного микробиома и характеризующегося изменением баланса (БАСК+ЛАСК)/ТКБ, негативно сказывается на эффективности птицеводства, в частности – снижает конверсию корма в биомассу и в ряде случаев результируется в уменьшении итогового веса цыплят-бройлеров.

Указанные взаимосвязи могут быть проиллюстрированы на примере бактерий рода *Parasutterella*, на наиболее высоком таксономическом уровне относящихся к филуму *Pseudomonadota* (рис. 5). При этом ранее для представителей данного таксона, обнаруживаемого в микробиомах человека и животных, показана статистически значимая ассоциация с высокоточным уровнем бактериальных липополисахаридов (ЛПС), отражающей степень эндотоксинемии [9] и ассоциированной с развитием ряда патологий, включая воспалительные заболевания кишечника [25]. В рассматриваемом же случае аналогичная эндотоксинемия представляется наиболее вероятной причиной снижения БАСК (как следствия активации белков системы комплемента на циркулирующих ЛПС) с одновременным ростом уровня сывороточного ТКБ (как результата связывания ЛПС и комплексов «ЛПС-комплемент» с соответствующими рецепторами на поверхности активируемых тромбоцитов) [23]. В свою очередь эндотоксинемия и

обусловленные ей воспалительные реакции видятся условием для перенаправления питательных веществ в сторону от продуктивных метаболических процессов с нарушением процесса конверсии корма в биомассу.

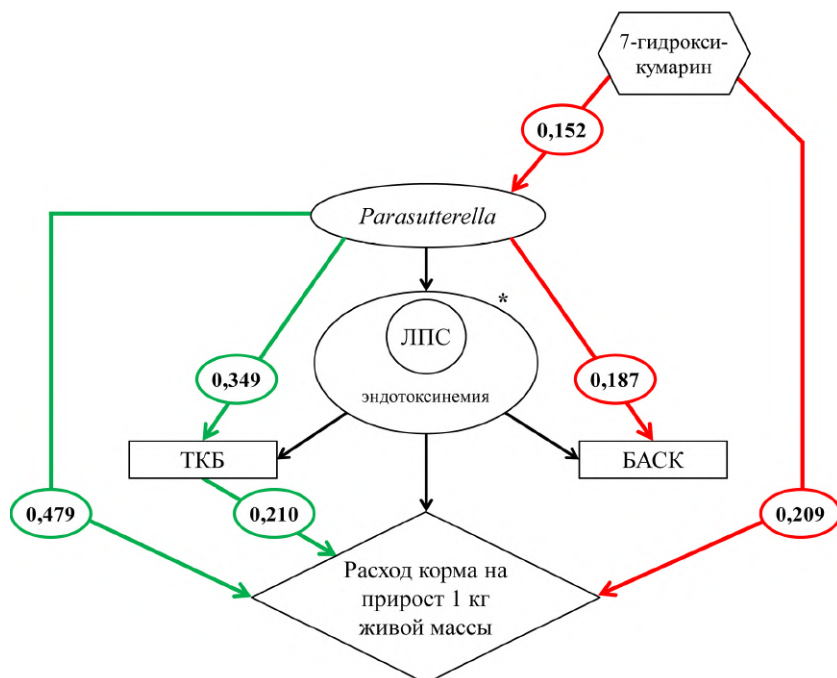


Рис. 5. Вероятные причинно-следственные взаимосвязи в системе «микробиом – естественный иммунитет – эффективность птицеводства» (на примере рода *Parasutterella*). Зеленые стрелки указывают повышающие воздействия, красные – понижающие воздействия. Цифры на стрелках показывают значения коэффициентов детерминации (r^2), отражающие силу данных воздействий.

Fig. 5. Probable cause-and-effect relationships in the “microbiome – innate immunity – poultry production efficiency” system (using the genus *Parasutterella* as an example). Green arrows indicate positive effects, while red arrows indicate negative effects. The numbers on the arrows indicate the values of the coefficients of determination (r^2), reflecting the strength of these effects.

В рассматриваемом контексте также важно, что состав кишечного микробиома, в том числе включающий бактериальные таксоны, значимые для определения баланса гуморальных факторов естественной противомикробной резистентности, может модулироваться воздействием ряда кормовых добавок. В частности, в рассматриваемом выше приме-

ре относительное присутствие бактерий рода *Parasutterella* эффективно снижается в присутствии 7-гидроксикумарина – ингибитора химической коммуникации у представителей филума *Pseudomonadota* [19], что результируется в нормализации значений расхода корма на 1 кг живой массы цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres (рис. 5).

Тем самым результаты проведенного исследования являются шагом на пути совершенствования инструментария оценки эффективности схем кормления сельскохозяйственной птицы, а именно – обосновывают анализ баланса сывороточных факторов (БАСК+ЛАСК)/ТКБ как индикаторов противо- и провоспалительных процессов, зависящих от состава кишечного микробиома и оказывающих воздействие на параметры мясной продуктивности.

Заключение комитета по этике. Протокол исследования одобрен Комитетом по этике животных ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (Постановление № 1/2019 от 25 марта 2019 г. и Постановление № 2/2022 от 28 марта 2022 г.).

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

Информация о спонсорстве. Экспериментальные группы, получавшие химически синтезированные аналоги молекул растительного происхождения (гамма-октанолактон, 7-гидроксикумарин, ванилин/ванилиновая кислота, 4-гексилрезорцинол, кверцетин или их комбинации) были проанализированы при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-16-00036-П. Экспериментальные группы, рацион которых включал пробиотическую добавку или антибиотик хлортетрациклин, были исследованы в соответствии с планом НИР ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН FNWZ-2025-0003.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Центру коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» (<https://ikvs.info/institut/laboratorii/czkp>) за техническую помощь в проведении анализа микробиома кишечника цыплят-бройлеров.

Список литературы

1. Бухарин, О. В., & Сулейманов, К. Г. (1998). Свойства и функции тромбоцитарного катионного белка. *Успехи современной биологии*, 118(2), 194–204. EDN: <https://elibrary.ru/YMSYTR>
2. Грозина, А. А. (2014). Состав микрофлоры желудочно-кишечного тракта у цыплят-бройлеров при воздействии пробиотика и антибиотика (по данным T-RFLP-RT-PCR). *Сельскохозяйственная биология*, (6), 46–58. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2014.6.46rus>. EDN: <https://elibrary.ru/TEPGCX>

3. Дерябин, Д. Г., Каримов, И. Ф., Манухов, И. В., Толмачева, Н. А., & Балабанов, В. П. (2012). Дифференцированная оценка бактерицидных систем сывортки крови с использованием рекомбинантных люминесцирующих штаммов *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*, 154(7), 68–73. EDN: <https://elibrary.ru/PANBJB>
4. Дусакаев, Г. К., Рахматуллин, Ш. Г., Косян, Д. Б., Русакова, Е. А., Кван, О. В., & Левахин, Г. И. (2022). Влияние совместного использования гамма-окталактона и хлортетрациклина в рационе бройлеров: живая масса, эффективность использования корма и микробиом слепого кишечника. *Аграрная наука*, (9), 47–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-47-53>. EDN: <https://elibrary.ru/FSEANC>
5. Дусакаев, Г. К., Лазебник, К. С., & Климова, Т. А. (2022). Оценка микробного разнообразия слепого отдела кишечника цыплят-бройлеров при введении кумарина и кормового антибиотика в рацион. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*, 17(4), 555–566. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-555-566>. EDN: <https://elibrary.ru/FUHJBX>
6. Дусакаев, Г. К., Русакова, Е. А., & Дерябин, Д. Г. (2022). Использование гамма-октанолактона в рационе бройлеров: микробиом кишечника. *Международный вестник ветеринарии*, (4), 152–158. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.152>. EDN: <https://elibrary.ru/XGADAX>
7. Дусакаев, Г. К., Власенко, Л. В., Косян, Д. Б., & Курилкина, М. Я. (2023). Влияние малых молекул растительного происхождения на микробное разнообразие слепого отдела кишечника цыплят-бройлеров. *Птицеводство*, (4), 46–51. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-4-46-516>. EDN: <https://elibrary.ru/SASHWF>
8. Егоров, И. А., Околелова, Т. М., Тищенко, А. Н., Ленкова, Т. Н., Паньков, П. Н., Езерская, А. В., ... & Громова, Т. И. (2004). *Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы* (В. И. Фисинин & Ш. А. Имангулов, Ред.). Сергиев Посад. 44 с. EDN: <https://elibrary.ru/SWDFID>
9. Кабурова, А. Н., Драпкина, О. М., Юдин, С. М., Яфарова, А. А., Корецкий, С. Н., Покровская, М. С., ... & Серебрянская, З. З. (2022). Связь микробиоты кишечника с системным воспалением и эндотоксемией у пациентов с хронической сердечной недостаточностью и сохраненной фракцией выброса. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 21(9), 3315. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3315>. EDN: <https://elibrary.ru/SOFRXO>
10. Ляпин, О. А., Торшков, А. А., Тайгузин, Р. Ш., Хабибуллин, Э. Г., Окунев, Д. А., & Джамбулатова, К. Д. (2022). Физиологический статус бычков при минимизации технологического прессинга комплексами антистрессантов. *Известия Оренбургского Государственного Аграрного Университета*, 4(96), 253–260. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-253-260>. EDN: <https://elibrary.ru/EUZOGG>

11. Садовников, Н. В., Придыбайло, Н. Д., Верещак, Н. А., & Заслонов, А. С. (2009). *Общие и специальные методы исследования крови птиц промышленных кроссов: монография*. Екатеринбург-Санкт-Петербург: Уральская ГСХА, НПП «АВИВАК». 85 с. ISBN: 978-5-87203-260-6. EDN: <https://elibrary.ru/SNDNEX>
12. Саруханов, В. Я., Исамов, Н. Н., & Колганов, И. М. (2012). Метод определения лизоцимной активности крови у сельскохозяйственных животных. *Сельскохозяйственная биология*, 47(2), 119–122. EDN: <https://elibrary.ru/PVWOUH>
13. Серебряная, Н. Б., Якуцени, П. П., & Клишко, Н. Н. (2017). Роль тромбоцитов в патогенезе бактериальных инфекций. *Журнал инфектологии*, 9(4), 5–13. <https://doi.org/10.22625/2072-6732-2017-9-4-5-13>. EDN: <https://elibrary.ru/YNMCBD>
14. Aviagen. (2022). *Спецификации бройлерных рационов корма Arbor Acres*. https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_TechDocs/AA_BroilerNutritionSpecifications2022_RU.pdf
15. Abdul-Aziz, T. A., & el-Sukhon, S. N. (1996). Serum sensitivity and apathogenicity for chickens and chick embryos of *Escherichia coli* J5 strain. *Veterinary research*, 27(3), 267–271.
16. Deryabin, D. G., Kosyan, D. B., Inchagova, K. S., & Duskaev, G. K. (2023). Plant-Derived Quorum Sensing Inhibitors (Quercetin, Vanillin and Umbelliferon) Modulate Cecal Microbiome, Reduces Inflammation and Affect Production Efficiency in Broiler Chickens. *Microorganisms*, 11(5), 1326. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051326>. EDN: <https://elibrary.ru/DTQURZ>
17. Duskaev, G., Kvan, O., Kosyan, D., Rakhmatullin, S., & Levakhin, G. (2021). Coumarin derivative and *Bacillus cereus* change live weight and cecal ecology in broilers. *AIMS Agric. Food*, 6(1), 360–380. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021022>. EDN: <https://elibrary.ru/NBMBIY>
18. ElHag, S., Motelib, A. A., Soltan, M. A., & Gawad, M. A. (2021). Growth Performance and Health Status of Broiler Chickens Treated with Natural Kaolin. *World. Vet. J.*, 11(1), 29–36. <https://doi.org/10.54203/scil.2021.wvj4>. EDN: <https://elibrary.ru/KLZDDI>
19. El-Sawy, E. R., Abdel-Aziz, M. S., Abdelmegeed, H., & Kirsch, G. (2024). Coumarins: Quorum Sensing and Biofilm Formation Inhibition. *Molecules*, 29(19), 4534. <https://doi.org/10.3390/molecules29194534>. EDN: <https://elibrary.ru/SVPTEW>
20. Falà, A. K., Álvarez-Ordóñez, A., Filloux, A., Gahan, C. G. M., & Cotter, P. D. (2022). Quorum sensing in human gut and food microbiomes: Significance and potential for therapeutic targeting. *Frontiers in microbiology*, 13, 1002185. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1002185>. EDN: <https://elibrary.ru/WRDZZC>
21. Fernández, H., Giusti, G., & Bertoglio, J. C. (1995). Effect of the complement system on the sensitivity of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* to human blood serum. *Brazilian journal of medical and biological research*, 28(2), 227–229.

22. Gouvêa, V. N., Cooke, R. F., & Marques, R. S. (2022). Impacts of stress-induced inflammation on feed intake of beef cattle. *Front. Anim. Sci.*, 3, 962748. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.962748>. EDN: <https://elibrary.ru/ASCMWN>
23. Hamzeh-Cognasse, H., Damien, P., Chabert, A., Pozzetto, B., Cognasse, F., & Garraud, O. (2015). Platelets and infections – complex interactions with bacteria. *Frontiers in immunology*, 6, 82. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00082>. EDN: <https://elibrary.ru/UUFSNX>
24. Jiang, L., Li, Y., Wang, L., Guo, J., Liu, W., Meng, G., Zhang, L., Li, M., Cong, L., & Sun, M. (2021). Recent Insights Into the Prognostic and Therapeutic Applications of Lysozymes. *Frontiers in pharmacology*, 12, 767642. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.767642>. EDN: <https://elibrary.ru/COJCZB>
25. Ju, T., Kong, J. Y., Stothard, P., & Willing, B. P. (2019). Defining the role of *Parasutterella*, a previously uncharacterized member of the core gut microbiota. *The ISME journal*, 13(6), 1520–1534. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0364-5>. EDN: <https://elibrary.ru/BSADBY>
26. Karakolev, R., Petrova-tsenin, P., Petrova, R., & Koynarski, T. (2022). Effect of Avigen immunomodulator on beta lysine activity in broilers. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), 260–265. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1013030>. EDN: <https://elibrary.ru/SQGOMF>
27. Pashtetsky, V., Ostapchuk, P., Postnikova, O., Zubochenko, D., & Kuevda, T. (2020). Effect of *Satureja montana* essential oil on the bactericidal activity of broiler chickens blood serum. *E3S Web Conf.*, 224. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022404023>. EDN: <https://elibrary.ru/YPGURJ>
28. Shajahmetova, E., Deryabin, D., & Duskaev, G. (2021). Gamma Lactone and vanillic acid change the microbiome of broiler blind appendage. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.*, 35(S1), S74. EDN: <https://elibrary.ru/NMEVGQ>
29. Stratton, C. W. (1988). Serum bactericidal test. *Clinical microbiology reviews*, 1(1), 19–26. <https://doi.org/10.1128/CMR.1.1.19>
30. Thaïss, C. A., Zmora, N., Levy, M., & Elinav, E. (2016). The microbiome and innate immunity. *Nature*, 535(7610), 65–74. <https://doi.org/10.1038/nature18847>. EDN: <https://elibrary.ru/WPXOTL>

References

1. Bukharin, O. V., & Suleimanov, K. G. (1998). Properties and functions of platelet cationic protein. *Advances in Modern Biology*, 118(2), 194–204. EDN: <https://elibrary.ru/YMSYTR>
2. Grozina, A. A. (2014). Composition of gastrointestinal tract microflora in broiler chickens under the effect of probiotic and antibiotic (based on T-RFLP-RT-PCR data). *Agricultural Biology*, (6), 46–58. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2014.6.46rus>. EDN: <https://elibrary.ru/TEPGCX>

3. Deryabin, D. G., Karimov, I. F., Manukhov, I. V., Tolmacheva, N. A., & Balabanov, V. P. (2012). Differentiated assessment of bactericidal systems of blood serum using recombinant luminescent strains of *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 154(7), 68–73. EDN: <https://elibrary.ru/PANBJB>
4. Duskaev, G. K., Rakhmatullin, Sh. G., Kosyan, D. B., Rusakova, E. A., Kvan, O. V., & Levakhin, G. I. (2022). Effect of combined use of gamma-octalactone and chlor-tetracycline in the diet of broilers: live weight, feed efficiency, and cecal microbiome. *Agrarian Science*, (9), 47–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-47-53>. EDN: <https://elibrary.ru/FSEANC>
5. Duskaev, G. K., Lazebnik, K. S., & Klimova, T. A. (2022). Assessment of microbial diversity of the cecal section of the intestine of broiler chickens when coumarin and feed antibiotic are introduced into the diet. *Vestnik of the Russian University of Peoples' Friendship. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, 17(4), 555–566. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-555-566>. EDN: <https://elibrary.ru/FUHJBX>
6. Duskaev, G. K., Rusakova, E. A., & Deryabin, D. G. (2022). Use of gamma-octa-nolactone in the diet of broilers: intestinal microbiome. *International Veterinary Bulletin*, (4), 152–158. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.152>. EDN: <https://elibrary.ru/XGADAX>
7. Duskaev, G. K., Vlasenko, L. V., Kosyan, D. B., & Kurilkina, M. Ya. (2023). Influence of small molecules of plant origin on microbial diversity of the cecal section of the intestine of broiler chickens. *Poultry Farming*, (4), 46–51. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-4-46-516>. EDN: <https://elibrary.ru/SASHWF>
8. Egorov, I. A., Okolelova, T. M., Tishenkov, A. N., Lenkova, T. N., Pan'kov, P. N., Ezerskaya, A. V., ... & Gromova, T. I. (2004). *Methodology for conducting scientific and production studies on feeding agricultural poultry* (V. I. Fisinin & Sh. A. Imangulov, Eds.). Sergiev Posad. 44 p. EDN: <https://elibrary.ru/SWDFID>
9. Kaburova, A. N., Drapkina, O. M., Yudin, S. M., Yafarova, A. A., Koretsky, S. N., Pokrovskaya, M. S., ... & Serebryanskaya, Z. Z. (2022). Relationship of intestinal microbiota with systemic inflammation and endotoxemia in patients with chronic heart failure and preserved ejection fraction. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 21(9), 3315. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3315>. EDN: <https://elibrary.ru/SOFRXO>
10. Lyapin, O. A., Torshkov, A. A., Taiguzin, R. Sh., Khabibullin, E. G., Okunev, D. A., & Dzhambulatova, K. D. (2022). Physiological status of bulls under minimization of technological pressure by complexes of anti-stress agents. *Izvestia of Orenburg State Agrarian University*, 4(96), 253–260. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-253-260>. EDN: <https://elibrary.ru/EUZOGG>
11. Sadovnikov, N. V., Pridybailo, N. D., Vereshchak, N. A., & Zaslonov, A. S. (2009). *General and special methods for studying blood of poultry of industrial crosses:*

- monograph*. Yekaterinburg–St. Petersburg: Ural State Agricultural Academy, NPP “AVIVAK”. 85 p. ISBN: 978-5-87203-260-6. EDN: <https://elibrary.ru/SNDNEX>
12. Sarukhanov, V. Ya., Isamov, N. N., & Kolganov, I. M. (2012). Method for determining lysozyme activity of blood in farm animals. *Agricultural Biology*, 47(2), 119–122. EDN: <https://elibrary.ru/PVWOUH>
 13. Serebryanaya, N. B., Yakutseni, P. P., & Klimko, N. N. (2017). The role of platelets in the pathogenesis of bacterial infections. *Journal of Infectology*, 9(4), 5–13. <https://doi.org/10.22625/2072-6732-2017-9-4-5-13>. EDN: <https://elibrary.ru/YNMCBD>
 14. Aviagen. (2022). *Arbor Acres broiler feed ration specifications*. https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_TechDocs/AA_BroilerNutritionSpecifications2022_RU.pdf
 15. Abdul-Aziz, T. A., & el-Sukhon, S. N. (1996). Serum sensitivity and apathogenicity for chickens and chick embryos of *Escherichia coli* J5 strain. *Veterinary research*, 27(3), 267–271.
 16. Deryabin, D. G., Kosyan, D. B., Inchagova, K. S., & Duskaev, G. K. (2023). Plant-Derived Quorum Sensing Inhibitors (Quercetin, Vanillin and Umbelliferon) Modulate Cecal Microbiome, Reduces Inflammation and Affect Production Efficiency in Broiler Chickens. *Microorganisms*, 11(5), 1326. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051326>. EDN: <https://elibrary.ru/DTQURZ>
 17. Duskaev, G., Kvan, O., Kosyan, D., Rakhmatullin, S., & Levakhin, G. (2021). Coumarin derivative and *Bacillus cereus* change live weight and cecal ecology in broilers. *AIMS Agric. Food*, 6(1), 360–380. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021022>. EDN: <https://elibrary.ru/NBMBIY>
 18. ElHag, S., Motelib, A. A., Soltan, M. A., & Gawad, M. A. (2021). Growth Performance and Health Status of Broiler Chickens Treated with Natural Kaolin. *World. Vet. J.*, 11(1), 29–36. <https://doi.org/10.54203/scil.2021.wvj4>. EDN: <https://elibrary.ru/KLZDDI>
 19. El-Sawy, E. R., Abdel-Aziz, M. S., Abdelmegeed, H., & Kirsch, G. (2024). Coumarins: Quorum Sensing and Biofilm Formation Inhibition. *Molecules*, 29(19), 4534. <https://doi.org/10.3390/molecules29194534>. EDN: <https://elibrary.ru/SVPTEW>
 20. Falà, A. K., Álvarez-Ordóñez, A., Filloux, A., Gahan, C. G. M., & Cotter, P. D. (2022). Quorum sensing in human gut and food microbiomes: Significance and potential for therapeutic targeting. *Frontiers in microbiology*, 13, 1002185. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1002185>. EDN: <https://elibrary.ru/WRDZZC>
 21. Fernández, H., Giusti, G., & Bertoglio, J. C. (1995). Effect of the complement system on the sensitivity of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* to human blood serum. *Brazilian journal of medical and biological research*, 28(2), 227–229.
 22. Gouvêa, V. N., Cooke, R. F., & Marques, R. S. (2022). Impacts of stress-induced inflammation on feed intake of beef cattle. *Front. Anim. Sci.*, 3, 962748. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.962748>. EDN: <https://elibrary.ru/ASCMWN>

23. Hamzeh-Cognasse, H., Damien, P., Chabert, A., Pozzetto, B., Cognasse, F., & Garraud, O. (2015). Platelets and infections – complex interactions with bacteria. *Frontiers in immunology*, 6, 82. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00082>. EDN: <https://elibrary.ru/UUFSNX>
24. Jiang, L., Li, Y., Wang, L., Guo, J., Liu, W., Meng, G., Zhang, L., Li, M., Cong, L., & Sun, M. (2021). Recent Insights Into the Prognostic and Therapeutic Applications of Lysozymes. *Frontiers in pharmacology*, 12, 767642. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.767642>. EDN: <https://elibrary.ru/COJCZB>
25. Ju, T., Kong, J. Y., Stothard, P., & Willing, B. P. (2019). Defining the role of *Parasutterella*, a previously uncharacterized member of the core gut microbiota. *The ISME journal*, 13(6), 1520–1534. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0364-5>. EDN: <https://elibrary.ru/BSADBY>
26. Karakolev, R., Petrova-tsenin, P., Petrova, R., & Koynarski, T. (2022). Effect of Avigen immunomodulator on beta lysine activity in broilers. *Yüzuncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), 260–265. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1013030>. EDN: <https://elibrary.ru/SQGOMF>
27. Pashtetsky, V., Ostapchuk, P., Postnikova, O., Zubochenko, D., & Kuevda, T. (2020). Effect of *Satureja montana* essential oil on the bactericidal activity of broiler chickens blood serum. *E3S Web Conf.*, 224. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022404023>. EDN: <https://elibrary.ru/YPGURJ>
28. Shajahmetova, E., Deryabin, D., & Duskaev, G. (2021). Gamma Lactone and vanillic acid change the microbiome of broiler blind appendage. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.*, 35(S1), S74. EDN: <https://elibrary.ru/NMEVGQ>
29. Stratton, C. W. (1988). Serum bactericidal test. *Clinical microbiology reviews*, 1(1), 19–26. <https://doi.org/10.1128/CMR.1.1.19>
30. Thaiss, C. A., Zmora, N., Levy, M., & Elinav, E. (2016). The microbiome and innate immunity. *Nature*, 535(7610), 65–74. <https://doi.org/10.1038/nature18847>. EDN: <https://elibrary.ru/WPXOTL>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Дерябин Дмитрий Геннадьевич, доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук

ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация

dgderyabin@yandex.ru

Власенко Людмила Викторовна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук
ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
lv.efremova@yandex.ru*

Каримов Ильшат Файзелгаянович, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве; доцент кафедры эпидемиологии и инфекционных болезней *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации*
ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; ул. Советская, 6, г. Оренбург, 460014, Российская Федерация
ifkarimov@yandex.ru

Дускаев Галимжан Калиханович, доктор биологических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук*
ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
gduskaev@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dmitry G. Deryabin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry *Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences*
29, 9 Yanvary Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
dgderyabin@yandex.ru
SPIN-code: 8243-2537
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-7947>
ResearcherID: K-5335-2012
Scopus Author ID: 57218145388

Ludmila V. Vlasenko, Candidate of Biological Sciences, Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry *Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences*

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation

lv.efremova@yandex.ru

SPIN-code: 2484-2215

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3790-2783>

ResearcherID: E-8547-2017

Scopus Author ID: 55344908600

Ilshat F. Karimov, Candidate of Biological Sciences, Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry; Associate Professor, Department of Epidemiology and Infectious Diseases
Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State Medical University of the Ministry of Health of Russia

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 6, Sovetskaya Str., Orenburg, 460014 Russian Federation

ifkarimov@yandex.ru

SPIN-code: 2898-9150

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6853-4242>

ResearcherID: F-2041-2015

Scopus Author ID: 26650061100

Galimzhan K. Duskaev, Doctor of Biological Sciences, Professor RAS, Leading Research Assistant, Department of Feeding for Farm Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation

gduskaev@mail.ru

SPIN-code: 7297-3319

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367>

ResearcherID: N-4454-2014

Scopus Author ID: 56192764700

Поступила 28.08.2025

После рецензирования 30.09.2025

Принята 08.10.2025

Received 28.08.2025

Revised 30.09.2025

Accepted 08.10.2025

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1782](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1782)EDN: [PRQOKP](https://www.edn.ru/PRQOKP)

УДК 591.1 .632 .939:591.169.1



Применение фитопрепарата при микст-инвазиях у лабораторных животных и для коррекции нарушений репродуктивных функций

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

Аннотация

Обоснование. В настоящее время при изучении патологий репродуктивной функции как у человека, так и у животных особое внимание уделяется нарушениям в этой сфере при инфекционных и инвазионных болезнях. Известно, что на нарушение репродуктивных функций влияет не только наличие патогенного агента, но и нарушения в иммунном гомеостазе.

Цель исследования – изучить мазки-отпечатки семенников у половозрелых самцов крыс «Вистар» с индуцированной иммунной недостаточностью при ее коррекции растительным комплексом и определить изменения в развитии эмбрионов, инвазированных гельминтами беременными самок мышей и крыс на фоне применения данного препарата

Материалы и методы. Для изучения влияния гельминтозов на репродуктивную систему самок, методом аналогов были отобраны беспородные белые мыши в возрасте 3,5-4,5 месяца (самки, массой 23,5±1,15 г), инвазированные гельминтами. Далее готовили мазки-отпечатки семенников у 8-ми месячных самцов белых крыс «Вистар» при индцировании иммунной недостаточности на фоне инъекций дексаметазона с последующей ее коррекцией растительным комплексом. Полученные мазки исследовали на увеличении $\times 200$, данные обрабатывали с использованием стандартных пакетов программ MS Excel и Statgraphics. При оценке однородности групп и достоверности различий средних между группами использовали непараметрический U-тест Манна-Уитни. Уровень статистической значимости полученных различий между сравниваемыми выборками принимали при $p < 0.05$.

Результаты. Проведенные сравнительные исследования по определению эмбриотоксичности фитопрепарата позволяют сделать вывод об отсутствии таковой и возможном применении фитоантигельминтиков на основе кладонии. При морфологическом исследовании мазков-отпечатков семенников у крыс находившихся в состоянии иммунодепрессии установлено, что количество нормальных спермиев при иммунодепрессии составило $5,3 + 2,3$, в контрольной группе их количество было намного выше ($38,2 + 15,5$). В то же время в группе крыс, получавших препарат, количество спермиев возрастало до $12,5 + 7,3$.

Результаты исследований мазков-отпечатков различных групп самцов крыс свидетельствуют, что введение лекарственного препарата, приготовленного из растений с противопаразитарными свойствами на основе кладонии, и источника кальция препарата «Ультрамел» уменьшает деструктивные изменения спермиев и сперматогенного эпителия при введении дексаметазона. Препарат эффективен при воспроизведении нарушений сперматогенеза при иммунной недостаточности, так как оказывает стабилизирующее действие на сперматогенез (отмечены митозы, которые отсутствовали в группе не получавшей препарат, однако были характерны для сперматогенеза у крыс контрольной группы). В результате проведенного эксперимента, помимо подтвержденного эффекта растительной композиции, установлено, что моделирование иммунной недостаточности при помощи максимальных суточных доз дексаметазона достаточно эффективно. Данная модель с успехом может использоваться для изучения действия иммуностимуляторов различного происхождения, в т.ч. растительного, как, например, в случае использования растительного комплекса и препарата «Ультрамел».

Заключение. Исследования возможностей протекции репродуктивной системы при гельминтозах и моделирование иммунной недостаточности при помощи максимальных суточных доз дексаметазона показали эффективность применения фитопрепаратов на основе механообработанного ягеля. Установлено отсутствие эмбриотоксического и тератогенного эффекта данного препарата у лабораторных крыс Вистар, и возможность коррекции нарушений сперматогенеза.

Ключевые слова: фитопрепарат; микст-инвазии; лабораторные животные; коррекция нарушений; репродуктивные функции

Для цитирования. Жданова, О. Б., & Часовских, О. В. (2026). Применение фитопрепарата при микст-инвазиях у лабораторных животных и для коррекции нарушений репродуктивных функций. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 55–71. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1782>

Application of phytopreparation in mixed infections in laboratory animals and for correction of reproductive function disorders

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. Currently, when studying reproductive function pathologies in both humans and animals, special attention is paid to disorders in this area in the case of infectious and parasitic diseases. It is known that reproductive functions are affected not only by the presence of a pathogenic agent, but also by disorders of immune homeostasis.

The **purpose** of this study is study smears from the testicles of sexually mature male Wistar rats with induced immunodeficiency when it is corrected with a plant complex, and to determine changes in the development of embryos of pregnant mice and rats infected with helminths when this drug is used..

Materials and methods. To study the effect of helminthiasis on the reproductive system of females, we selected non-pedigree white mice aged 3.5-4.5 months (females weighing 23.5 ± 1.15 g) that were infected with helminths. We then prepared smears from the testicles of 8-month-old male Wistar white rats that were injected with dexamethasone and then treated with a plant complex. The obtained smears were examined under a 200-fold magnification, and the data were processed using standard MS Excel and Statgraphics software packages. The nonparametric Mann-Whitney U-test was used to assess the homogeneity of the groups and the significance of the differences between the mean values. The level of statistical significance for the differences between the compared samples was set at $p < 0.05$.

Results. The conducted comparative studies on the determination of the embryotoxicity of the phytopharmaceutical allow us to conclude that it is absent and the possibility of using phytoanthelmintics based on cladonia. In the morphological study of smears-imprints of the testicles in rats in a state of immunosuppression, it was found that the number of normal spermatozoa in immunosuppression was 5.3 ± 2.3 , in the control group their number was significantly higher (38.2 ± 15.5). At the same time, in the group of rats that received the drug, the number of spermatozoa increased to 12.5 ± 7.3 . The results of smear studies in various groups of male rats show that the administration of a drug made from plants with antiparasitic properties based on cladonia and a calcium source called Ultramel reduces destructive changes in spermatozoa and spermatogenic

epithelium when dexamethasone is administered. The drug is effective in reproducing spermatogenesis disorders in cases of immunodeficiency, as it has a stabilizing effect on spermatogenesis (mitoses were observed, which were absent in the group that did not receive the drug, but were characteristic of spermatogenesis in the control group of rats). As a result of the conducted experiment, in addition to the confirmed effect of the herbal composition, it was found that modeling immunodeficiency using maximum daily doses of dexamethasone is quite effective. This model can be successfully used to study the effects of immunostimulants of various origins, including plant-based ones, such as the use of a plant complex and the Ultramel preparation.

Conclusion. Studies of the possibilities of protecting the reproductive system in helminthiasis and modeling of immunodeficiency using maximum daily doses of dexamethasone showed the effectiveness of the use of phytopreparations based on mechanically processed lichen. The absence of embryotoxic and teratogenic effects of this drug in laboratory Wistar rats was established and the possibility of correction of disorders of spermatogenesis was demonstrated.

Keywords: herbal preparation; mixed infestations; laboratory animals; correction of disorders; reproductive functions

For citation Zhdanova, O. B., & Chasovskikh, O. V. (2026). Application of phytopreparation in mixed infections in laboratory animals and for correction of reproductive function disorders. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 55–71. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1782>

Введение

В настоящее время при изучении патологий репродуктивной функции как у человека, так и у животных особое внимание уделяется зачатию и вынашиванию, в т.ч. их нарушениям при инфекционных и инвазионных болезнях. Известно, что паразиты нередко вызывают полиорганные патологии у животных: при инвазии происходят множественные патологические изменения в органах и системах органов, в т.ч. в органах размножения. Также возбудители у млекопитающих и птиц нередко влияют на развитие плода (зародыша), а иногда, как, например, при токсокарозе, приводят к внутриутробному заражению плода (эмбриона) [1; 3; 11-15].

Основными показателями патологии репродуктивной сферы у самок являются эмбриотоксичность и тератогенность. Эмбриотоксичность – это способность патогена, лекарственного препарата или какой-либо субстанции, которая при попадании в организм матери может вызывать гибель или патологические изменения эмбрионов на ранних сроках беременности

(наблюдается в первые дни после имплантации, что приводит к развитию замершей беременности или к самопроизвольному выкидышу). Следует отметить, что нередко эмбриотоксичностью обладают широко распространенные антигельминтики (альбендазол и др.), антибиотики (г.о. тетрациклинового ряда), противоопухолевые препараты, и некоторые другие лекарственные средства.

Не меньшее внимание исследователей привлекает тератогенность (способность паразитов или лекарственных препаратов приводить к нарушениям развития зародыша и приводить к уродствам у эмбриона). Развивается в период гастрюляции и закладки тканей и органов. Тератогенность ряда паразитов, таких как токсоплазма, несомненна, однако также имеются отдельные сведения о действии на плод экскреторно-секреторных и соматических антигенов широко распространенных нематод и цестод [3; 14-19].

На поздних стадиях беременности оценивается фетотоксичность патогенных агентов или препаратов, т.е. их влияние на сформировавшийся плод до родов. Проявляется фетотоксичность в структурных и функциональных отклонениях в развитии плода, гипотрофии и др.

Также известно, что патологии репродуктивной системы и нарушения нормального течения беременности обусловлены как собственно патогенного агента, так и наличием вторичных иммунодефицитов самцов и самок, возникших в результате хронических инфекций или инвазий [16-20].

В настоящее время все чаще появляются сообщения о том, что причиной патологий репродуктивной сферы является иммунологическое бесплодие, нередко появляющееся при длительных антигенных воздействиях инвазионного агента (г.о. нематод). Так, например, хорошо известно, что хронические болезни приводят к возникновению вторичных иммунодефицитов, и дисбалансу выработки цитокинов. Нередко появляются антиспермальные антитела, в результате могут связываться сперматозоиды с нейтрофилами или снижаться их подвижность, а при активации комплемента нейтрофилы могут фагоцитировать опсонизированные сперматозоиды, что в результате проявляется снижением фертильности [3-5; 10].

Однако, в целом, следует отметить, что нарушения репродуктивной функции андрогенного характера при нарушениях функций иммунной системы изучены крайне недостаточно. В итоге, эта проблема является актуальной для биологии, медицины и ветеринарии. Являясь полиэтиологическим синдромом, с множеством патологических состояний, возникающих, в том числе, и при нарушениях во взаимодействии различных звеньев иммунонейроэндокринной системы [3; 4].

Учитывая вышесказанное, также становится несомненной актуальность исследований, посвященные иммунологическому аспекту бесплодия у мужских особей при моделировании иммунной недостаточности при помощи дексаметазона. Известно, что высокие уровни тестостерона могут оказывать контрацептивное действие, что подтверждают данные ряда источников [1-3]. В то же время наблюдается аналогичное состояние при введении максимальной суточной дозы в течение нескольких дней глюкокортикоидов, в этом случае, также достигается эффект снижения иммунитета, который нередко моделируют в иммунологии, используя суточную дозу, не являющуюся токсичной [2; 3; 5].

Цель исследования – изучить мазки-отпечатки семенников у 8-ми месячных самцов белых крыс «Вистар» с индуцированной иммунной недостаточностью путем введения максимальной суточной дозы дексаметазона при ее коррекции растительным комплексом с препаратом «Ультрамел» (РКУ) и определить изменения в развитии эмбрионов, инвазированных гельминтами беременных самок мышей и крыс на фоне применения данного препарата.

Материалы и методы

Для изучения влияния гельминтозов на репродуктивную систему самок, методом аналогов были отобраны беспородные белые мыши в возрасте 3,5-4,5 месяца (самки, массой 23,5±1,15 г), инвазированные гельминтами. Животных рандомизировали по спонтанным микст-инвазиям, предварительно исследовав методом Фюллеборна, у которых находили яйца паразитов и при исследовании мазков-отпечатков с перианальных складок, таким образом, отбирали мышей с микст-инвазиями (гименолепидоз+сифациоз). Из них формировали три группы по 10 животных, к самкам каждой группы подсаживали самцов (2-3 головы). Для лечения спонтанных микст-инвазий применяли противопаразитарный фитопрепарат на основе ягеля, ягель (лишайник рода *Cladonia*), пижму обыкновенную (*Tanacetum vulgare* L.), траву полыни горькой (*Artemisia absinthium* L.) и траву тимьяна ползучего (*Herba Serpylli*) и источника калция «Ультрамел» в соотношении 3:1:1:1:1 у 10 голов мышей в механообработанном виде, при этом смесь вводят с кормом в количестве 0,45 г/кг живой массы в течение 7 дней получала препарат. Вторая группа состояла из 10 мышей, инвазированных гельминтами без лечения, третья группа (10 голов без дегельминтизации) была контрольной. На второй неделе после наступления беременности всех самок выводили из эксперимента согласно

Правилам работы с лабораторными животными Вятского ГАТУ, основой которых являются нормы, отраженные в директиве Европейского сообщества (86/609/ЕС), «Правил проведения работ с использованием экспериментальных животных» Оценивали влияние гельминтов на эмбрионы общепринятыми методами (Любимова Б.И., с соавт., 1998 г.; и Хабриева Р.У. с соавт. 2005 г.) [10, 15, 20]. Помимо влияния гельминтов на эмбрионы белых, изучали эмбриотоксичность у клинически здоровых животных (3-х крыс Вистар) проводили скормливание вышеуказанного препарата в виде кашицы с комбикормом 10 дней.

У самцов (крысы Вистар) изучали особенности сперматогенеза на фоне экспериментальной иммунной недостаточности. Для воспроизведения нарушения сперматогенеза вводили дексаметазон парентерально по методике Богачевой Н.В., с соавт. 2021, при этом вводили наибольшую допустимую дозу, при этом суточная доза не вызывала никаких органических изменений, свойственных для токсических доз. Дексаметазон, рекомендуется авторами так как этот препарат обладает наименьшими побочными эффектами в сравнении с остальными иммуносупрессорами [1; 2; 6]. Все манипуляции с самцами белых крыс проводили при соблюдении норм, в соответствии с протоколом, одобренным этическим комитетом (12.05.24).

Самцам ежедневно вводили 1 мл дексаметазона (содержащему 40 мкг вещества) в течение 3-х дней, внутривентрально: крысам 1-й и 2-й групп (по 5 голов), второй группе также скормливали комплекс РКУ. Пять крыс из контрольной группы содержались в аналогичных условиях и получали соответствующий рацион. После выведения животных из эксперимента согласно методике Богачевой Н.В. с соавт. 2021 [2; 6], проводили изготовление мазков-отпечатков семенников. После фиксации мазки-отпечатки окрашивали по Романовскому-Гимза, просветляли в 4% уксусной кислоте, проводили микроскопическое исследование при увеличении $\times 20$, $\times 80$, $\times 200$ и фотографирование на световом микроскопе VisionBio (Epi) с автоматическим выводом на экран. При этом в мазках-отпечатках изучали состав клеток, а также наличие или отсутствие патологических проявлений и (или) деформаций у клеток сперматогенного эпителия или сформировавшихся спермиев [1-3; 5; 6; 20; 21]. Для статистической обработки применяли стандартные пакеты программ MS Excel. При оценке однородности групп и достоверности различий средних между группами использовали непараметрический U-тест Манна-Уитни. Уровень статистической значимости полученных различий между сравниваемыми выборками принимали при $p < 0.05$.

Результаты исследования

В 1-й группе мышей средняя масса эмбрионов составила $0,35 \pm 0,05$, и соответствовала контрольной группе ($0,36 \pm 0,1$), средняя длина по сагитальному разрезу - $11,2 \pm 0,9$ (в контрольной группе $10,1 \pm 0,5$). Во второй группе животных микст-инвазии без лечения, средняя масса эмбрионов уменьшалась до $0,25 \pm 0,09$, как и длина $9,3 \pm 0,5$, таким образом, была подтверждена гипотрофия у животных с микст-инвазией. Полученные данные согласовались с результатами проведенных в этой области исследований (Зорина Н.В., 2009, Новик Т.С., 2002-2025 и др.) [10; 15-18] и подтверждали эффективность применения фитокомплекса [2-5]. Таким образом, фитотерапия микст-инвазий также предотвращает эмбриотоксический эффект во время беременности.

При даче исследуемой композиции беременным крысам Вистар, свободным от инвазии, гибели эмбрионов не наблюдали, все новорожденные крысята соответствовали контрольной группе, имели соответствующие размеры (масса тела составила $6,3 \pm 0,07$ г, среднее количество крысят $8,5 \pm 0,5$, в то время как обычно для этой линии характерно рождение от 6 до 12 крысят, все животные развивались аналогично контрольной (интактной) группе, не получавшей препарат. Таким образом, при использовании фитопрепаратов тератогенное действие отсутствует.

Далее препарат исследовали на модели иммунодепрессии у самцов крыс Вистар по методике Богачевой Н.В. (2021) с исследованием мазков-отпечатков семенников. При этом установлено, что: количество нормальных спермиев при иммунодепрессии составило $5,3 + 2,3$, в контрольной группе их количество было намного выше ($38,2 \pm 15,5$). В то же время в группе крыс, получавших препарат, количество спермиев возрастало до $12,5 + 7,3$. При исследовании мазков-отпечатков установлены количественные и качественные изменения показанные на рис. 1-3.

Известно, что в сперматогенном эпителии лишь 0,03 % из всех его клеток составляют стволовые клетки. Причем, сперматогенный эпителий грызунов имеет ряд отличий от млекопитающих. Так, например, стволовые дифференцирующиеся сперматогенные клетки, соединяются цитоплазматическими мостиками, отсюда и само название синцитий (син- вместе). Большинство сперматогоний у млекопитающих являются сперматогониями типа А (Захидов С.Т. и др., 2009; Rooij de D.G., Russell L.D., 2000) [6; 7; 20]. А далее происходит дифференцировка в сперматогонии типа А и В, у крыс, как и у большинства млекопитающих сперматогонии типа А либо самообновляются, либо дифференцируются в сперматогонии типа В (Захидов С.Т. и др., 2009; Rooij de D.G., Russell L.D., 2000), под действием регуляторных пептидов клеток Сертоли. [5; 6; 7; 20]. Повреждения в процессе сперматогенеза

зависят от проницаемости гемато-тестикулярного барьера, и от состояния клеток Сертоли, при иммунной недостаточности могут повреждения возникнуть на любой стадиях дифференцировки и формирования, в результате появляются патологические формы сперматозоидов (Rooij de D.G., Russell L.D., 2000; Alvarez Sedó C. et al., 2012) [5; 6; 7; 20].

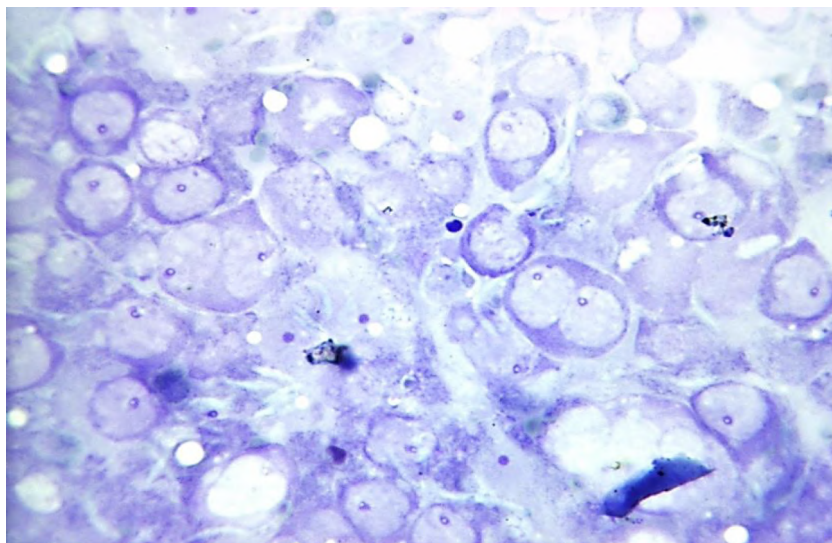


Рис. 1. Дифференциация сперматогенного эпителия у контрольных крыс (ув.х200)
Fig. 1. Differentiation of the spermatogenic epithelium in control rats (magnification $\times 200$)

Также во время отделения от клетки Сертоли и высвобождения сперматозоида в просвет извитого семенного канальца, что регулируется фолликулостимулирующим гормоном и тестостероном, на выработку которых влияет дексаметазон, могут происходить нарушения такие как кристаллизация спермиев, склеивание и нарушение их движения [5; 7-10].

Следует учитывать, что патологии кристаллизации могут приводить не только к гибели спермиев, но и к нарушению оплодотворения, когда кристаллизация на поверхности яйцеклетки завершает проникновение головки через ее оболочки [7-9; 13; 19].

При воспроизведении иммунной недостаточности происходит сильное снижение суточной нормы образования сперматозоидов, а также тормозится выработка тестостерона в течение нескольких дней после введении больших доз дексаметазона, что усугубляет нарушения сперматогенеза (рис. 2).

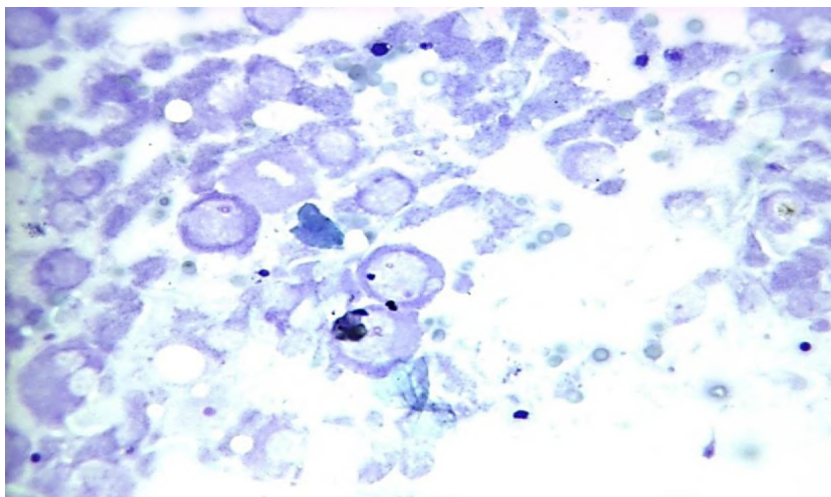


Рис. 2. Нарушения дифференциации сперматогенного эпителия у крыс под действием дексаметазона (ув.х200)

Fig. 2. Abnormalities in the differentiation of the spermatogenic epithelium in rats exposed to dexamethasone (magnification $\times 200$)

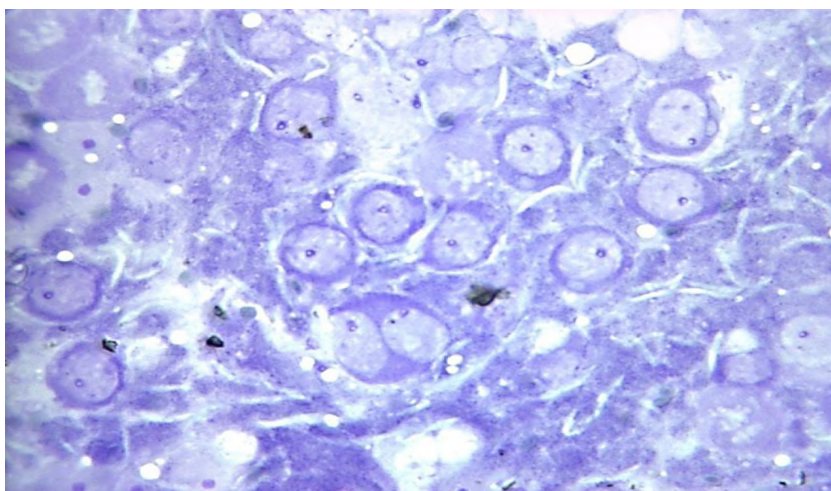


Рис. 3. Восстановление дифференциации сперматогенного эпителия у крыс при действии дексаметазона на фоне дачи фитопрепарата (ув.х200)

Fig. 3. Restoration of differentiation in the spermatogenic epithelium of rats following dexamethasone treatment combined with administration of a herbal preparation (magnification $\times 200$)

Также при иммунодепрессии мазках-отпечатках у самцов опытной группы появлялись эритроциты, эпителиальные клетки и единичные лейкоциты (в сравнении с контрольной группой без иммунодепрессии, в которой эритроциты отсутствуют), однако дача препарата РКУ позволяла значительно снизить данные проявления, что, по всей видимости обусловлено введением кальций содержащего препарата «Ультрамел», который снижает проницаемость гемато-тестикулярного барьера, возникающую при иммунной недостаточности. В то же время следует отметить, что при исследовании мазков отпечатков при увеличении (x20 и x80) серьезные повреждения сперматогенного эпителия в опытных группах отсутствуют.

Обсуждение

Установлено влияние спонтанных микст-инвазий на репродуктивную систему лабораторных животных (мышей). Тот факт, что гельминтозы вызывают морфо-функциональные изменения в иммунной и репродуктивной системах, в итоге приводя к снижению количества спермиев и разжижению эякулята у самцов и к гипотрофии плодов у самок, что обусловлено не только дефицитом микроэлементов и витаминов, но и нарушениями в строении и функционировании эндометрия хорошо известен и описан в современной литературе [4; 7-9; 11-13; 22].

Чтобы минимизировать влияние гельминтов на репродуктивную систему необходимо своевременно проводить лечебные и профилактические дегельминтизации. Несмотря на то, что современные антигельминтики достаточно эффективны, в связи с возможным их тератогенным действием, многие антигельминтики не назначают в первом триместре беременности.

В то же время фитопрепараты, с антигельминтным эффектом содержащие механообработанный ягель позволяют предотвратить неблагоприятное действие гельминтов на организм лабораторных животных при микст-инвазиях. Известно, что нарушения сперматогенеза, могут возникать при иммунодефицитах, в т.ч. вторичных при инфекционных и инвазионных заболеваниях, что обуславливает поиск препаратов с иммунотропным эффектом, позволяющим корректировать и нарушения репродуктивной функции [4; 7-9; 21; 22].

Исследования фитопрепаратов на основе механообработанного ягеля на репродуктивную систему самок и самцов лабораторных животных свидетельствуют, что введение лекарственных препаратов на основе ягеля и растений с антигельминтным не только не обладает эмбриотоксичностью и тератогенным эффектом, но и уменьшает деструктивные изменения спермиев и сперматогенного эпителия, возникающие при введении дексаметазона. В последнем случае препарат оказывает стабилизирующее действие на сперматогенез (от-

мечены митозы, которые отсутствовали в группе не получавшей препарат, однако были характерны для сперматогенеза у крыс контрольной группы).

Исследования по изучению антигельминтной эффективности фитопрепаратов проводятся в Вятском ГАТУ с 2020 г. на лабораторных животных и супоросных свиньях. В результате доклинических эмбриотоксических и производственных испытаний получена линейка фитопрепаратов – композиции из растений, произрастающих на территории РФ для лечения гельминтозов на основе кладонии, а данные исследования по определению эмбриотоксичности и восстановлению сперматогенеза при искусственном его нарушении у лабораторных животных позволяют сделать вывод о возможном широком использовании фитоантигельминтиков с иммуностропным эффектом.

Заключение

Исследования возможностей протекции репродуктивной системы при гельминтозах и моделирование иммунной недостаточности при помощи максимальных суточных доз дексаметазона показали эффективность применения фитопрепаратов на основе механообработанного ягеля. Установлено отсутствие эмбриотоксического и тератогенного эффекта у лабораторных крыс Вистар, и возможность коррекции нарушений сперматогенеза. Также показано, что моделирование иммунной недостаточности и нарушений сперматогенеза с помощью дексаметазона может использоваться для изучения действия иммуностимуляторов различного происхождения, в т.ч. растительного происхождения. Наши исследования подтвердили эффективность использования растительного комплекса на основе механообработанного лишайника кладонии

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Информация о спонсорстве. Источник финансирования исследования и публикации статьи – грант РНФ № 24-26-00043.

Список литературы

1. Автандилов, Г. Г. (1990). *Медицинская морфометрия: руководство*. М.: Изд. «Медицина». 384 с.
2. Богачева, Н. В., Попова, С. В., Коротаева, К. Н., & Исаева, Н. В. (2021). *Способ расчета дозы дексаметазона для разработки биологической модели иммуносупрессии на мышах* (Патент на изобретение RU 2748123 C1). Заявка № 2020126327 от 04.08.2020.

3. Зорина, В. В., Бекиш, О.-Я. Л., & Бекиш, В. Я. (2009). Воздействие мигрирующих личинок аскарид на геном хозяина при беременности. *Вестник ВГМУ*, 8(2), 120–127. EDN: <https://elibrary.ru/LAFWEN>
4. Дуденкова, Н. А., & Шубина, О. С. (2021). Морфологические и морфометрические особенности строения сперматогенного эпителия семенников самцов белых крыс. В *Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых* (с. 423–427). Молодежный.
5. Жданова, О. Б., & Часовских, О. В. (2025). *Растительные ветеринарные композиции против нематод* (Патент № 2836810 С1, МПК А61К 31/365, А23К 10/00). Заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный агротехнологический университет». Заявл. 22.11.2023; опубл. 24.03.2025. EDN: <https://elibrary.ru/JHZNFI>
6. Жданова, О. В., Русских, А. И., Мартусевич, А. К., Часовских, О. В., и др. (2025). Экспресс-оценка изменений сперматогенеза у белых крыс при трихинеллезной инвазии в динамике. В *Актуальные проблемы репродуктивного здоровья животных* (с. 158–162). Сыктывкар.
7. Захидов, С. Т., Кулибин, А. Ю., & Маршак, Т. Л. (2009). *Стволовые клетки и клетки ниши сперматогенной системы*. М.: Медицина. 456 с.
8. Захидов, С. Т., & Маршак, Т. Л. (2015). Экспериментальные доказательства пролиферации и размножения высокодифференцированных клеток Сертоли. *Известия РАН*, (4), 350–360. <https://doi.org/10.7868/S0002332915040153>.
9. Мартусевич, А. К., Жданова, О. Б., & Зверева, Т. А. (2006). О кристаллогенезе биосубстратов животных. *Вятский медицинский вестник*, (3–4), 33–38. EDN: <https://elibrary.ru/PBPOBD>
10. Мартусевич, А. К., & Жданова, О. Б. (2006). Информативность исследования свободного кристаллообразования при зоонозах на модели лабораторных животных. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион*, (1), 30–39. EDN: <https://elibrary.ru/HVDMUV>
11. Токарь, В. В., Мусаев, М. Б., & Новик, Т. С. (2025). Оценка острой токсичности двух противопаразитарных комбинированных препаратов из группы авермектинов и пиретроидов. *Российский паразитологический журнал*, 19(1), 76–82. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-1-76-82>. EDN: <https://elibrary.ru/MUAZDZ>
12. Bennet, A., & Guyatt, H. (2000). Reducing intestinal nematode infection: efficacy of Albendazole and Mebendazole. *Parasitology Today*, 16(2). [https://doi.org/10.1016/S0169-4758\(99\)01544-6](https://doi.org/10.1016/S0169-4758(99)01544-6).
13. Bialek, R., & Knobloch, J. (1999). Parasitic infections in pregnancy and congenital parasitoses. II. Helminth infections. *Z Geburtshilfe Neonatol*, 203(3), 128–133.

14. Alvarez Sedó, C., Bilinski, M., Lorenzi, D., Uriondo, H., Noblia, F., Longobucco, V., Ventimiglia Lagar, E., & Nodar, F. (2017). Effect of sperm DNA fragmentation on embryo development: clinical and biological aspects. *JBRA Assisted Reproduction*, 21(4), 343–350. <https://doi.org/10.5935/1518-0557.20170061>.
15. Djakovic, A., Tappe, D., & Dietl, J. (2006). Diagnosis of and anthelmintic therapy for enterobius vermicularis infections during pregnancy: review of the literature and case report. *Z Geburtshilfe Neonatol*, 210(4), 147–152. <https://doi.org/10.1055/s-2006-947219>.
16. de Silva, N. R., et al. (1999). Effect of mebendazole therapy during pregnancy on birth outcome. *Lancet*, 353, 1145–1149. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(98\)06308-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(98)06308-9). EDN: <https://elibrary.ru/DAYS LN>
17. Santico, R. (1997). Effects of chronic parasitosis on women's health. *Int. J Gynaecol. Obstet.*, 58(1), 129–136. [https://doi.org/10.1016/S0020-7292\(97\)02865-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7292(97)02865-8). EDN: <https://elibrary.ru/AGBLAB>
18. Savioli, L., et al. (2004). Progress in the prevention and control of schistosomiasis and soil-transmitted helminthiasis. *Parasitol. Int.*, 53, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.parint.2004.01.001>.
19. Peterson, E. (2006). Parasite and pregnancy. In *Abstracts of XIth International Congress of Parasitology* (p. 345). Glasgow, Scotland.
20. de Rooij, D. G., Repping, S., & van Pelt, A. M. M. (2008). Role for Adhesion Molecules in the Spermatogonial Stem Cell Niche. *Cell Stem Cell*, 3(5), 467–468. <https://doi.org/10.1016/j.stem.2008.10.010>.
21. 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>
22. Zhdanova, O. B., Haidarova, A. A., Napisanova, L. A., et al. (2015). The possibility of using Trichinella spiralis as an experimental model in the field of high dilutions. *International Journal of High Dilution Research*, 14(2), 60–61. <https://doi.org/10.51910/ijhdr.v14i2.796>. EDN: <https://elibrary.ru/VAKWGZ>

References

1. Avtandilov, G. G. (1990). *Medical morphometry: A handbook*. Moscow: «Meditsina» Publishing. 384 p.
2. Bogacheva, N. V., Popova, S. V., Korotaeva, K. N., & Isaeva, N. V. (2021). *Method for calculating the dose of dexamethasone for developing a biological model of immunosuppression in mice* (Invention Patent RU 2748123 C1). Application No. 2020126327 dated 04.08.2020.

3. Zorina, V. V., Bekish, O.-Ya. L., & Bekish, V. Ya. (2009). Effect of migrating ascarid larvae on the host genome during pregnancy. *Vestnik of VSMU*, 8(2), 120–127. EDN: <https://elibrary.ru/LAFWEH>
4. Dudenkova, N. A., & Shubina, O. S. (2021). Morphological and morphometric features of the structure of the spermatogenic epithelium of testes in male white rats. In *Scientific research and development for implementation in the agro-industrial complex: Proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists* (pp. 423–427). Molodezhny.
5. Zhdanova, O. B., & Chasovskikh, O. V. (2025). *Herbal veterinary compositions against nematodes* (Patent No. 2836810 C1, IPC A61K 31/365, A23K 10/00). Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vyatka State Agrotechnological University”. Filed 22.11.2023; published 24.03.2025. EDN: <https://elibrary.ru/JHZNFJ>
6. Zhdanova, O. V., Russkikh, A. I., Martusevich, A. K., Chasovskikh, O. V., et al. (2025). Express assessment of changes in spermatogenesis of white rats during trichinellosis invasion in dynamics. In *Current problems of animal reproductive health* (pp. 158–162). Syktyvkar.
7. Zakhidov, S. T., Kulibin, A. Yu., & Marshak, T. L. (2009). *Stem cells and niche cells of the spermatogenic system*. Moscow: Meditsina. 456 p.
8. Zakhidov, S. T., & Marshak, T. L. (2015). Experimental evidence for proliferation and reproduction of highly differentiated Sertoli cells. *Izvestiya RAS*, (4), 350–360. <https://doi.org/10.7868/S0002332915040153>.
9. Martusevich, A. K., Zhdanova, O. B., & Zvereva, T. A. (2006). On crystallogenesis of animal biosubstrates. *Vyatka Medical Bulletin*, (3–4), 33–38. EDN: <https://elibrary.ru/PBPOBD>
10. Martusevich, A. K., & Zhdanova, O. B. (2006). Informativeness of the study of free crystal formation in zoonoses on a laboratory animal model. *Izvestiya of Higher Educational Institutions. Volga Region*, (1), 30–39. EDN: <https://elibrary.ru/HVDMUV>
11. Tokar, V. V., Musaev, M. B., & Novik, T. S. (2025). Assessment of acute toxicity of two antiparasitic combined preparations from the group of avermectins and pyrethroids. *Russian Journal of Parasitology*, 19(1), 76–82. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-1-76-82>. EDN: <https://elibrary.ru/MUAZDZ>
12. Bennet, A., & Guyatt, H. (2000). Reducing intestinal nematode infection: Efficacy of albendazole and mebendazole. *Parasitology Today*, 16(2). [https://doi.org/10.1016/S0169-4758\(99\)01544-6](https://doi.org/10.1016/S0169-4758(99)01544-6).
13. Bialek, R., & Knobloch, J. (1999). Parasitic infections in pregnancy and congenital parasitoses. II. Helminth infections. *Z Geburtshilfe Neonatol*, 203(3), 128–133.
14. Alvarez Sedó, C., Bilinski, M., Lorenzi, D., Uriondo, H., Noblía, F., Longobucco, V., Ventimiglia Lagar, E., & Nodar, F. (2017). Effect of sperm DNA fragmentation

- on embryo development: Clinical and biological aspects. *JBRA Assisted Reproduction*, 21(4), 343–350. <https://doi.org/10.5935/1518-0557.20170061>.
15. Djakovic, A., Tappe, D., & Dietl, J. (2006). Diagnosis of and anthelmintic therapy for *Enterobius vermicularis* infections during pregnancy: Review of the literature and case report. *Z Geburtshilfe Neonatol*, 210(4), 147–152. <https://doi.org/10.1055/s-2006-947219>.
 16. de Silva, N. R., et al. (1999). Effect of mebendazole therapy during pregnancy on birth outcome. *Lancet*, 353, 1145–1149. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(98\)06308-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(98)06308-9). EDN: <https://elibrary.ru/DAYS LN>
 17. Santico, R. (1997). Effects of chronic parasitosis on women's health. *International Journal of Gynaecology and Obstetrics*, 58(1), 129–136. [https://doi.org/10.1016/S0020-7292\(97\)02865-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7292(97)02865-8). EDN: <https://elibrary.ru/AGBLAB>
 18. Savioli, L., et al. (2004). Progress in the prevention and control of schistosomiasis and soil-transmitted helminthiasis. *Parasitology International*, 53, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.parint.2004.01.001>.
 19. Peterson, E. (2006). Parasite and pregnancy. In *Abstracts of the XIth International Congress of Parasitology* (p. 345). Glasgow, Scotland.
 20. de Rooij, D. G., Repping, S., & van Pelt, A. M. M. (2008). Role for adhesion molecules in the spermatogonial stem cell niche. *Cell Stem Cell*, 3(5), 467–468. <https://doi.org/10.1016/j.stem.2008.10.010>.
 21. 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>
 22. Zhdanova, O. B., Haidarova, A. A., Napisanova, L. A., et al. (2015). The possibility of using *Trichinella spiralis* as an experimental model in the field of high dilutions. *International Journal of High Dilution Research*, 14(2), 60–61. <https://doi.org/10.51910/ijhdr.v14i2.796>. EDN: <https://elibrary.ru/VAKWGZ>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

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*

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*

Поступила 10.07.2025

После рецензирования 10.09.2025

Принята 15.10.2025

Received 10.07.2025

Revised 10.09.2025

Accepted 15.10.2025

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: 10.12731/2658-6649-2026-18-2-1517

EDN: QDWAIT

УДК 57.042



Дозозависимое влияние цитрата кальция на процессы минерализации, эндокринные функции и метаболический статус у кур-несушек

К.С. Нечитайло^{1,2}, Т.Н. Холодилина^{1,2}, Е.А. Сизова^{1,2}, Д.Е. Шошин^{1,2},
К.В. Рязанцева^{1,2}, Е.В. Яшуева^{1,2}

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий
Российской академии наук, Оренбург, Российская Федерация

²Оренбургский государственный университет, Оренбург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Цитрат кальция рассматривается как перспективная органическая форма кальция с высокой биодоступностью.

Цель – оценка динамики минерального обмена, метаболического статуса и качества яичной скорлупы у кур-несушек (*Gallus gallus L.*) кросса Хайсекс Браун при частичной замене известняка (CaCO_3) в рационе птицы на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$).

Материалы и методы. Опыт проведен на курах-несушках, распределённых между контрольной и тремя опытными группами ($n = 30$): ОГ1, ОГ2 и ОГ3, где 10%, 20% и 30% известняка рациона заменяли на цитрат кальция. Исследовали морфологические и биохимические показатели крови, уровень гормонов, маркеры костного ремоделирования, а также элементный состав сыворотки, берцовой кости и яичной скорлупы.

Результаты. Наиболее выраженные положительные сдвиги были выявлены при 20% замещении: увеличение концентраций Ca, P и K в скорлупе, снижение H/L-индекса, повышение уровня остеопротегерина (OPG) и снижение концентрации паратиреоидного гормона в сыворотке крови. Напротив, при 30% замещении отмечены признаки метаболической нагрузки – рост концентрации АЛТ при одновременном снижении концентраций OPG, меди, цинка и железа. Во всех группах уменьшалось содержание Sr и Ba в костной ткани и скорлупе. Таким образом, замена 20% известняка рациона цитратом кальция целесообразна и способствует

улучшению минерального гомеостаза и качества скорлупы. Более высокие дозы требуют коррекции микроэлементного состава рациона. Цитрат кальция проявляет себя как биоактивный модулятор минерального и энергетического обмена.

Ключевые слова: хлорид кальция; цитрат кальция; яйценоскость; курица-несушка; скелет; остеопротегерин; паратиреоидный гормон

Для цитирования. Нечитайло, К. С., Холодилина, Т. Н., Сизова, Е. А., Шошин, Д. Е., Рязанцева, К. В., & Яушева, Е. В. (2026). Дозозависимое влияние цитрата кальция на процессы минерализации, эндокринные функции и метаболический статус у кур-несушек. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 72–102. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1517>

Dose-dependent effect of calcium citrate on mineralization, endocrine regulation, and metabolic status in laying hens

K.S. Nechitailo^{1,2}, T.N. Kholodilina^{1,2}, E.A. Sizova^{1,2}, D.E. Shoshin^{1,2},
K.V. Ryazantseva^{1,2}, E.V. Yausheva^{1,2}

¹*Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies
of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation*

²*Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation*

Abstract

Background. Calcium citrate is considered as a promising organic form of calcium with high bioavailability.

Purpose. Assessment of the dynamics of mineral metabolism, metabolic status and eggshell quality in laying hens (*Gallus gallus* L.) of the Hayesex Brown cross with partial replacement of limestone (CaCO_3) in the poultry diet with calcium citrate ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$).

Materials and methods. The experiment was carried out on laying hens distributed between the control and three experimental groups ($n = 30$): EG1, EG2 and EG3, where 10%, 20% and 30% of the limestone of the diet was replaced with calcium citrate. Morphological and biochemical parameters of blood, hormone levels, markers of bone remodeling, as well as the elemental composition of serum, tibia and eggshell were studied.

Results. The most pronounced positive changes were detected with 20% substitution: increased concentrations of Ca, P, and K in the shell, decreased H/L index, increased levels of osteoprotegerin (OPG), and decreased serum concentrations of parathyroid hormone. On the contrary, with a 30% substitution, signs of metabolic stress were noted – an increase in ALT concentration with a simultaneous decrease in OPG, copper, zinc, and iron concentrations. In all groups, the content of Sr and Ba in bone tissue and

shell decreased. Thus, replacing 20% of the limestone in the diet with calcium citrate is advisable and helps to improve mineral homeostasis and shell quality. Higher doses require correction of the trace element composition of the diet. Calcium citrate manifests itself as a bioactive modulator of mineral and energy metabolism.

Keywords: calcium chloride; calcium citrate; egg production; laying hen; skeleton; osteoprotegerin; parathyroid hormone

For citation. Nechitailo, K. S., Kholodilina, T. N., Sizova, E. A., Shoshin, D. E., Ryazantseva, K. V., & Yausheva, E. V. (2026). Dose-dependent effect of calcium citrate on mineralization, endocrine regulation, and metabolic status in laying hens. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 72–102. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1517>

Введение

В условиях растущей общественной озабоченности вопросами благополучия сельскохозяйственных животных в современном птицеводстве активно рассматриваются альтернативные системы содержания и кормления коммерческих кур-несушек [39].

Селекция кур-несушек по продуктивным признакам привела к существенным генетическим изменениям, проявившимся в более раннем половом созревании. Одновременно отмечается повышение эффективности использования корма, снижение естественной смертности и уменьшение живой массы при сохранении или увеличении продуктивности [11]. Кроме того, селекционная работа позволила достичь более высоких показателей массы яйца и качества скорлупы, а также обеспечить стабильную яйценоскость на протяжении всего продуктивного периода [23].

Одним из ключевых последствий интенсивной селекции является также повышенная предрасположенность кур-несушек к метаболическим нарушениям, обусловленным высоким уровнем яйценоскости [7]. К числу таких патологий относятся нарушения кальциево-фосфорного обмена, жировая инфильтрация печени и остеопороз, которые оказывают значительное влияние на физиологическое состояние птицы [30]. Тяжесть и выраженность этих расстройств варьируют в зависимости от генетических особенностей, возраста птицы, а также условий содержания, включая режим освещения, плотность посадки, доступ к корму и качество минеральных добавок. Особое внимание в этом контексте требует состояние костной ткани, поскольку скелет кур-несушек испытывает колоссальную нагрузку в период активной яйцекладки [23]. Костная ткань выполняет

функцию основного депо кальция и фосфора в организме птицы. Кальций является незаменимым макроэлементом, необходимым для обеспечения минерализации скелета и формирования яичной скорлупы [53]. Для формирования яйца необходимо около 2,2 г кальция. Около 60–75% кальция, необходимого для образования яичной скорлупы, поступает непосредственно из рациона. В то время как 25–40% мобилизуется непосредственно из костной ткани, в первую очередь из медуллярной кости – специализированной формы костного вещества, формирующейся у птиц в предкладковый период [15]. Установлено, что потребность кур-несушек в кальции существенно варьирует в зависимости от физиологического статуса и этапа продуктивного цикла, достигая максимума в период интенсивной яйцекладки [53].

Именно поэтому качество и биодоступность источников кальция в рационе становятся критически важными факторами не только для обеспечения высокого качества скорлупы, но и для профилактики системного остеопороза, переломов и других скелетных патологий. В традиционных рационах в качестве основного источника кальция используется известняк, однако его усвоение зависит от уровня кислотности в желудке и может быть нестабильным, особенно у ремонтного молодняка кур в предкладковый период с ещё не до конца сформированной пищеварительной системой [37].

Способность организма к эффективному депонированию и мобилизации кальция является ключевым фактором, определяющим репродуктивную способность кур-несушек [17]. Полноценное развитие скелета, включающее достижение максимальной длины костей и формирование достаточной массы кортикальной костной ткани, должно быть завершено до полового созревания, поскольку дальнейший прирост кортикальной кости после активации репродуктивной функции практически отсутствует [47]. Включение гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси и рост концентрации 17 β -эстрадиола в предкладковый период индуцируют функциональную трансформацию остеобластов [16; 17]. Их синтетическая активность переключается с минерализации кортикальной кости на образование медуллярной костной ткани. Данная ткань формируется на эндостальной поверхности трубчатых костей, преимущественно в полостях бедренной и большеберцовой костей, где выступает динамическим депо кальция для обеспечения минерализации яичной скорлупы в период яйценоскости [47]. Таким образом, предкладковый период представляет собой критически важный период, в котором необходимо заложить минеральный резерв ске-

лета, способный выдержать интенсивную репродуктивную нагрузку [20]. В данных условиях качество и биодоступность источников кальция в рационе становятся определяющими факторами [17].

В связи с этим особый интерес представляют органические формы кальция, характеризующиеся более высокой биодоступностью [35; 38; 52]. В частности, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что включение лактата кальция в рацион кур-несушек способствует улучшению продуктивных показателей и качества яиц, что, вероятно, обусловлено его положительным влиянием на метаболизм кальция, функциональное состояние кишечного эпителия, а также на иммунологическую реактивность слизистой оболочки тонкой кишки. Повышенная биодоступность лактата кальция по сравнению с неорганическими формами обеспечивает более эффективное всасывание ионов Ca^{2+} в тонком кишечнике, что особенно актуально в период интенсивного яйцекладки [35]. Также добавление в рацион 0,5% бутирата кальция или 0,5% пропионата кальция улучшило качество яичной скорлупы у старых кур-несушек, возможно, за счёт модуляции минерального обмена – снижения отложения или повышения мобилизации кальция и фосфора в костной ткани [38]. Таким образом, использование органических форм кальция представляет собой перспективную стратегию коррекции минерального питания кур-несушек, направленную на поддержание гомеостаза кальция.

В частности, целью представленного исследования стала оценка динамики минерального обмена, метаболического статуса и качества яичной скорлупы у кур-несушек (*Gallus gallus L.*) кросса Хайсекс Браун при частичной замене известняка (CaCO_3) в рационе птицы на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$).

Материалы и методы

Объектом исследований были куры-несушки (*Gallus gallus L.*) кросса Хайсекс Браун. Для проведения исследований было отобрано 120 голов ремонтного молодняка промышленного стада, в возрасте 13 недель. Птица была распределена методом пар-аналогов на 4 группы ($n = 30$): Контроль [Control] – основной рацион (ОР), где в качестве источника кальция использовали известняковую муку (CaCO_3 , ООО «Инеско», Россия); I, или ОГ1 [EG I] – ОР с заменой известняковой муки на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$) в количестве 10%; II, или ОГ2 [EG II] – ОР с заменой известняковой муки на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$) в количестве 20%; III, или ОГ3 [EG III] – ОР с заменой известняковой муки на цитрат кальция

($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$) в количестве 30%. Замену известняковой муки, содержащейся в основном рационе на цитрат кальция проводили после двухнедельного подготовительного периода (акклиматизации) в возрасте 15 недель. Содержание кальция во всех группах в пересчете на ионы кальция было одинаковым. Длительность эксперимента составила 5 недель. Кормление птицы осуществлялось в соответствии с возрастными нормами, согласно рекомендациям ВНИТИП [1]. Поение птицы осуществлялось без ограничений. Состав основного рациона представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Состав основного рациона кур-несушек (*Gallus gallus* L.)
Table 1. Composition of the Main Diet for Laying Hens (*Gallus gallus* L.)

Компонент	Масса вещества, г/кг
Пшеница	500
Ячмень	200
Кукуруза	20
Жмых подсолнечный	50
Шрот соевый	50
Рыбная мука	50
Подсолнечное масло	10
Дрожжи кормовые	5
Отруби	40
Известняковая мука	65
Премикс	10

Примечание: В 100 г. основного рациона содержится: обменная энергия – 11,3 МДж/кг; сырой протеин – 16 %; сырой жир – 4,5 %; сырая клетчатка – 4,5 %; крахмал – 2,8 %; лизин – 0,71; метионин – 0,37 %, метионин+цистин – 0,58 %; кальций – 2,4 %; фосфор общий – 0,6 %, фосфор усвояемый – 0,51 %.

Note: Per 100 g of the main diet: metabolizable energy – 11.3 MJ/kg; crude protein – 16%; crude fat – 4.5%; crude fiber – 4.5%; starch – 2.8%; lysine – 0.71; methionine – 0.37%; methionine + cystine – 0.58%; calcium – 2.4%; total phosphorus – 0.6%; available phosphorus – 0.51%.

Препарат цитрата кальция получали путем химического синтеза из доломитовой муки (ООО «Аккерманцемент», Россия). Для получения цитрата кальция в раствор технической лимонной кислоты (концентрация 10%) вносили доломитовую муку, ожидали окончания пенообразования и оставляли на свету на 2 часа. В результате образовывались микрокристаллы цитрата кальция, являющиеся центрами кристаллизации. Целевой продукт (цитрат кальция) постепенно выпадал в осадок. В данном методе не требуется использовать систему нагрева. Далее, при необходимости

получить соль с нужной оводненностью, можно использовать сушильный шкаф (при температуре 80–90°C можно за 3–4 часа достичь 4-гидратной оводненности), также можно выполнить сушку на воздухе. Практический выход реакции = 88,77%, что, в совокупности с малыми затратами на получение, является плюсом использования данного метода.

Уровень гормонов-регуляторов кальциевого обмена в организме определяли в сыворотке крови методом иммуноферментного анализа с помощью наборов ELISA Kit (25ОНD₃ – витамин D₃, CTXI – поперечно-сшитый карбоксиконцевой телопептид I типа, OPG – остеопротегерин, PTH – паратиреоидный гормон, CT – кальцитонин) (Cloud-Clone, KHP) на многофункциональном микропланшетном ридере TECAN Infinite F200 (Tecan Austria GmbH, Австрия).

Для проведения масс-спектрального элементного анализа берцовые кости, полученные при убое, высушивали и тщательно измельчали без обезжиривания. Порцию полученного образца массой 0,2 г взвешивали с точностью до 0,0001 г. Добавляли 4 мл азотной кислоты (особой степени очистки), разрушая органическую матрицу и проводя минерализацию в микроволновой системе подготовки образцов TOPEX+ (PREEKEM, Китай) при температуре 180°C и максимальном давлении 22 атм. Полученные растворы анализировали с 10-кратным разбавлением на одноквадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 ICP-MS с генератором ионов в виде индуктивно связанной плазмы (Agilent, США). Cr, Fe, Zn и As были проанализированы в гелиевом режиме с использованием коллизионной ячейки, остальные элементы были определены без ее использования. Стандартные растворы были получены из многокомпонентной смеси «111355» фирмы Merck (Германия) с добавлением дополнительного монокомпонентного государственного стандартного образца. Были определены концентрации следующих элементов: Ca, P, Mg, Na, K, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Se, Zn, As, B, Ni, Sr, Al, Ba, Bi, Cd, Pb, Tl, Ag, In, Ga.

Кровь для анализа брали из подкрыльцовой вены при убое птицы. Анализ биохимических показателей сыворотки крови (общий белок, альбумин, креатинин, мочевины, билирубин (общий, прямой), холестерин, глюкоза, триглицериды, липопротеины высокой и низкой плотности) осуществляли при помощи коммерческих биохимических наборов для ветеринарии ДиаВетТест (Россия) на автоматическом биохимическом анализаторе CS-T240 («Dirui Industrial Co., Ltd», Китай). Морфологические показатели крови (эритроциты, концентрация гемоглобина, среднее содержание гемоглобина в эритроците (MCH), тромбоциты, лейкоциты, лимфоциты, моноциты, гранулоциты, гематокрит) устанавливали с помощью автоматического гематологического анализатора URIT-2900 Vet Plus, (URIT Medial Electronic Co., Китай).

Статистический анализ. Статистические данные были обработаны с использованием пакета программ Statistica 12 (StatSoft Inc., США) и Microsoft Excel (Microsoft Corporation, США). Нормальность распределения данных была проверена с помощью теста на соответствие Колмогорова-Смирнова. Для оценки статистической значимости был использован параметрический t-критерий Стьюдента при уровнях значимости 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***).

Результаты и обсуждение

Морфология и биохимия крови. Результаты морфологического и биохимического анализа крови свидетельствуют об изменении ряда показателей на фоне введения исследуемого фактора (табл. 2). Среди морфологических показателей наблюдалось увеличение доли лимфоцитов в лейкоцитарной формуле – на 6,6% ($p \leq 0,01$) в I опытной группе и на 6,9% ($p \leq 0,05$) во II группе по сравнению с контролем. Одновременно отмечено снижение содержания гетерофилов на 4,6% и 6,5% ($p \leq 0,05$) в I и II опытных группах, соответственно. На фоне выявленных сдвигов в лейкоцитарной формуле особое значение имеет анализ соотношения гетерофилов к лимфоцитам (Н/Л-индекс) – маркера функциональной активности иммунной системы у сельскохозяйственных птиц. У птиц контрольной группы Н/Л-индекс составил $1,05 \pm 0,06$. В опытных группах выявлено снижение Н/Л-индекса: до $0,84 \pm 0,04$ (ОГ1) и $0,80 \pm 0,09$ (ОГ2).

Таблица 2.

Морфологические и биохимические показатели крови кур-несушек (*Gallus gallus L.*)

Table 2. Morphological and Biochemical Parameters of Blood in Laying Hens (*Gallus gallus L.*)

Показатели	Группы			
	Контроль	ОГ 1	ОГ 2	ОГ 3
Глюкоза, ммоль/л	$9,63 \pm 0,68$	$8,45 \pm 2,75$	$8,41 \pm 1,24$	$9,06 \pm 0,57$
Общий протеин, г/л	$42,4 \pm 5,0$	$31,4 \pm 11,5$	$31,3 \pm 8,6$	$29,5 \pm 4,9$
Альбумин, г/л	$18,0 \pm 2,1$	$12,0 \pm 6,4$	$11,7 \pm 3,8$	$10,7 \pm 3,2$
АЛТ, Ед/л	$33,8 \pm 1,9$	$22,2 \pm 5,1^*$	$28,5 \pm 8,3$	$51,7 \pm 6,7^*$
АСТ, Ед/л	$150,4 \pm 7,3$	$122,3 \pm 25,3$	$127,4 \pm 28,8$	$140,3 \pm 30,4$
Холестерин, ммоль/л	$2,3 \pm 0,89$	$1,81 \pm 0,67$	$2 \pm 0,65$	$1,8 \pm 0,33$
Триглицериды, ммоль/л	$10,40 \pm 0,66$	$7,73 \pm 1,07^*$	$10,60 \pm 3,71$	$8,94 \pm 1,03$
Креатинин, мкмоль/л	$11,80 \pm 0,05$	$15,40 \pm 1,58^*$	$17,30 \pm 1,79^{**}$	$16,90 \pm 2,32^*$
Мочевая кислота, мкмоль/л	$249,6 \pm 36,2$	$148,3 \pm 22,4^*$	$156,1 \pm 18,3^*$	$86,5 \pm 8,5^{***}$

Гемоглобин, г/л	113,5±6,5	120,90±0,12	93,5±0,5	108,5±6,5
Эритроциты, 10 ¹² /л	2,09±0,19	2,03±0,12	1,67±0,01	1,96±0,13
Гематокрит, %	24,5±1,9	26,09±0,12	20,3±4,3	23,4±0,9
Тромбоциты, 10 ⁹ /л	26,0±1,0	23,0±1,0	23,5±0,5	23,0±2,0
Лейкоциты, 10 ⁹ /л	37,8±8,8	36,80±0,11	26,5±1,6	30±3,8
Гетерофилы, %	47,30±2,14	42,70±0,11*	40,8±1,7*	46,1±3,6
Лимфоциты, %	44,20±0,65	50,80±0,11**	51,1±3,1*	43,6±3,9
Моноциты, %	0,9±0,5	0,29±0,12	0,6±0,5	0,8±0,2
Эозинофилы, %	7,5±1,0	5,39±0,12	4,55±2,25	9,15±0,45
Базофилы, %	0,25±0,05	0,29±0,12	1,10±0,40	0,35±0,05
Н/Л-индекс	1,05±0,06	0,84±0,04*	0,80±0,09*	1,09±0,05

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

При анализе биохимических показателей, установлено, что уровень глюкозы оставался стабильным в диапазоне 8,41–9,06 ммоль/л, однако выявлена незначительная тенденция к снижению в I и II опытной группах. Креатинин был увеличен в I опытной группе на 30,5% ($p \leq 0,05$), во II – на 46,6% ($p \leq 0,01$) и в III – на 43,2% ($p \leq 0,05$) в сравнение с контрольными значениями. Напротив, уровень мочевой кислоты был снижен на 40,6% ($p \leq 0,05$) и 37,5% ($p \leq 0,05$) в I и II группах по отношению к контролю. В III опытной группе данный показатель был снижен на 65,3% ($p \leq 0,001$). Среди показателей липидного обмена, уровень холестерина оставался стабильным в опытных группах, при этом триглицериды были снижены в I группе на 25,67% ($p \leq 0,05$). При анализе печеночных трансаминаз активность АСТ оставалась стабильной, тогда как активность АЛТ в I группе снизилась на 34,3% ($p \leq 0,05$), а в III группе увеличилась на 53% ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем.

Сывороточные гормоны и маркеры обновления костной ткани. Установлено, что введение цитрата кальция в различной концентрации сопровождалось модуляцией гормональной регуляции кальциевого гомеостаза (рис. 1). Так, во II опытной группе наблюдалось снижение паратиреоидного гормона на 18,95% ($p \leq 0,01$) относительно контроля. В опытных группах отмечено также снижение концентрации кальцитонина – на 43,54% ($p \leq 0,05$) в I группе и на 48,04% ($p \leq 0,05$) во II группе по сравнению с контролем. При этом сывороточный уровень 25-гидроксивитамина D₃ [25(ОН)D₃] – ключевого предшественника активной формы витамина D – не менялся во всех исследуемых группах.

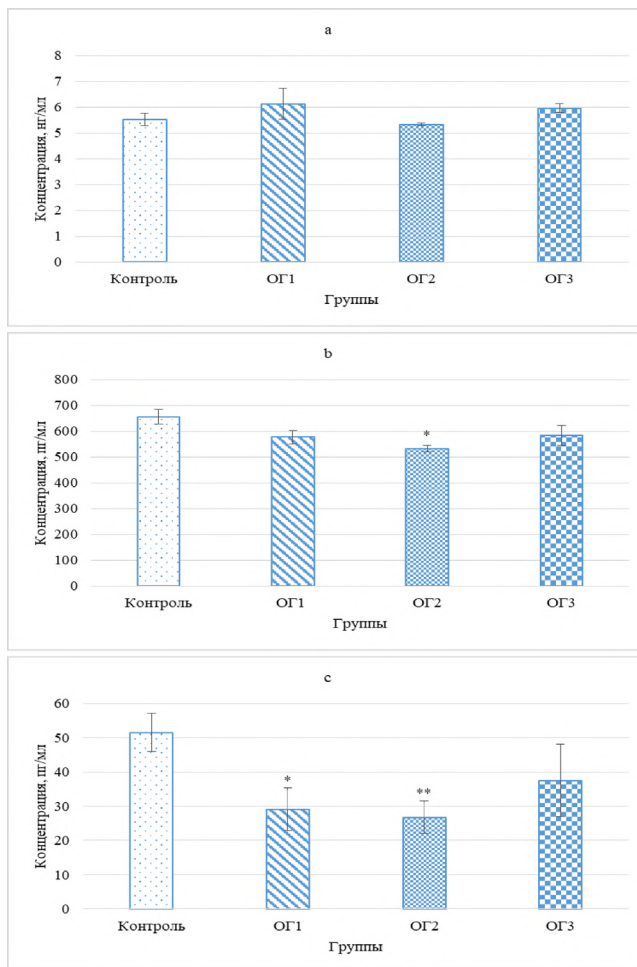


Рис. 1. Концентрация гормонов, связанных с метаболизмом кальция и фосфора в сыворотке крови кур-несушек (*Gallus gallus* L.)

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; а – витамин D₃ (25-OH-D₃), б – паратиреоидный гормон (PTH); в – кальцитонин (CT). Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Fig. 1. Concentrations of hormones associated with calcium and phosphorus metabolism in the blood serum of laying hens (*Gallus gallus* L.)

Note: * – $p \leq 0.05$; ** – $p \leq 0.01$; а – vitamin D₃ (25-OH-D₃); б – parathyroid hormone (PTH); в – calcitonin (CT). Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

При оценке сывороточных маркеров обновления костной ткани (рис. 2) – поперечно-сшитого карбоксиконцевого телопептида I типа (CTX-I) и остеопротегерина (OPG) – установлено, что уровень CTX-I, отражающего интенсивность костной резорбции, не претерпел достоверных изменений в опытных группах по сравнению с контролем. В то же время выявлены значимые сдвиги в концентрации остеопротегерина – ключевого ингибитора остеокластогенеза. Во II опытной группе было отмечено увеличение OPG на 70,07% ($p \leq 0,05$), напротив, в III опытной группе концентрация OPG снизилась на 41,4% ($p \leq 0,05$).

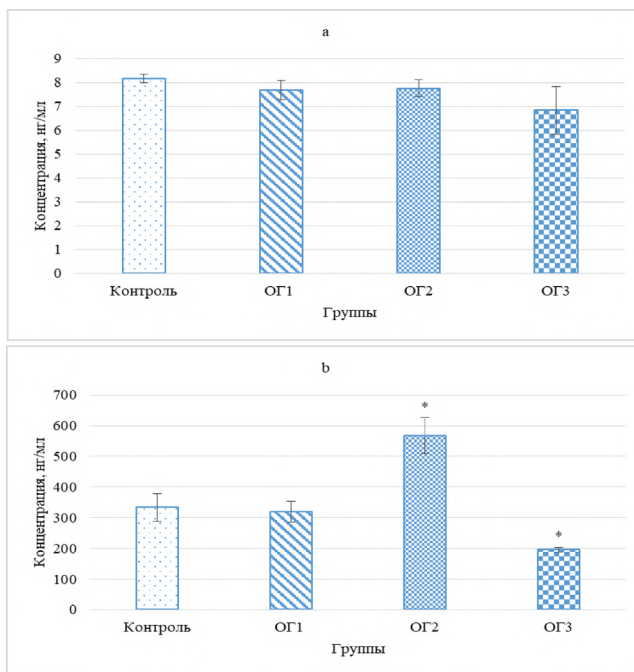


Рис. 2. Влияние различных доз цитрата кальция на сывороточные маркеры обновления костной ткани у кур-несушек (*Gallus gallus L.*)

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; а – поперечно-сшитый карбоксиконцевой телопептид I типа (CTX-I); б – остеопротегерин (OPG). Данные представлены как «среднее $\pm$ ошибка среднего» при $n = 30$.

Fig. 2. Effect of various doses of calcium citrate on serum markers of bone turnover in laying hens (*Gallus gallus L.*)

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; а – cross-linked carboxy-terminal telopeptide type I (CTX-I); б – osteoprotegerin (OPG). Data are presented as “mean $\pm$ standard error of the mean” with $n = 30$.

Элементный профиль сыворотки крови. При анализе элементного профиля сыворотки крови выявлен ряд изменений (табл. 3). Среди макроэлементов установлено снижение концентрации Са на 19,91%, 17,21% и 18,18% в I, II и III опытных группах, соответственно, в сравнении с контролем ($p \leq 0,01$). Аналогичные изменения наблюдались в отношении Р, так в I опытной группе доля этого элемента была снижена на 47,4% ($p \leq 0,01$), во II группе – на 26,3% ($p \leq 0,05$) и в III группе – на 36,9% ($p \leq 0,01$). Кроме этого, концентрация К была ниже в III опытной группе на 15,66% в сравнении с контрольными значениями ($p \leq 0,01$).

Среди эссенциальных и условно-эссенциальных элементов наблюдалось снижение доли Си во всех опытных группах. В частности в I опытной группе разница по Си составила 20,59% ($p \leq 0,05$), во II – 14,71% ($p \leq 0,05$) и в III группе – 17,65% ($p \leq 0,05$) в сравнении с контролем. Помимо этого, в I опытной группе наблюдалось снижение Sг на 17,65% ($p \leq 0,001$) и Zn на 22,07% ($p \leq 0,05$), с одновременным увеличением Вг на 56,97% ($p \leq 0,05$). В III опытной группе выявлено увеличение концентрации Mn на 51,85% ($p \leq 0,01$) и снижение Со на 33,3% ($p \leq 0,01$).

Анализ концентраций токсичных и потенциально токсичных элементов в сыворотке крови показал, что они находятся в пределах фоновых значений для птиц. При этом, статистически значимых изменений в распределении данных элементов между контрольной и опытными группами не выявлено.

Таблица 3.

Элементный профиль сыворотки крови кур-несушек на фоне скармливания цитрата кальция в различной концентрации, мг/кг

Table 3. Elemental profile of blood serum from laying hens fed calcium citrate at various concentrations, mg/kg

Элемент	Группы			
	Контроль	ОГ 1	ОГ 2	ОГ 3
Li	0,007±0,001	0,012±0,004	0,008±0,0004	0,008±0,002
Na	3219±33,4	3268±60,7	3089±75,3	3188±29,4
Mg	37,3±1,45	32,7±1,33	38,7±0,88	32,3±1,45
Al	1,64±0,51	0,89±0,09	1,79±0,46	1,43±0,26
P	655±38	344,5±26,5**	483±3*	413,3±10,3**
K	206,3±11,3	199±7,94	212,7±3,92	174±4,04**
Ca	289,3±4,05	231,7±2,6**	239,5±3,5**	236,7±4,63**
Mn	0,27±0,02	0,18±0,05	0,34±0,12	0,41±0,02**
Co	0,003±0,0001	0,002±0,0004	0,003±0,0004	0,002±0,0001**
Ni	0,014±0,004	0,006±0,002	0,013±0,004	0,005±0,001
Cu	0,34±0,01	0,27±0,03*	0,29±0,02*	0,28±0,01*
Se	0,22±0,01	0,22±0,02	0,2±0,008	0,22±0,02

Br	5,67±0,06	8,9±0,73*	6,17±0,39	5,43±0,32
Sr	0,17±0,005	0,14±0,01***	0,18±0,02	0,16±0,007
Mo	0,02±0,006	0,024±0,006	0,017±0,002	0,019±0,002
Sb	0,003±0,0001	0,002±0,0004	0,003±0,0002	0,002±0,0002
I	0,062±0,007	0,047±0,011	0,055±0,007	0,051±0,001
Ba	0,063±0,007	0,049±0,005	0,058±0,005	0,053±0,005
Hg	0,0008±0,0004	0,0004±0,0001	0,0003±0,0001	0,0004±0,0001
Pb	0,02±0,01	0,007±0,004	0,006±0,004	0,0009±0,0005
Bi	0,002±0,0003	0,001±0,0003	0,0009±0,0003	0,001±0,0005
Cr	0,09±0,03	0,05±0,008	0,1±0,03	0,06±0,013
Fe	8,34±0,96	7,26±0,33	7,27±0,62	6,74±0,24
Zn	4,35±0,26	3,39±0,37*	3,88±0,54	4,32±0,23

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

Элементный профиль костной ткани. Результаты исследования элементного профиля костной ткани продемонстрировали как общие закономерности, так и дозозависимые изменения в ответ на введение цитрата кальция (элементный профиль костной ткани кур-несушек контрольной группы представлен в табл. 4).

Таблица 4.

Элементный профиль костной ткани кур-несушек контрольной группы, мг/кг

Table 4. Elemental profile of bone tissue from laying hens in the control group, mg/kg

Элемент	Контроль
Li	0,112±0,029
Na	4402,0±38,3
Mg	2899,7±21,5
P	96309,0±336,5
K	2183,3±13,8
Ca	140421,33±97,02
Mn	6,025±0,023
Co	0,2263±0,0044
Ni	1,276±0,028
Cu	8,09±1,59
Se	0,631±0,022
Sr	79,22±0,54
Mo	0,1646±0,0067
Cd	0,0271±0,0066
Sb	0,1676±0,0062
I	1,12±0,09

Ba	59,06±0,56
Hg	0,0161±0,0005
Tl	0,0068±0,0015
Pb	2,85±0,11
Bi	0,0295±0,005
Cr	2,22±0,07
Fe	156,069±1,029
Zn	191,54±2,32
As	1,008±0,016

Примечание: Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.
 Note: The data are presented as “mean ± standard error of the mean” for $n = 30$.

В частности среди макроэлементов в I группе (рис. 3) было отмечено повышение концентрации Ca на 3,48% ($p \leq 0,001$), Mg на 6,76% ($p \leq 0,05$), со снижением K на 9,44% ($p \leq 0,05$). Среди эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов установлено увеличение концентраций Mn на 15,86% ($p \leq 0,05$) и Se на 15,24% ($p \leq 0,01$) в сравнении с контролем. При этом наблюдалось снижение доли Sr на 7,8% ($p \leq 0,01$) и Cu на 21,09% ($p \leq 0,05$). Среди токсичных и потенциально токсичных элементов в костной ткани I группы выявлено снижение концентрации Pb на 20,17% ($p \leq 0,01$).

Во II опытной группе установлены следующие изменения содержания элементов в берцовой кости относительно контроля. Среди макроэлементов наблюдалось повышение Mg на 5,79% ($p \leq 0,01$), Ca на 1,00% ($p \leq 0,05$) и Na на 2,11% ($p \leq 0,05$). Среди эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов выявлено увеличение Cr на 40,15% ($p \leq 0,01$), Se на 35,08% ($p \leq 0,01$), Mn на 11,66% ($p \leq 0,01$), Mo на 7,98% ($p \leq 0,001$) в сравнении с контролем. При этом отмечено снижение Fe на 6,98% ($p \leq 0,05$), Zn на 6,81% ($p \leq 0,01$) и Sr на 7,71% ($p \leq 0,05$). Анализ распределения токсичных и потенциально-токсичных элементов показал отсутствие значимых изменений в данной группе.

В III опытной группе среди макроэлементов отмечено повышение концентраций Mg на 7,54% ($p \leq 0,01$) и P на 1,87% ($p \leq 0,01$) на фоне снижения K на 12,35% ($p \leq 0,001$). Среди эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов выявлено увеличение Cr на 56,17% ($p \leq 0,01$), Mn на 32,91% ($p \leq 0,001$) и Ba на 4,64% ($p \leq 0,05$). При этом отмечено снижение доли Fe на 8,74% ($p \leq 0,05$), I на 23,42% ($p \leq 0,05$) и Cu на 24,2% ($p \leq 0,05$). Распределение токсичных и потенциально-токсичных элементов показало снижение As на 6,32% ($p \leq 0,01$).

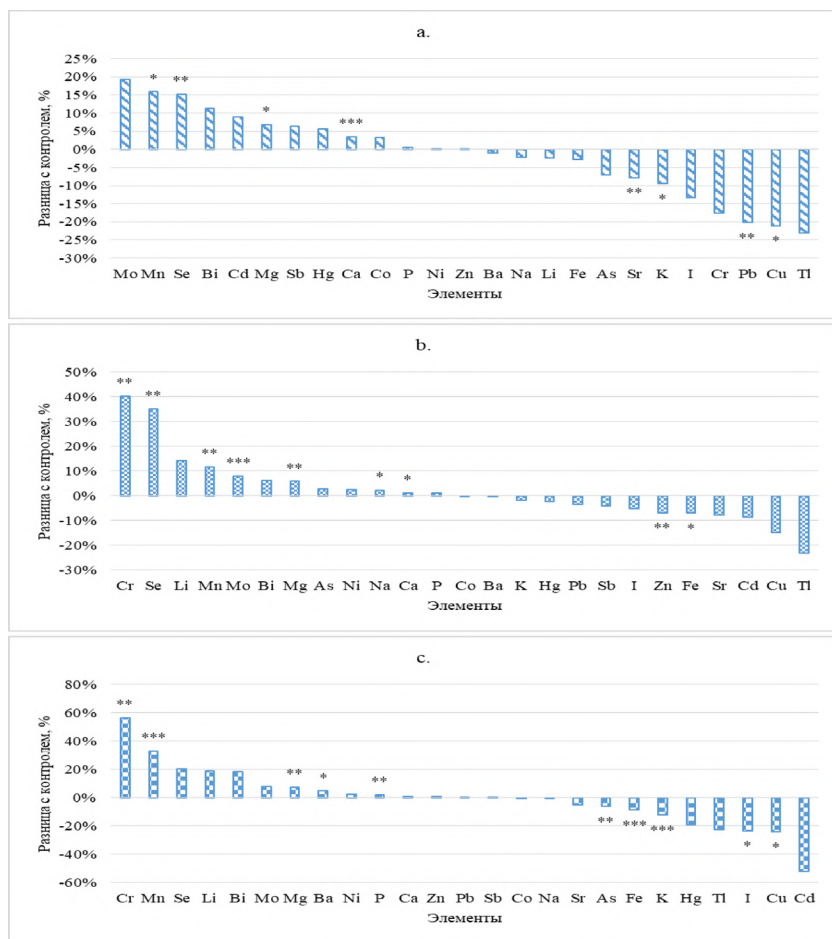


Рис. 3. Динамика элементного профиля костной ткани кур-несушек при скармливании цитрата кальция в различных дозировках, %

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$; а – ОГ1; б – ОГ2; в – ОГ3. Данные представлены как отклонение средних значений показателей опытных групп от среднего значения контроля при $n = 30$.

Fig. 3. Changes in the elemental profile of bone tissue in laying hens fed calcium citrate at various doses, %

Note: * – $p \leq 0.05$; ** – $p \leq 0.01$; *** – $p \leq 0.001$; а – Group 1; б – Group 2; в – Group 3. Data are presented as the deviation of the mean values of the experimental groups from the mean value of the control group, with $n = 30$.

Элементный профиль яичной скорлупы. В ходе исследования проведён анализ элементного состава скорлупы яиц. Изменения концентрации микро- и макроэлементов в скорлупе представлены в виде процентного отклонения от значений контрольной группы (табл. 5).

Таблица 5.

Элементный профиль яичной скорлупы от кур-несушек, рацион которых содержал различное количество цитрата кальция, мг/кг

Table 5. Elemental profile of eggshells from laying hens fed diets containing varying amounts of calcium citrate, mg/kg

Элемент	Группы			
	Контроль	ОГ1	ОГ2	ОГ3
Mg	3290,0±214,0	3483,0±192,0	3471,0±198,0	3038,0±185,0
P	747,0±56,0	760,0±46,0	1032,0±55,0**	595,0±43,0*
K	325,0±19,0	365,0±19,0	436,0±22,0	377,0±22,0
Ca	343034,0±22082,0	350651,0±21039,0*	356548,0±23532,0**	348210,0±19152,0*
Sr	178,4±12,0	145,8±10,1*	164,2±10,3	176,0±9,7
Ba	13,06±0,85	8,40±0,50*	9,75±0,68**	10,41±0,73*

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$. Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$. Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

Наиболее выраженные изменения наблюдались в содержании К, Р и Ва. В группе ОГ2 отмечено наиболее значительное повышение концентрации К – на 34,15% ($p \leq 0,01$). В группе ОГ3 наблюдалось увеличение концентрации К на 16,00% ($p \leq 0,05$) в сравнении с контролем.

Доля Р в скорлупе в группе ОГ2 возросла на 38,15% ($p \leq 0,01$), при этом в группе ОГ3, напротив, отмечено снижение Р на 20,35% ($p \leq 0,05$). Mg в скорлупе яиц от птицы опытных групп не отличался от контроля. Са, как основной компонент скорлупы, демонстрировал увеличение на 2,22% в ОГ1 ($p \leq 0,05$), в ОГ2 – на 3,94% ($p \leq 0,01$) и в ОГ3 на 1,51% ($p \leq 0,05$). Во всех опытных группах отмечено выраженное снижение концентраций Ва в скорлупе яиц: на 35,69% ($p \leq 0,01$) в ОГ1, 25,32 % ($p \leq 0,01$) в ОГ2 и 20,23% ($p \leq 0,05$) в ОГ3.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что введение цитрата кальция в рацион кур-несушек в различных дозировках оказывает дифференцированное влияние на минеральный обмен у птиц.

Поскольку цитрат кальция обладает высокой биодоступностью, введение в его в рацион птицы, как следует ожидать, должно сопровождаться

рядом биологических эффектов: с одной стороны, это обеспечение поступления ионов кальция (Ca^{2+}) в организм, необходимых для минерализации костной ткани и формирования скорлупы, с другой стороны, активизация метаболизма за счет участия цитрат-аниона ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$) в таких процессах как цикл трикарбоновых кислот, и, наконец, конкурентно или синергетически обусловленное изменение усвояемости других минералов, что в купе согласуется с полученными экспериментальными данными.

Так в проведенном эксперименте, уровень глюкозы в крови у птиц опытных групп оставался стабильным на протяжении всего эксперимента, что, вероятно, обусловлено высокой устойчивостью гликемического гомеостаза, строго регулируемого эндокринно-метаболическими механизмами. У птиц базовая концентрация глюкозы в плазме физиологически выше по сравнению с млекопитающими [18]. Цитрат-анион является основным субстратом центрального энергетического цикла каждой клетки – цикла Кребса. Кроме этого, данный метаболит участвует не только в производстве энергии посредством цикла трикарбоновых кислот, но и в других метаболических путях, поскольку может быть источником цитозольных восстановительных эквивалентов для биосинтеза, а также источником углерода для цитозольных биосинтетических процессов (например, при синтезе стеролов и жирных кислот) и, наконец, регулятором других метаболических реакций, в частности, – отрицательной модуляции фосфофруктокиназы и положительной модуляции ацетил-КоА-карбоксилазы. Этот механизм позволяет клетке перераспределять потоки метаболитов в зависимости от энергетических потребностей [33]. Соответственно, возможно, снижение уровня триглицеридов в крови опытной птицы связано с перестройкой липидного обмена в сторону более эффективного использования жиров как источника энергии, а не их аккумуляции. Подобный эффект согласуется с данными о нормализации АЛТ и указывает на снижение нагрузки на печень, что особенно важно при интенсивной яйценоскости, сопряжённой с высокой метаболической нагрузкой. Таким образом, цитрат кальция, через участие цитрат-аниона в регуляции метаболических путей, может способствовать оптимизации энергетического баланса и профилактике метаболических нарушений.

Кроме этого, в исследовании выявлено увеличение уровня креатинина на фоне снижении концентрации мочевой кислоты. У птиц мочевая кислота является основным конечным продуктом катаболизма пуринов, и её экскреция напрямую связана с уровнем белкового обмена [46]. Снижение концентрации мочевой кислоты может указывать на более эффективное

использование аминокислот для синтеза белка, а не для энергетических нужд, что характерно для состояния анаболического доминирования. Увеличение креатинина, в свою очередь, связано с распадом креатинфосфата в мышечной ткани – процессом, сопряжённым с высокой энергетической активностью [2]. Учитывая высокий уровень продуктивности несушек, этот сдвиг, скорее всего, отражает физиологическую адаптацию к повышенной метаболической нагрузке, а не нарушение клубочковой фильтрации. Отсутствие изменений в других показателях (например, мочевины) дополнительно подтверждает, что данные сдвиги не носят патологического характера.

Кальций, помимо своих основных биологических функций, является важнейшим регулятором метаболизма. Он стимулирует распад гликогена, запускает мышечное сокращение и опосредует множество гормональных сигналов в качестве вторичного посредника [26]. Кальций также играет важную роль в регуляции цикла лимонной кислоты, активируя пируватдегидрогеназу, НАД⁺-зависимую изоцитратдегидрогеназу и 2-оксoglутаратдегидрогеназу [42].

Уровень АЛТ в I опытной группе снижался, а в III группе повышался. Так как АЛТ является ферментом преимущественно локализованным в цитоплазме гепатоцитов, соответственно данный показатель выступает маркером состояния печени [24]. Выявленные изменения носят адаптивный дозозависимый эффект. Соответственно замена 10% карбоната кальция на цитрат (ОГ1) приводила к снижению концентрации АЛТ, что вероятно также подтверждает усиление энергетического обмена и нормализацию липидного [33]. При этом увеличение дозы до 30% (ОГ3), вероятно превышает адаптационные возможности организма.

Анализ морфологических показателей крови продемонстрировал снижение гетерофилов на фоне умеренного увеличения лимфоцитов в I и II опытных группах. В данном случае целесообразнее рассматривать отношение данных показателей (Н/Л-индекс). Гетерофилы выполняют ключевую роль в первой линии защиты организма, обеспечивая фагоцитарную активность и формирование воспалительного ответа при инфекционных поражениях, вызванных бактериальными агентами. В свою очередь, лимфоциты являются основными эффекторами адаптивного иммунитета: В-лимфоциты опосредуют гуморальный иммунный ответ, а Т-лимфоциты – клеточный [27]. Поскольку Н/Л-индекс традиционно рассматривается как маркер стрессовой нагрузки и активности врождённого иммунитета, его выраженное снижение в группе II указывает на ослабление системного

воспалительного ответа и относительное усиление позиций приобретённого звена иммунной защиты, опосредованного лимфоцитами [27; 40]. Так, к примеру, ранее было показано, что птицы с низким H/L-индексом демонстрируют повышенную устойчивость к *Salmonella enterica* и другим патогенам [40]. Таким образом, зарегистрированный эффект может отражать не только снижение стресса, но и формирование более устойчивого иммунологического профиля, способствующего повышению общей резистентности организма. Подобная динамика может быть связана как с прямым влиянием ионов кальция на сигнальные пути иммунных клеток (Ca^{2+} как вторичный мессенджер в активации кальмодулинзависимых киназ) [41; 44], так и с метаболической ролью цитрат-аниона, участвующего в энергетическом обмене [33] и модуляции окислительно-восстановительных процессов [49].

На фоне выявленных изменений показателей крови, особый интерес представляет анализ гормонального фона птиц, поскольку эндокринная регуляция играет ключевую роль в поддержании гомеостаза, продуктивности и адаптационных возможностей организма. Так, в проведенном эксперименте выявлено снижение концентрации паратиреоидного гормона во II опытной группе, что соответствует классическому механизму отрицательной обратной связи. Однако здесь возникает парадокс: сывороточный уровень общего кальция также снизился. Это противоречие можно объяснить тем, что цитрат образует комплексы с ионизированным кальцием, снижая его свободную фракцию и, соответственно, доступность для CaSR-рецепторов паразитовидных желез [14; 45]. Кроме того, метаболизм цитрата сопряжён с образованием бикарбоната, что может вызывать лёгкий метаболический алкалоз, также подавляющий секрецию данного гормона [6]. При этом уровень $25(\text{OH})\text{D}_3$ оставался стабильным во всех группах, что исключает влияние витамин-D-зависимых механизмов. Снижение кальцитонина вероятно также может являться следствием алкалоза [6] или общего улучшения метаболического фона [33]. Однако согласно исследованиям de Matos R. [8] кальцитонин играет второстепенную и неопределённую роль в регуляции обмена кальция. Для выявления более точных механизмов необходимы дополнительные исследования.

Анализ элементного состава сыворотки крови, берцовой кости и яичной скорлупы позволил получить комплексное представление о влиянии цитрата кальция на минеральный обмен. Учитывая высокую суточную потребность в кальции, связанную с формированием яичной скорлупы, любые изменения в распределении макро- и микроэлементов отражают

не только эффективность добавки, но и возможные риски для системного гомеостаза [13]. Парадоксальным наблюдением стало достоверное снижение концентрации общего кальция в сыворотке во всех опытных группах, несмотря на поступление легкоусвояемой формы Са. Это может быть объяснено несколькими взаимосвязанными механизмами. Во-первых, цитрат образует растворимые комплексы с ионизированным кальцием, что приводит к снижению его свободной (биологически активной) фракции и, как следствие, к перерасчёту общего Са в сторону понижения [29]. Во-вторых, поступающий Са, благодаря высокой биодоступности цитратной формы, может напрямую направляться в минеральные депо – медуллярную кость и матку [51], минуя сывороточный пул, что делает сывороточный Са недостаточно чувствительным маркером обеспеченности организма.

Снижение Р может быть связано с усиленным включением данного макроэлемента в минерализующиеся ткани – как в костную матрицу, так и в яичную скорлупу, где он участвует в формировании первичного ядра гидроксиапатита [32; 37]. Однако значительное снижение концентрации калия в III группе указывает на возможное нарушение электролитного баланса, особенно при высокой дозе добавки, что может повлиять на функцию Na^+/K^+ -АТФазы и, как следствие, на транспорт ионов в эпителии матки [12].

Костная ткань служит долговременным депо макро- и микроэлементов, и её химический состав является более чувствительным и объективным показателем обеспеченности организма минералами, особенно при длительном применении функциональных добавок [50]. Берцовая кость несущек содержит медуллярную ткань, как временное депо кальция, формируемое под действием эстрогенов [47]. В I и II группах отмечено увеличение содержания Са, что свидетельствует о пополнении минеральных запасов и благоприятном влиянии цитрата на минерализацию. Кроме этого, наблюдался положительный рост Mg, необходимого для активации ферментов, участвующих в энергетическом обмене и формировании костного матрикса [10]. Среди микроэлементов: установлено достоверное увеличение Mn, Se и Cr – кофакторов ключевых антиоксидантных ферментов [48], таких как Mn-супероксиддисмутаза и глутатионпероксидаза, что может указывать на улучшение окислительного статуса и защиту костной ткани от повреждения активными формами кислорода. В то же время во всех группах выявлено снижение Cu, Zn, Fe и Co, что представляет собой потенциальный риск. Эти элементы являются незаменимыми кофакторами ферментов [21], участвующих в синтезе коллагена (Cu) [25], ремоделировании кости (Zn) [36] и энергетическом обмене (Fe в составе

цитохромов [43]). Дефицит этих микроэлементов, даже при достаточной минерализации, может привести к снижению прочности костной ткани и повышенному риску переломов [5].

В контексте репродуктивной функции особое значение имеет элементный состав яичной скорлупы – основного пути минерализации у несушек [19]. Наиболее выраженные положительные сдвиги выявлены в ОГ2: увеличение концентраций кальция, фосфора и калия. Эти элементы играют ключевую роль в формировании прочной скорлупы [31]: фосфаты участвуют в нуклеации кристаллов апатита [37], калий регулирует работу Na^+/K^+ -АТФазы [34], создавая электрохимический градиент для транспорта кальция в матке. Интересно, что в ОГ3, несмотря на рост концентрации кальция, уровень фосфора снизился, что может указывать на нарушение структурной организации минеральной решётки и потенциальное снижение механической прочности скорлупы [9]. Снижение Sr и Ba во всех группах может быть связано с конкурентным вытеснением этих элементов цитратом кальция, что представляет дополнительный защитный эффект [22].

Особый интерес представляют изменения в содержании потенциально токсичных элементов. Во всех опытных группах наблюдалось достоверное снижение Sr и Ba в костной ткани и скорлупе. Sr, являясь химическим аналогом кальция, может замещать его в гидрок시아патите, нарушая кристаллическую структуру [4] и снижая прочность кости и скорлупы. Ba обладает нейротоксичностью и блокирует калиевые каналы [3]. Их снижение может быть связано с конкурентным вытеснением цитратом кальция за счёт более высокой аффинности транспортных систем к Ca^{2+} или с усилением селективной абсорбции в кишечнике. Таким образом, цитрат кальция, помимо своей основной функции, может выполнять роль природного модулятора минеральной селективности, снижая аккумуляцию чужеродных катионов [28]. Полученные данные свидетельствуют о том, что введение цитрата кальция в исследуемых дозах не способствует кумуляции токсичных элементов в системном кровотоке и не нарушает функцию барьерных систем, что подтверждает его безопасность в применении.

Было показано, что введение цитрата кальция в различных концентрациях вызывает системные изменения в гормональной регуляции, иммунном статусе, энергетическом обмене и элементном составе тканей у кур-несушек, при этом эффекты носят выраженный дозозависимый характер и отражают сложную интеграцию минерального, репродуктивного и адаптивного гомеостаза.

Заключение

1. В настоящем исследовании показано, что замещение известняка цитратом кальция в рационе кур-несушек оказывает дозозависимое влияние на минеральный обмен, эндокринную регуляцию, иммунный статус и качество яичной скорлупы.

2. Наиболее позитивные результаты были получены при замещении 20% карбоната кальция на цитрат: в этой группе улучшались параметры минерализации, качества скорлупы и метаболической устойчивости у несушек.

3. Увеличение дозировки цитрата до 30%, судя по всему, сопровождалось превышением адаптационных возможностей организма.

Полученные данные обосновывают перспективность использования органических форм кальция в птицеводстве и требуют дальнейших исследований долгосрочных эффектов, а также разработки сбалансированных комбинированных добавок для профилактики возможного вторичного дефицита микроэлементов.

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) и одобрено комитетом по биоэтике ФГБНУ ФНИЦ БСТ РАН (протокол № 1 от 17.01.2024).

Информация о конфликте интересов. Все авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант № 23-16-00165 «Поиск, аттестация и внедрение новых форм источников кальция для промышленного птицеводства»).

Список литературы / References

1. Фисинин, В. И., & Егоров, И. А. (2019). *Руководство по кормлению сельскохозяйственной птицы: метод. пособие*. Москва: ЛИКА, 215 с. (Fisinin, V. I., & Egorov, I. A. (2019). *Guidelines on feeding agricultural poultry: Methodological guide*. Moscow: LIKA, 215 p.)
2. Arzour-Lakehal, N., & Boudebza, A. (2021). Biochemical reference intervals in broiler chickens according to age and strain. *Agricultural Science and Technology*, 13(4), 357–364. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.04.058> EDN: <https://elibrary.ru/WAELGP>
3. Bhoelan, B. S., Stevering, C. H., van der Boog, A. T., & van der Heyden, M. A. (2014). Barium toxicity and the role of the potassium inward rectifier current. *Clin-*

- ical Toxicology (Philadelphia)*, 52(6), 584–593. <https://doi.org/10.3109/15563650.2014.923903>
4. Bigi, A., & Boanini, E. (2025). Strontium-substituted calcium orthophosphates: Structure, stability, morphology, and biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(12), 5886. <https://doi.org/10.3390/ijms26125886> EDN: <https://elibrary.ru/ZSBLAK>
 5. Ciosek, Ż., Kot, K., & Rotter, I. (2023). Iron, zinc, copper, cadmium, mercury, and bone tissue. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2197. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032197> EDN: <https://elibrary.ru/UHX-ORR>
 6. Costello, L. C., & Franklin, R. B. (2016). Plasma citrate homeostasis: How it is regulated; and its physiological and clinical implications. An important, but neglected, relationship in medicine. *HSOA Journal of Human Endocrinology*, 1(1), 005.
 7. De Cloet, C. A., Maina, A. N., Schulze, H., Bédécarrats, G. Y., & Kiarie, E. G. (2023). Egg production, egg quality, organ weight, bone ash, and plasma metabolites in 30-week-old Lohmann LSL lite hens fed corn and soybean meal-based diets supplemented with enzymatically treated yeast. *Poultry Science*, 102(4), 102527. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102527> EDN: <https://elibrary.ru/NYJZDD>
 8. de Matos, R. (2008). Calcium metabolism in birds. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*, 11(1), 59–82. <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2007.09.005>
 9. Du, Y., Hao, D., Liu, W., Liu, W., Li, D., Lei, Q., & Li, F. (2024). Plasma biochemistry, intestinal health, and transcriptome analysis reveal why laying hens produce translucent eggs. *Animals (Basel)*, 14(17), 2593. <https://doi.org/10.3390/ani14172593> EDN: <https://elibrary.ru/NBIBEQ>
 10. Elnesr, S. S., Mahmoud, B. Y., da Silva Pires, P. G., Moraes, P., Elwan, H. A. M., El-Shall, N. A., & Alagawany, M. (2024). Trace minerals in laying hen diets and their effects on egg quality. *Biological Trace Element Research*, 202(12), 5664–5679. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04121-8> EDN: <https://elibrary.ru/FXACUF>
 11. Eusebio-Balcasar, P. E., Purdum, S., Hanford, K., & Beck, M. M. (2018). Limestone particle size fed to pullets influences subsequent bone integrity of hens. *Poultry Science*, 97(5), 1471–1483. <https://doi.org/10.3382/ps/pex412>
 12. Fu, K. B., Dai, D., Zhou, J. M., Wang, J., Zhang, H. J., Wu, S. G., & Wang, J. (2025). Dietary sodium sulfate supplementation improves eggshell quality, uterine ion transportation and glycosaminoglycan synthesis in laying hens. *Animal Bioscience*, 38(5), 1029–1040. <https://doi.org/10.5713/ab.24.0456> EDN: <https://elibrary.ru/VCIZVB>
 13. Garcia-Mejia, R. A., Sinclair-Black, M., Blair, L. R., Angel, R., Jaramillo, B., Regmi, P., & Ellestad, L. E. (2024). Physiological changes in the regulation of calcium and phosphorus utilization that occur after the onset of egg production in com-

- mercial laying hens. *Frontiers in Physiology*, 15, 1465817. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1465817> EDN: <https://elibrary.ru/XPDSQW>
14. Geng, Y., Mosyak, L., Kurinov, I., Zuo, H., Sturchler, E., Cheng, T. C., & Fan, Q. R. (2016). Structural mechanism of ligand activation in human calcium-sensing receptor. *eLife*, 5, e13662. <https://doi.org/10.7554/eLife.13662>
 15. Gloux, A., Le Roy, N., Mème, N., Piketty, M. L., Prié, D., Benzoni, G., & Duclos, M. J. (2020). Increased expression of fibroblast growth factor 23 is the signature of a deteriorated Ca/P balance in ageing laying hens. *Scientific Reports*, 10(1), 21124. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78106-7> EDN: <https://elibrary.ru/UHUHSW>
 16. Habig, C., Weigend, A., Baulain, U., Petow, S., & Weigend, S. (2021). Influence of age and phylogenetic background on blood parameters associated with bone metabolism in laying hens. *Frontiers in Physiology*, 12, 678054. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.678054> EDN: <https://elibrary.ru/XZMXRI>
 17. Hanlon, C., Takeshima, K., Kiarie, E. G., & Bédécarrats, G. Y. (2022). Bone and egg-shell quality throughout an extended laying cycle in three strains of layers spanning 50 years of selection. *Poultry Science*, 101(3), 101672. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101672> EDN: <https://elibrary.ru/VXWCDJ>
 18. Hawkes, L. A. (2025). Why the superb physiological capacity of birds matters. *Journal of Experimental Biology*, 228(Suppl_1), JEB247986. <https://doi.org/10.1242/jeb.247986> EDN: <https://elibrary.ru/AQUGEH>
 19. Hincke, M. T., Nys, Y., Gautron, J., Mann, K., Rodriguez-Navarro, A. B., & McKee, M. D. (2012). The eggshell: Structure, composition and mineralization. *Frontiers in Bioscience (Landmark Edition)*, 17(4), 1266–1280. <https://doi.org/10.2741/3985> EDN: <https://elibrary.ru/PNYESZ>
 20. Jansen, S., Baulain, U., Habig, C., Weigend, A., Halle, I., Scholz, A. M., & Weigend, S. (2020). Relationship between bone stability and egg production in genetically divergent chicken layer lines. *Animals (Basel)*, 10(5), 850. <https://doi.org/10.3390/ani10050850> EDN: <https://elibrary.ru/WGCFPE>
 21. Jomova, K., Makova, M., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2022). Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*, 367, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.110173> EDN: <https://elibrary.ru/QJKSNG>
 22. Krishnan, K. (2023). Calcium, strontium, barium, and radium. In *Patty's Toxicology* (pp. 1–16). <https://doi.org/10.1002/0471125474.tox028.pub3>
 23. Li, X., Cai, X., Wang, X., Zhu, L., Yan, H., Yao, J., & Yang, C. (2024). Understanding the causes of keel bone damage and its effects on the welfare of laying hens. *Animals (Basel)*, 14(24), 3655. <https://doi.org/10.3390/ani14243655> EDN: <https://elibrary.ru/XQUPYY>

24. Liu, Z., Que, S., Xu, J., & Peng, T. (2014). Alanine aminotransferase—old biomarker and new concept: A review. *International Journal of Medical Sciences*, 11(9), 925–935. <https://doi.org/10.7150/ijms.8951>
25. Ma, R., Feng, L., Wu, P., Liu, Y., Ren, H. M., Li, S. W., & Jiang, W. D. (2023). A new insight on copper: Promotion of collagen synthesis and myofiber growth and development in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Animal Nutrition*, 15, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.06.009> EDN: <https://elibrary.ru/BIDULD>
26. Matikainen, N., Pekkarinen, T., Ryhänen, E. M., & Schalin-Jäntti, C. (2021). Physiology of calcium homeostasis: An overview. *Endocrinology and Metabolism Clinics*, 50(4), 575–590. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.07.005> EDN: <https://elibrary.ru/HQNYPR>
27. Minias, P. (2019). Evolution of heterophil/lymphocyte ratios in response to ecological and life-history traits: A comparative analysis across the avian tree of life. *Journal of Animal Ecology*, 88(4), 554–565. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12941> EDN: <https://elibrary.ru/HZLSPR>
28. Molnár, Z., Hegedűs, M., Németh, P., & Pósai, M. (2025). Competitive incorporation of Ca, Sr, and Ba ions into amorphous carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 393, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2025.02.002> EDN: <https://elibrary.ru/GWLRNY>
29. Monchi, M. (2017). Citrate pathophysiology and metabolism. *Transfusion and Apheresis Science*, 56(1), 28–30. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2016.12.013>
30. Muir, W. I., Akter, Y., Bruerton, K., & Groves, P. J. (2023). The role of hen body weight and diet nutrient density in an extended laying cycle. *Poultry Science*, 102(2), 102338. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102338> EDN: <https://elibrary.ru/MOOVQC>
31. Muszyński, S., Kasperek, K., Świątkiewicz, S., Arczewska-Włosek, A., Wiącek, D., Donaldson, J., & Schwarz, T. (2022). Assessing bone health status and eggshell quality of laying hens at the end of a production cycle in response to inclusion of a hybrid rye to a wheat-corn diet. *Veterinary Sciences*, 9(12), 683. <https://doi.org/10.3390/vetsci9120683> EDN: <https://elibrary.ru/KCALKR>
32. Pagnussatt, H., de Oliveira, C. H., Valentim, J. K., Tavernari, F. C., Nunes, R. V., Castro, L. P., & Calderano, A. A. (2025). Effects of dietary non-phytate phosphorus on performance, egg quality, and bone traits in laying hens of different ages. *Poultry Science*, 104(11), 105806. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105806> EDN: <https://elibrary.ru/ABSBIP>
33. Palermo, A., Naciu, A. M., Tabacco, G., Manfrini, S., Trimboli, P., Vescini, F., & Falchetti, A. (2019). Calcium citrate: From biochemistry and physiology to clinical applications. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 20(3), 353–364. <https://doi.org/10.1007/s11154-019-09520-0> EDN: <https://elibrary.ru/PQPPHV>

34. Pivovarov, A. S., Calahorro, F., & Walker, R. J. (2018). Na⁺/K⁺-pump and neurotransmitter membrane receptors. *Invertebrate Neuroscience*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s10158-018-0221-7> EDN: <https://elibrary.ru/YUWAAK>
35. Qiu, K., Chang, X., Wang, J., Zhang, H., & Wu, S. (2024). Effects of dietary calcium lactate supplementation on laying performance, blood index, shinbone quality, jejunal immunity, and egg quality of aged laying hens. *Agriculture*, 14(2), 256. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020256> EDN: <https://elibrary.ru/BRHSBV>
36. Seo, H. J., Cho, Y. E., Kim, T., Shin, H. I., & Kwun, I. S. (2010). Zinc may increase bone formation through stimulating cell proliferation, alkaline phosphatase activity and collagen synthesis in osteoblastic MC3T3-E1 cells. *Nutrition Research and Practice*, 4(5), 356–361. <https://doi.org/10.4162/nrp.2010.4.5.356>
37. Sinclair-Black, M., Garcia, R. A., & Ellestad, L. E. (2023). Physiological regulation of calcium and phosphorus utilization in laying hens. *Frontiers in Physiology*, 14, 1112499. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1112499> EDN: <https://elibrary.ru/BXEBFB>
38. Song, M., Jiao, H., Zhao, J., Wang, X., Li, H., Wang, P., & Lin, H. (2022). Dietary supplementation of calcium propionate and calcium butyrate improves eggshell quality of laying hens in the late phase of production. *Journal of Poultry Science*, 59(1), 64–74. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0200127> EDN: <https://elibrary.ru/VPWZDT>
39. Sonntag, W. I., Spiller, A., & von Meyer-Höfer, M. (2019). Discussing modern poultry farming systems — insights into citizen's lay theories. *Poultry Science*, 98(1), 209–216. <https://doi.org/10.3382/ps/pey292>
40. Thiam, M., Wang, Q., Barreto Sánchez, A. L., Zhang, J., Ding, J., Wang, H., & Zhao, G. (2022). Heterophil/lymphocyte ratio level modulates Salmonella resistance, cecal microbiota composition and functional capacity in infected chicken. *Frontiers in Immunology*, 13, 816689. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.816689> EDN: <https://elibrary.ru/LRZMQR>
41. Tokumitsu, H., & Sakagami, H. (2022). Molecular mechanisms underlying Ca²⁺/calmodulin-dependent protein kinase signal transduction. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11025. <https://doi.org/10.3390/ijms231911025> EDN: <https://elibrary.ru/BLSYAH>
42. Traaseth, N., Elfering, S., Solien, J., Haynes, V., & Giulivi, C. (2004). Role of calcium signaling in the activation of mitochondrial nitric oxide synthase and citric acid cycle. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1658(1–2), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2004.04.015>
43. Tsiftoglou, A. S., Tsamadou, A. I., & Papadopoulou, L. C. (2006). Heme as key regulator of major mammalian cellular functions: Molecular, cellular, and pharmacological aspects. *Pharmacology & Therapeutics*, 111(2), 327–345. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2005.10.017>

44. Vig, M., & Kinet, J. P. (2009). Calcium signaling in immune cells. *Nature Immunology*, 10(1), 21–27. <https://doi.org/10.1038/ni.f.220>
45. Walker, R. W., Zhang, S., Coleman-Barnett, J. A., Hamm, L. L., & Hering-Smith, K. S. (2018). Calcium receptor signaling and citrate transport. *Urolithiasis*, 46(5), 409–418. <https://doi.org/10.1007/s00240-018-1035-0> EDN: <https://elibrary.ru/HLZVLP>
46. Wang, L., Li, J., Wang, B., Yin, X., Wei, J., & Qiu, H. (2024). Progress in modeling avian hyperuricemia and gout (Review). *Biomedical Reports*, 22(1), 1. <https://doi.org/10.3892/br.2024.1879> EDN: <https://elibrary.ru/ODCCHD>
47. Whitehead, C. C. (2004). Overview of bone biology in the egg-laying hen. *Poultry Science*, 83(2), 193–199. <https://doi.org/10.1093/ps/83.2.193>
48. Wróblewski, M., Wróblewska, W., & Sobiesiak, M. (2024). The role of selected elements in oxidative stress protection: Key to healthy fertility and reproduction. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17), 9409. <https://doi.org/10.3390/ijms25179409> EDN: <https://elibrary.ru/FTECDM>
49. Wu, X., Dai, H., Liu, L., Xu, C., Yin, Y., Yi, J., & Li, S. (2019). Citrate reduced oxidative damage in stem cells by regulating cellular redox signaling pathways and represents a potential treatment for oxidative stress-induced diseases. *Redox Biology*, 21, 101057. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2018.11.015>
50. Xiang, R., Zhao, X., Sha, L., Tang, M., Wu, X., Zhang, L., & Jiang, X. (2025). Mapping the role of macro and micronutrients in bone mineral density: A comprehensive Mendelian randomization study. *European Journal of Nutrition*, 64(4), 156. <https://doi.org/10.1007/s00394-025-03665-2> EDN: <https://elibrary.ru/QSQPWX>
51. Yenice, E., Mızrak, C., Gültekin, M., Atik, Z., & Tunca, M. (2015). Effects of organic and inorganic forms of manganese, zinc, copper, and chromium on bioavailability of these minerals and calcium in late-phase laying hens. *Biological Trace Element Research*, 167(2), 300–307. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0313-8> EDN: <https://elibrary.ru/JYXEJT>
52. Zhang, H., Wang, Y., Wang, Y., Wei, B., Wang, L., Nguyen, M. T., & Chen, W. (2024). Fermented calcium butyrate supplementation in post-peak laying hens improved ovarian function and tibia quality through the “gut-bone” axis. *Animal Nutrition*, 16, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.10.008> EDN: <https://elibrary.ru/ZOQLOV>
53. Zhao, S. C., Teng, X. Q., Xu, D. L., Chi, X., Ge, M., & Xu, S. W. (2020). Influences of low level of dietary calcium on bone characters in laying hens. *Poultry Science*, 99(12), 7084–7091. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.08.057> EDN: <https://elibrary.ru/YIKTAV>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Нечитайло Ксения Сергеевна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник отдела физиологии, биохимии и морфологии животных; старший преподаватель научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии»

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
k.nechit@mail.ru*

Холодилина Татьяна Николаевна, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник испытательного центра; доцент кафедры экологии и природопользования

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
xolodilina@rambler.ru*

Сизова Елена Анатольевна, д-р. биол. наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве; профессор научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии»

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
sizova.178@yandex.ru*

Шошин Даниил Евгеньевич, младший научный сотрудник отдела физиологии, биохимии и морфологии животных; ассистент научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии»

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
daniilshoshin@mail.ru*

Рязанцева Кристина Владимировна, канд. биол. наук, научный сотрудник отдела физиологии, биохимии и морфологии животных; научный сотрудник научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии» *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет*
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
reger94@bk.ru

Яушева Елена Владимировна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве; старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии» *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет*
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
vasilena56@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ksenia S. Nechitailo, PhD in Biology, Senior Researcher at the Department of Physiology, Biochemistry and Morphology of Animals; Senior Lecturer at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”
Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University
29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
k.nechit@mail.ru
SPIN-code: 1866-8918
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8755-414X>
Scopus Author ID: 57285761300

Tatiana N. Kholodilina, PhD in Agricultural Sciences, Leading Researcher at the Testing Center; Associate Professor of Ecology and Nature Management
Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University
29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
xolodilina@rambler.ru

SPIN-code: 2977-6059

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3946-8247>

Elena A. Sizova, PhD in Biology, Chief Researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Animal Husbandry; Professor at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

sizova.l78@yandex.ru

SPIN-code: 9819-1051

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Scopus Author ID: 55786730900

Daniil E. Shoshin, Junior Researcher at the Department of Physiology, Biochemistry and Morphology of Animals; Assistant at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

daniilshoshin@mail.ru

SPIN-code: 7444-9999

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

Scopus Author ID: 58827557300

Kristina V. Ryazantseva, PhD in Biology, Researcher at the Department of Physiology, Biochemistry and Morphology of Animals; Researcher at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

reger94@bk.ru

SPIN-code: 3867-7768

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5134-0396>

Scopus Author ID: 57928050900

Elena V. Yausheva, PhD in Biology, Senior Researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Animal Husbandry; Senior Researcher at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology” *Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University*
29, 9 Yanvaryia Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
vasilena56@mail.ru
SPIN-code: 3613-7524
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>
Scopus Author ID: 56541548600

Поступила 07.12.2025

После рецензирования 14.01.2026

Принята 22.01.2026

Received 07.12.2025

Revised 14.01.2026

Accepted 22.01.2026

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1406](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1406)EDN: [KZDLGO](https://www.edn.ru/KZDLGO)

УДК 636.083(075.8)



Оценка способов нейтрализации запахов животноводческих комплексов

Н.А. Зырянова, С.А. Пашаян, О.А. Столбова,
К.А. Сидорова, А.Б. Саткеева, О.А. Драгич

*Государственный аграрный университет Северного Зауралья,
Тюмень, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Проблема загрязнения окружающей среды запахами многогранна и актуальна для большинства регионов Российской Федерации. Это связано с постоянным развитием крупных предприятий, прежде всего в агропромышленном комплексе. Устранение неприятных запахов в животноводческих помещениях, на сегодня является одной из актуальных проблем, с точки зрения качества воздуха в условиях интенсивного животноводства. Снижение дискомфорта, вызываемого неприятными запахами, имеет важное значение для устойчивого животноводства. В этом исследовании критически рассматриваются современные методы снижения неприятных запахов в животноводческих помещениях. Анализируются научные достижения последнего десятилетия и выявляются потребности в исследованиях.

Цель исследования. Оценка способов нейтрализации запахов животноводческих помещений.

Научная новизна. Впервые на территории юга Тюменской области проведен сравнительный анализ использования биологических добавок в подстилке животных для снижения запахов.

Материалы и методы. Исследование было проведено на кафедрах морфологии, физиологии и общей патологии, а также незаразных болезней сельскохозяйственных животных и в условиях учебно-опытного хозяйства университета, в 2024-2025 годах, при применении лабораторных (3 группы по 15 мышей) и производственных экспериментов (3 группы по 5 коров черно-пестрой голштинизированной породы). Применяемые препараты (28 дней) с подстилкой: 1-й группе мышей – Biofermo, продукт (наша разработка); 2-й группе мышей - Bioforce; 3-й группе (контрольной) мышей – только подстилка (опил). Условия содержания мышей по ГОСТ 33215-

2014 «Методические указания по уходу и содержанию лабораторных животных». Анализируемые показатели микроклимата: относительная влажность, температура воздуха, содержание углекислого газа и аммиака. Применяемые препараты: 1 группе коров – Biofermo, 2-я группе коров – Bioforce; 3-й группе (контрольной) коров – только подстилка. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха в животноводческом помещении проводилось в соответствии с общепринятыми методиками проведения работ на животноводческих объектах «Гигиена сельскохозяйственных животных и птиц» (2024). Экспериментальные животные были все здоровы.

Результаты. В последние годы было изучено множество стратегий предотвращения неприятных запахов и борьбы с ними. Можно добиться лишь частичного устранения неприятных запахов, уменьшить образование неприятного запаха, использовать методы сквозной очистки и улучшить рассеивание. Образование неприятного запаха можно уменьшить с помощью диетических манипуляций, добавок, низкоэмиссионного животноводства и систем удаления навоза. Результаты наших исследований показали, что при добавлении добавки Biofermo в подстилку первой группы лабораторных мышей температура воздуха в клетке была на 0,47% выше, чем в клетке контрольной группы, в клетке второй группы мышей, которым в подстилку добавляли Bioforce, на 1,8% выше, чем в контрольной группе мышей (21,2°C). Относительная влажность воздуха в клетке первой группы была в среднем на 6,6% ниже, в то время как в клетке второй группы она была на 3,8% ниже по сравнению с контрольной группой (50,1%). Аммиак не был обнаружен в воздухе первой и второй групп мышей, но в контрольной группе он был обнаружен на уровне 0,9 ppm. Углекислый газ в первой группе мышей был ниже на 0,099%, во второй группе ниже на 0,063%, к таковым данным контрольной группы. Полученные данные отражают эффективность применения добавки Biofermo в подстилку лабораторных мышей 1 экспериментальной группы

Производственные эксперименты в животноводческом комплексе образовательного учреждения показали, что средняя температура в первой группе была на 1,3% выше, чем во второй, что на 4,8% выше, чем в контрольной группе (22,7°C). Относительная влажность воздуха в указанных помещениях была в разных пределах, так, в первой группе на 6,0% ниже, во второй группе на 2,2% ниже, по сравнению с контрольной группой (65,7%). Концентрация углекислого газа в воздухе, соответственно, в первой группе на 10,2% ниже, во второй на 5,3% по сравнению с контролем (0,0781%). Количество аммиака в воздухе в местах нахождения подопытных животных в первой группе было на 66,6% ниже, чем в контрольной, и на 47,6% ниже во второй группе.

Заключение. Санитарно-гигиенические проблемы, связанные с содержанием животных, можно уменьшить, обработав подстилку препаратами, содержащи-

ми микроорганизмы, разлагающие отходы. Можно отметить, что при добавлении Biofermo в подстилку для животных в животноводческих помещениях уровень аммиака в воздухе снижается на 66,6%, а при добавлении Bioforce - на 47,6%. Этот результат еще раз доказывает эффективность этих добавок в снижении агрессивности окружающей среды, включая уровень загазованности и относительную влажность, в помещениях, где содержатся животные.

Ключевые слова: животноводческие помещения; загрязнение атмосферного воздуха; источники загрязнения; биологически активные добавки; контроль запахов; мероприятия

Для цитирования. Зырянова, Н. А., Пашаян, С. А., Столбова, О. А., Сидорова, К. А., Саткеева, А. Б., & Драгич, О. А. (2026). Оценка способов нейтрализации запахов животноводческих комплексов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 103–133. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1406>

Methods of neutralization of atmospheric air odors by animal waste substances

N.A. Zyryanova, S.A. Pashayan, O.A. Stolbova,
K.A. Sidorova, A.B. Satkeeva, O.A. Dragich

*State Agrarian University of the Northern Trans-Urals,
Tyumen, Russian Federation*

Abstract

Background. The problem of environmental pollution by odors is multifaceted and relevant for most regions of the Russian Federation. This is due to the constant development of large enterprises, primarily in the agro-industrial complex. The elimination of unpleasant odors in livestock facilities is currently one of the most pressing problems in terms of air quality in conditions of intensive animal husbandry. Reducing the discomfort caused by unpleasant odors is essential for sustainable animal husbandry. This study critically examines modern methods of reducing unpleasant odors in livestock facilities. The scientific achievements of the last decade are analyzed and the research needs are identified.

Purpose. Evaluation of ways to neutralize odors in livestock premises.

Scientific novelty. For the first time in the south of the Tyumen region, a comparative analysis of the use of biological additives in animal litter to reduce odors has been conducted.

Materials and methods. The study was conducted at the Departments of Morphology, Physiology and General Pathology, as well as non-communicable diseases of farm animals and in the conditions of the university's experimental farm in 2024-2025, using

laboratory and industrial experiments. Laboratory experiments were conducted on 45 laboratory white mice of the same age and weight. The animals were monitored before the experiments. They were physiologically healthy and were in the same conditions of detention. Three groups of 15 mice were formed. The following were added to the litter (sawdust): group 1 of mice – Biofermo, a product that we developed for animals; group 2 of mice - Bioforce; group 3 (control) of mice - we did not add any products to the litter. The bedding for animals of all groups was changed every 7 days. The duration was 28 days. The conditions of keeping mice corresponded to GOST 33215-2014 “Guidelines for the care and maintenance of laboratory animals”. During the work in the cells, relative humidity, air temperature, carbon dioxide and ammonia levels were measured daily. The results were recorded. In the production conditions of the experimental farm, the work was carried out in the livestock building. Before starting the experiment, 15 cows were selected and divided into three groups of 5 cows each. The animals were kept in the same conditions and were physiologically healthy. The following was added to the litter (sawdust): group 1 of cows – Biofermo preparation, group 2 of cows – Bioforce preparation; group 3 of cows - the drug was not added to the litter. The measurements were carried out in three zones: lying; standing; working. The determination of the level of atmospheric air pollution at the livestock facility was carried out in accordance with the generally accepted methods of work at livestock facilities “Hygiene of farm animals and birds” (2024).

Results. In recent years, many strategies have been explored to prevent and control unpleasant odors. It is possible to achieve only partial elimination of unpleasant odors, reduce the formation of unpleasant odors, use end-to-end cleaning methods and improve dispersion. The formation of an unpleasant odor can be reduced through dietary manipulation, additives, low-emission animal husbandry and manure removal systems. The results of our research showed that when Biofermo was added to the litter of the first group of laboratory mice, the air temperature in the cage was 0.47% higher than in the control group, and in the cage of the second group of mice, which received Bioforce, 1.8% higher than in the control group (21.2°C). The relative humidity in the cage of the first group was on average 6.6% lower, while in the cage of the second group it was 3.8% lower compared to the control group (50.1%). Ammonia was not detected in the air of the first and second groups of mice, but in the control group it was detected at 0.9 ppm. Carbon dioxide in the first group of mice was lower by 0.099%, in the second group it was lower by 0.063%, compared to those in the control group. The data obtained reflect the effectiveness of using the Biofermo additive in the litter of laboratory mice of the 1st experimental group

Production experiments in the livestock complex of the educational institution showed that the average temperature in the first group was 1.3% higher than in the second, which is 4.8% higher than in the control group (22.7°C). The relative humidity in

these rooms was within different limits, so in the first group it was 6.0% lower, in the second group it was 2.2% lower, compared with the control group (65.7%). The concentration of carbon dioxide in the air, respectively, in the first group is 10.2% lower, in the second by 5.3% compared with the control (0.0781%). The amount of ammonia in the air at the locations of the experimental animals in the first group was 66.6% lower than in the control group, and 47.6% lower in the second group.

Conclusion. Sanitary and hygienic problems associated with animal husbandry can be reduced by treating the litter with preparations containing microorganisms that decompose waste. It can be noted that when Biofermo is added to animal litter in livestock buildings, the level of ammonia in the air decreases by 66.6%, and when Bioforce is added, it decreases by 47.6%. This result once again proves the effectiveness of these additives in reducing environmental aggressiveness, including the level of gas pollution and relative humidity, in rooms where animals are kept.

Keywords: livestock facilities; atmospheric air pollution; pollution sources; biologically active additives; odor control; measures

For citation. Zyryanova, N. A., Pashayan, S. A., Stolbova, O. A., Sidorova, K. A., Satkeeva, A. B., & Dragich, O. A. (2026). Methods of neutralization of atmospheric air odors by animal waste substances. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 103–133. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1406>

Введение

В научной статье рассматривается актуальная проблема негативного воздействия запахов от предприятий агропромышленного комплекса на окружающую среду, анализируются источники и последствия этого явления. Контроль запахового загрязнения воздуха является сложной задачей. Это связано с субъективностью восприятия запахов, сложностью химического состава, локальностью проблемы, многообразием источников загрязнения. Запахи могут меняться в зависимости от множества факторов, включая температуру, влажность, атмосферное давление и скорость ветра. Запиховое загрязнение способно нарушать нормальную жизнедеятельность людей, вызывать головную боль, бессонницу, тошноту, заболевания сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения и печени. Разработка и внедрение эффективных систем контроля и защиты атмосферного воздуха от запахового загрязнения является актуальным на территории Российской Федерации. Подобные вопросы находятся в разработке до настоящего времени. Разработка четких нормативов позволит предприятиям соблюдать современные тренды экологической повестки (экоответственность бизнеса, безопасная и экономически выгодная утилизация отходов). Описаны регионы – лиде-

ры в области запахового загрязнения. Проанализирован заграничный опыт регулирования и нормирования запахового загрязнения, технологические и организационно - правовые решения по снижению и нормированию запахового загрязнения на население. По результатам исследования в статье предложены рекомендации для достижения максимальной экологичности и эффективности деятельности предприятий агропромышленного комплекса Российской Федерации. Авторский взгляд будет интересен специалистам в области экологии и сельского хозяйства. Данная проблема изучена мало и требует дальнейшего изучения.

Проблема запаховых загрязнений многогранна и актуальна для большей части регионов РФ. Это связано с полноценным развитием крупных предприятий, преимущественно агропромышленного комплекса, в частности занятых в сфере птицеводства и животноводства в целом. Запахи, возникающие в животноводческих помещениях, представляют собой одну из самых актуальных проблем качества воздуха в условиях интенсивного животноводства. Снижение случаев дискомфорта, связанных с воздействием запахов, является необходимым для устойчивого производства животноводческой продукции. В данном исследовании критически рассматриваются современные методы снижения запахов в животноводческих помещениях. Анализируются научные достижения за последнее десятилетие, а также определяются потребности в исследованиях. Сначала рассматривается и изучается сложная природа запахов от животных. Затем анализируются наиболее актуальные стратегии контроля запахов с точки зрения текущих знаний и будущих потребностей [1; 15].

Для возможности снижения запахов в животноводческих помещениях рассматриваются следующие мероприятия, включающие в себя стратегии с соблюдением диеты для животных, добавки к навозу, проектирование зданий, фильтрацию воздуха, покрытия для навоза, системы обработки навоза и защитные полосы от возможных порывов ветра и снежных заносов. Наконец, определяются будущие потребности в исследованиях и приоритеты при разработке и апробации снижения запахов. Несмотря на определенные достижения, существуют различного рода проблемы для ученых, производителей и регуляторов, в основном связанные с полевыми оценками запахов. Поэтому для эффективного контроля запахов от животноводческих помещений потребуется использование стандартизированных методов полевой оценки. Также анализ ошибок измерений и моделей может быть полезным для лучшего понимания ограничений текущих методов, и кроме того, для определения приоритетов в исследованиях. Об-

разование запаха является одной из наиболее важных проблем качества воздуха в закрытых животноводческих хозяйствах. Хотя регулярное воздействие запаха традиционно считалось только проблемой неудобства, однако в настоящий период времени установлено, что происходит ухудшение здоровья через прямое раздражение рецепторов или психопатологические механизмы. По этой причине в последние годы активизировалось проведение исследований по оценке и контролю запахов, выделяемых из животноводческих помещений. Кроме того, развивается тенденция к установлению более строгих правил для улучшения качества воздуха в прилегающих к животноводческим помещениям территориях [7; 16; 23].

Неприятные запахи представляют собой особую проблему сложной природы по сравнению с другими вопросами качества воздуха. Оценка запахов обусловлена субъективным характером неприятностей и внутренней изменчивостью процессов выделения и рассеивания запахов. Борьба с запахом от животноводческих ферм усиливается, поскольку возрастает число крупных животноводческих хозяйств, в особенности свиноводческих, где увеличена концентрация животных на небольших территориях. Многие крупные хозяйства хранят навоз в течение длительного времени в анаэробных условиях в открытых навозохранилищах или лагунах. Шлейф запаха, движущийся от таких хозяйств, обладает способностью оставаться примерно той же ширины, как его источник, и рассеиваться вверх.

Таким образом, сочетание крупных источников запаха и способностью его распространения по ветру увеличивает вероятность того, что запахи могут повлиять на жилые здания, помещения и другие объекты. Поверхностное внесение навоза может привести к очень широкому шлейфу запаха. Жидкий навоз имеет более высокую концентрацию пахучих соединений, сухой же навоз выделяет меньше запахов [3; 6].

Усиление запаха чаще всего происходит при высокой влажности, неподвижности воздуха, а также при наличии ветра, переносящего запахи в сторону населенных пунктов. При неподвижности воздуха, запахи способны стекать по склонам так же, как вода. Поверхностное внесение относительно свежего навоза или навозной жижи в почву, способно распространять сильный запах. На запахи, исходящие от откормочных площадок, навозохранилищ и маломерных лагун, могут поступать жалобы от людей, живущих поблизости от животноводческих ферм. По этой причине выбор места и контроль большой площади земли вокруг крупных животноводческих хозяйств для минимизации непосредственной близости соседей с подветренной стороны имеют первостепенное значение. Непри-

ятный запах в большей степени распространяется чаще от свиноводческих хозяйств и реже от птицеводческих.

На ранних стадиях планирования таких объектов, специалисты должны проверить соблюдение правил на предмет требуемых расстояний размещения для животноводческих предприятий различных размеров. В «Требованиях к генеральному плану и территории животноводческих предприятий» говорится, что санитарные разрывы от закрытых навозохранилищ до населенных пунктов следует принимать не менее половины расстояния от открытых навозохранилищ [2; 4].

Многие неприятные запахи, получаемые от деятельности промышленного животноводства, являются результатом летучих соединений, образующихся при разложении навоза, мочи и подстилки. В таких условиях, по данным ряда исследований, было выявлено более 200 (двухсот) соединений. Однако, есть существенные преграды по контролю данных запахов, в связи с широким спектром пахучих соединений.

Самыми встречаемыми элементами пахучих соединений от навоза и сточных вод, является сера (сероводород и меркаптаны), азот (аммиак и амины), фенолы, спирты и летучие органические кислоты. Контроль и соблюдение нормативных данных по содержанию аммиака не простая задача для птицеводов и молочных хозяйств, также и по содержанию концентрации сероводорода, например, для производителей свинины.

Результаты исследователей показывают, что перенос запахов также связан с частицами пыли или аэрозолями, поэтому оценка выбросов пыли или аэрозолей способствует контролю запахов [7; 17; 21].

Большинство из пахучих соединений являются результатом биологических реакций, происходящих в основном в анаэробной среде: аммиак (NH_3) (17,0306 г/моль) легче воздуха (29 г/моль), образуется в результате анаэробной и аэробной активности, вызывает раздражение глаз и носа, при высоких концентрациях может привести к удушью.

Сероводород (H_2S), имеет запах тухлых яиц, тяжелее воздуха (34,082 г/моль), низкий порог запаха, растворим в воде, оказывая токсическое влияние, вызывает головную боль, головокружение, тошноту, потерю сознания, даже смерть. Метан (CH_4) без запаха, легче воздуха (16,04 г/моль), продукт анаэробной деятельности, вызывает головную боль, удушье, взрывоопасно в 5-15-процентной смеси с воздухом.

Углекислый газ (CO_2), не имеет запаха, тяжелее воздуха (44,009 г/моль), вызывает сонливость, головную боль, может быть причиной удушья.

Летучие органические кислоты имеют высокий потенциал запаха в анаэробных условиях и низкий потенциал запаха в аэробных условиях.

Фенольные соединения имеют сильный запах, у крезола порог запаха ниже, чем у сероводорода, он присутствует у сырого навоза, а его концентрации увеличиваются в анаэробных условиях [5; 10; 22].

Многие пахучие соединения (рис. 1), обычно встречающиеся в свежем навозе, становятся более концентрированными в процессе анаэробного разложения.

Повышенная концентрация пахучих соединений в складированном навозе подтверждает то, что более неприятные запахи связаны с хранящимся навозом, а не с навозом, который разбрасывается ежедневно [8; 9].

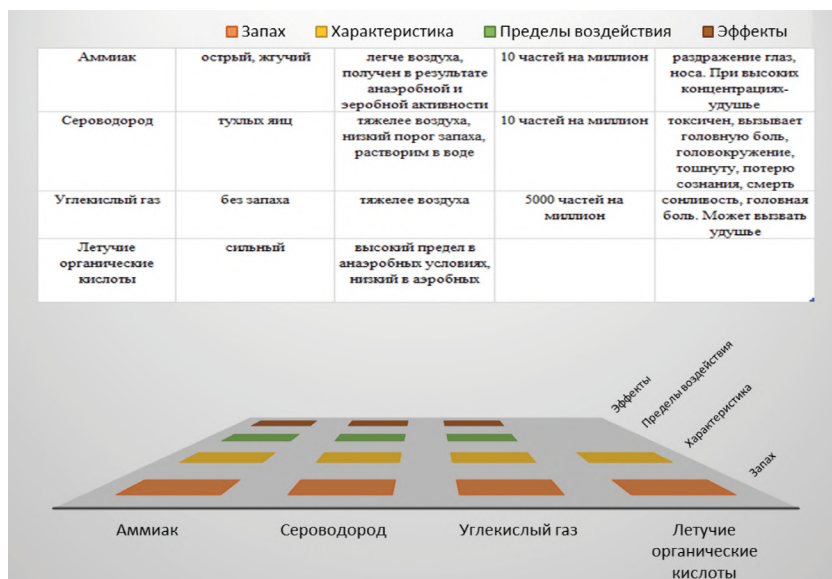


Рис. 1. Характеристика пахучих соединений
Fig. 1. Characteristics of aromatic compounds

Перемешивание жидкого навоза в хранилищах во время перекачивания рекомендуется для предотвращения накопления твердых веществ и повышения ценности питательных веществ, вносимых в землю. Однако перемешивание ям под зданиями, занятыми животными или людьми, может быть опасным из-за выделения газов, которые либо токсичны, либо способны вытеснять кислород в помещениях.

Наибольшую опасность представляют сероводород (H_2S), аммиак (NH_3), углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4). Сероводород является наибо-

лее токсичным из этих газов. Как и углекислый газ, он тяжелее воздуха и может вытеснять кислород в помещении. Метан взрывоопасен в смесях от 5 до 15 процентов. Чтобы предотвратить отравления газами, во время перемешивания ям в здании не должны находиться люди и животные [3; 15].

Из-за риска воздействия вредных газов, нужно избегать попадания в навозную яму. Углекислый газ и сероводород имеют тенденцию скапливаться над жидкостью в яме и могут ее заполнить.

Таким образом, измерение уровня запахов, разработка моделей их распространения и оценка стратегий их снижения были традиционно сложными задачами для фермеров и исследователей. До сих пор было проведено достаточно исследований в отношении измерений запахов и применения моделей распространения запахов и их распространения [3; 19].

Кроме того, было охарактеризовано и рекомендовано большое количество методов снижения запахов. Однако имеющиеся знания все еще ограничены для окончательного решения проблем устранения запахов в животноводческих помещениях.

Следовательно, исследования по оценке способов устранения запахов в животноводческих помещениях и окружающей среде являются актуальными.

Цель исследования – оценка способов нейтрализации запахов животноводческих помещений.

Научная новизна. Впервые на территории юга Тюменской области проведен сравнительный анализ использования биологических добавок в подстилке животных для снижения запахов.

Материалы и методы

Работа была выполнена на кафедрах морфологии, физиологии и общей патологии, незаразных болезней сельскохозяйственных животных и в условиях учебного опытного хозяйства ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья» в 2024-2025 гг.

Исследования состояли из лабораторных и производственных опытов. Лабораторные эксперименты проводились на 45 лабораторных беспородных белых мышах одинакового возраста и веса. До начала работы животных наблюдали и проводили диагностический осмотр. После того как убедились, что мыши здоровы и находятся в одинаковом состоянии, их сгруппировали на три группы по 15 животных, и размещали в трех отдельных одинаковых клетках. Применили следующие добавки в подстилку (опил): 1 группа мышей – препарат, культивированный нами Biofermo, для животных; 2 группа мышей – препарат Bioforce; 3 группа мышей – в

подстилку препараты не добавляли, эта была контрольной группа. У всех групп животных подстилку меняли через 7 дней. Эксперименты повторяли 4-хкратно.

Продолжительность работы составляла 28 дней. Животных всех групп поили водой и кормили обычным кормом для лабораторных мышей. Условия содержания мышей соответствовали ГОСТ 33215-2014 «Методические указания по содержанию и уходу за лабораторными животными». В ходе проведенной работы в клетках ежедневно определяли относительную влажность, температуру воздуха, уровень углекислого газа и аммиака, полученные результаты записывали. Для определения температуры, относительной влажности, аммиака и углекислого газа в воздухе животноводческих помещений применяли газоанализаторы.

В производственных условиях учебного хозяйства работу проводили в животноводческом помещении, где до начала эксперимента были отобраны 15 коров, которые были разделены на три группы, по 5 коров в каждой.

Животные находились в одинаковых условиях содержания, были физиологически здоровы. Применили следующие добавки в подстилку (рис. 2):

1 группа коров – в подстилку (опил) добавляли культивированный нами препарат – Biofermo (рис. 2а);

2 группа коров – в подстилку (опил) добавляли препарат – Bioforce (рис. 2б);

3 группа коров – контрольная, в подстилку (опил) препараты не добавляли, (рис. 2в).



Рис. 2. Исследуемые добавки, применяемые в подстилку:
(а) - культивированная добавка Biofermo, (б) - Bioforce, (в) - опил

Fig. 2. Test additives used in bedding: (a) Biofermo cultured additive, (b) Bioforce, (c) sawdust

Замеры в животноводческом помещении проводили в трех зонах нахождения животных: лежания; стояния; рабочей.

Работы по определению уровня загрязнённости атмосферного воздуха в животноводческом помещении выполнили, согласно общепринятым методам работ в животноводческих помещениях «Гигиена сельскохозяйственных животных и птиц» (2024) [14].

Для определения концентрации газов в воздухе животноводческого помещения, где находились экспериментальные животные, использовали приборы (рис. 3): для определения аммиака-газоанализатор «Мегеон» 08085 (рис. 3а), углекислого газа – «Мегеон» 08082 (рис. 3б). Температуру и относительную влажность определяли с помощью прибора Термогигрометр «Мегеон» 20062 (рис. 3в).

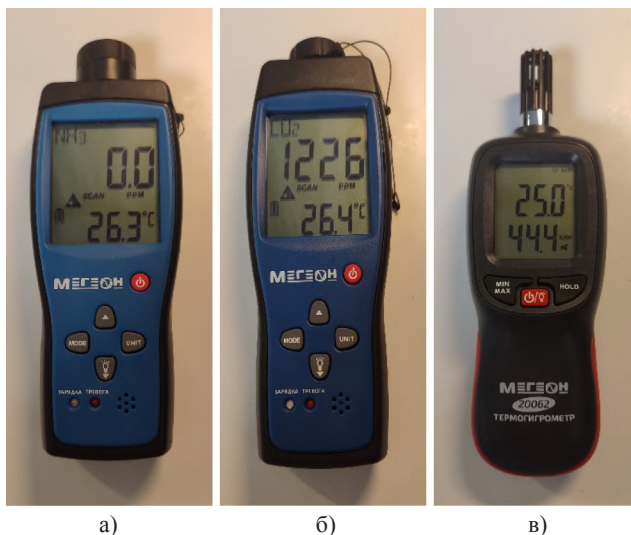


Рис. 3. Приборы для измерения показателей микроклимата: газоанализатор для определения аммиака (а), газоанализатор для определения углекислого газа (б), термогигрометр (в)

Fig. 3. Instruments for measuring microclimate parameters: gas analyzer for measuring ammonia (a), gas analyzer for measuring carbon dioxide (b), thermohygrometer (c)

Результаты исследования

В последние годы было рассмотрено и предложено множество стратегий предотвращения и контроля запахов, однако для каждой стратегии контроля запахов необходимо учитывать затраты и желаемый уровень смягчения, а также применимость к общему управлению фермой. Кроме того, следует признать, что можно добиться лишь частичного снижения запахов. Суще-

ствуется три основных способа минимизации распространения запахов от животноводческих помещений: снижение образования запахов, использование эффективных методов очистки в конце трубы и улучшение рассеивания.

Образование запахов можно уменьшить с помощью диетической манипуляции, добавок, содержания скота с низким уровнем выбросов и систем управления навозом. Однако эффективность этих стратегий может различаться для разных видов животных. Методы очистки в конце трубы, такие как очистка воздуха и покрытия для навоза, оказались очень эффективными для снижения выделения запахов. Также можно способствовать рассеиванию запахов на территории фермы, чтобы снизить потенциальную опасность в чувствительных зонах.

Системы содержания и управления животными влияют на выделение запахов. Однако, в отличие от, в настоящее время четко определенных, систем содержания «с низким уровнем выбросов аммиака», трудно выделить системы содержания «с низким уровнем выбросов запахов». Причиной этого является большая изменчивость внутри систем содержания.

Как правило, системы содержания с низким уровнем выбросов аммиака также уменьшают образование запаха, но эта связь не всегда прямая, так в качестве примера в животноводческом помещении было продемонстрировано, что уменьшение поверхностного контакта между навозной жижей и воздухом эффективно для снижения не только выбросов аммиака, но и запаха до 50%. Эти системы включают частично решетчатые полы, треугольные желоба и частое удаление навозной жижи путем промывки. Общеизвестно, что пахучие соединения в основном образуются, когда отходы жизнедеятельности животных подвергаются анаэробным условиям [14].

Поэтому снижение содержания влаги в навозе эффективно способствует снижению образования запаха. Этого можно достичь, используя подстилочные материалы с надлежащими компонентами. В отличие от выбросов аммиака, специальных исследований, касающихся влияния подстилочного материала на образование запаха, недостаточно, и были получены противоречивые результаты для свиноводческих и скотоводческих ферм. Для кур-несушек эти системы, включающие частое удаление, сушку или смешивание с подстилкой, включали соответствующее снижение запаха по сравнению с обычным, долгосрочным хранением навоза. У бройлеров, к примеру, правильная регулировка поилок и охлаждающих туманообразователей эффективна для контроля влажности подстилки. Установление правильных потоков вентиляции также может способствовать устранению избытка воды и уменьшению образования запаха [11-13].

Третий способ – это добавки к навозу являются потенциально эффективными инструментами для сокращения выбросов в атмосферу от животноводческих помещений, в частности запахов и аммиака. Чтобы быть эффективными, эти добавки должны быть безопасными для окружающей среды, недорогими и простыми в применении. Эти свойства ценятся фермерами, но в некоторых случаях коммерческая конфиденциальность может включать отсутствие стандартных независимых испытаний. Нами был рассмотрен вопрос использования добавок к навозу в отношении аммиака и уменьшения запаха. Краткосрочный контроль запаха может быть достигнут с помощью маскирующих, дезинфицирующих и окисляющих агентов, поэтому для поддержания приемлемого уменьшения запаха требуется частое повторное использование добавок. Существует классификация добавок к навозу по пяти категориям: микробные, химические, дезинфицирующие, маскирующие и адсорбенты. Отходы животноводства представляют собой динамическую среду, в которой происходят аэробные и анаэробные микробные реакции. В результате этих реакций образуются ЛЖК (летучие жирные кислоты), большинство из которых являются неприятными пахучими веществами. Поэтому добавки к навозу, соответствующие первым трем вышеупомянутым категориям, направлены на ингибирование некоторых микробных процессов. Антимикробные растительные масла могут играть роль в ингибировании запахов. Однако не было зафиксировано существенного эффекта от использования добавки к навозу на основе экстракта Юкки Шидигера, и аналогичные результаты были получены при использовании других добавок. Также исследователями отмечено, что маскирующие агенты (эфирные масла) и адсорбенты (цеолиты) имеют ограниченный потенциал снижения запаха [20].

Но в настоящее время эти добавки имеют высокую цену, приобрести эти вещества и выполнять нейтрализацию запахов в животноводческих помещениях представляется очень затратной и порой не возможной работой. Поэтому нами была разработана добавка, которая в значительной степени дешевле чем предлагаемые препараты. Научно-исследовательские работы по определению нейтрализации веществ в воздухе животноводческих помещений выполнялись в два этапа. Первый этап проводили в лабораторных условиях на лабораторных животных. Содержание животных в помещениях на полу с использованием подстилки стало наиболее распространенной практикой в животноводстве как в мире, так и в России. Правильный выбор материала для подстилки важен, но не менее значим уход за ней в процессе содержания животных. По мере нахождения жи-

вотных в помещении увеличивается количество отходов и влажность подстилки, что способствует росту микроорганизмов и выделению вредных газов, в частности аммиака. Известно, что высокие концентрации аммиака и продолжительное воздействие на животных и обслуживающий персонал оказывают негативное влияние на здоровье, вызывая раздражение слизистых оболочек трахеи и глаз. В научной литературе утверждается, что санитарно-гигиенические проблемы, связанные с содержанием животных, можно снизить путем обработки подстилки препаратами, содержащими микроорганизмы, разрушающие отходы [9; 18]. Результаты внесения добавок в подстилку (рис. 4).

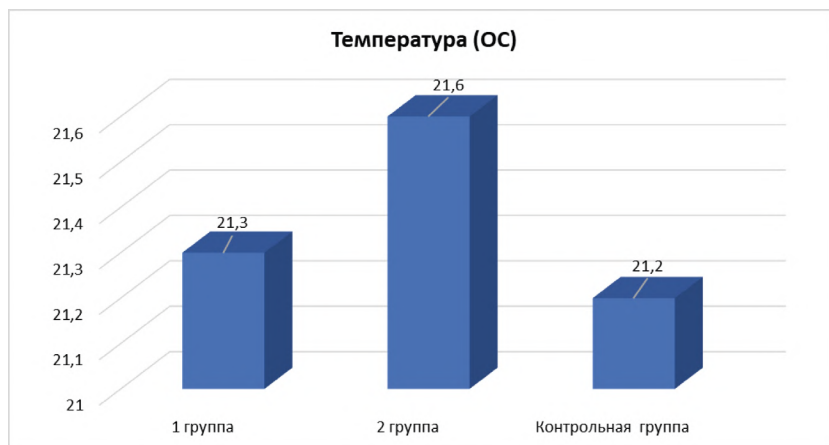


Рис. 4. Показатели температуры воздуха в клетках мышей, °C.

Fig. 4. Air temperature readings in the mouse cages, °C.

Полученные результаты показывают, что при внесении добавки Biofermo в подстилку лабораторных мышей первой группы температура воздуха в клетке этих животных составила 21,3°C, в клетке мышей второй группы, в подстилке которых добавили Bioforce, температура воздуха составила 21,6 °C, у контрольной группы мышей указанные показатели воздуха составили - 21,2 °C (рис. 4).

Относительная влажность в клетке первой группы в среднем была 43,5%, у второй – 46,3%, у третьей контрольной группе -50,1% (рис. 5).

Аммиак, в единицах измерения ppm, в воздухе клетках мышей первой и второй групп не обнаруживался, у контрольной группы уровень этого вещества составил - 0,9 ppm (рис. 6).



Рис. 5. Показатели относительной влажности воздуха в клетках мышей, %

Fig. 5. Relative humidity levels in mouse cages, %

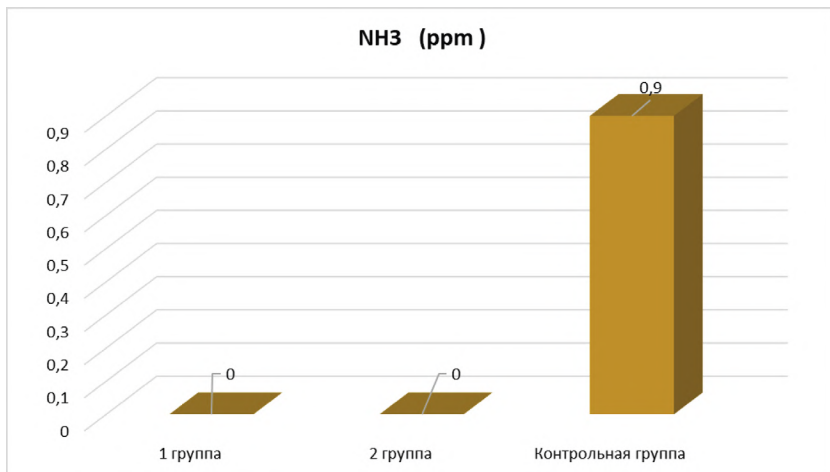


Рис. 6. Уровень аммиака в воздухе клеток, (ppm)

Fig. 6. Ammonia concentration in the air inside the cells (ppm)

Показатель углекислого газа в воздухе в первой группе мышей средним был 0,0861%, второй группы – 0,1219 %, контрольной - 0,1850% (рис. 7).

Проведя замеры параметров микроклимата у лабораторных мышей, можно отметить, в целом положительную динамику.

Отметим, что при внесении добавки Biofermo в подстилку лабораторных мышей первой группы температура воздуха в клетке этих животных составила 21,3 °С, к контролю выше на 0,47%, в клетке мышей второй группы, в подстилке которых добавили Bioforce, температура воздуха составила 21,6 °С к контролю выше на 1,8%, у контрольной группы мышей указанные показатели воздуха составили - 21,2 °С.

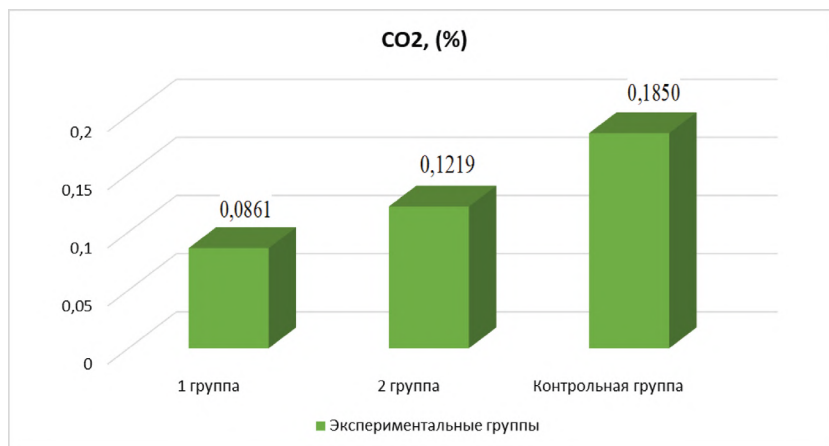


Рис. 7. Процент углекислого газа в воздухе клеток лабораторных мышей

Fig. 7. Percentage of carbon dioxide in the air inside the cages of laboratory mice

Также при исследовании относительной влажности, выявили следующее. Относительная влажность в клетке первой группы в среднем была 43,5% к контролю ниже на 6,6%, у второй –46,3% к контролю ниже на 3,8%, у третьей контрольной группе -50,1%.

Аммиак, в единицах измерения ppm, в воздухе клетках мышей первой и второй групп не обнаруживался, у контрольной группы уровень этого вещества составил - 0,9 ppm.

Показатель углекислого газа в воздухе в первой группе мышей в среднем был 0,0861%, к контролю ниже на 0,099%, у второй группы –0,1219%, к контролю ниже на 0,063%, в контрольной - 0,1850%. Полученные данные отражают эффективность применения добавки Biofermo в подстилку лабораторных мышей 1 экспериментальной группы.

Результаты производственного опыта в производственных условиях, в частности в животноводческом помещении показали следующие результаты. Так во 2-й базе животноводческого помещения (28 дней), было вы-

явлено, что температура воздуха в помещении у 1-й группы, в среднем составила 23°C, у 2-й группы 23,8°C, у 3-й 22,7°C (рис. 8).

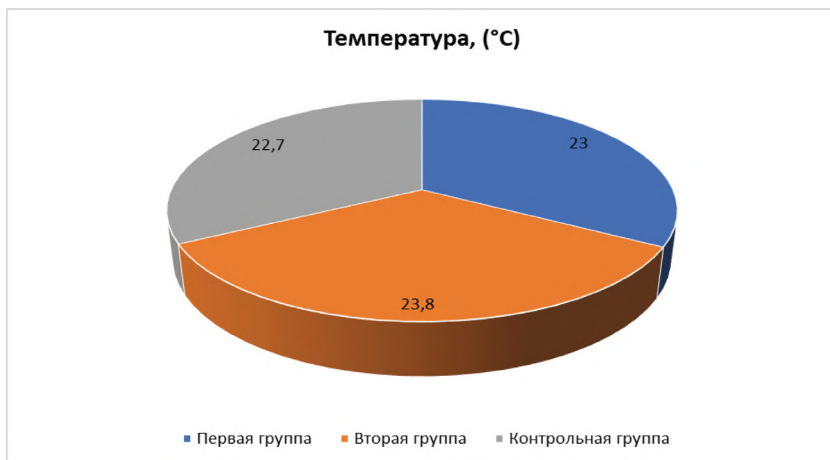


Рис. 8. Температура воздуха в помещении экспериментальных животных, °C
Fig. 8. Room air temperature for the experimental animals, °C

Относительная влажность в указанных площадках находилась в разных пределах, так, у первой группы в среднем составила 59,7%, у второй группы 63,5%, у третьей – контрольной группы 65,7% (рис. 9).

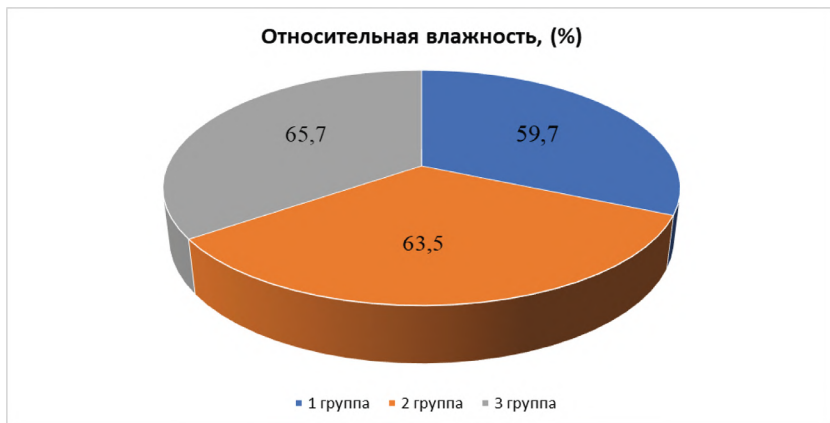


Рис. 9. Относительная влажность воздуха в зоне экспериментальных животных, %
Fig. 9. Relative humidity in the experimental animals' enclosure, %

Концентрация углекислого газа в воздухе соответственно составила: у 1-й группы 0,0701%, у 2-й – 0,0739 %, у контрольной – 0,0781%. К контролю, уровень углекислого газа у 1-й группы был ниже на 0,0080%, у 2-й – на 0,0042% (рис. 10).

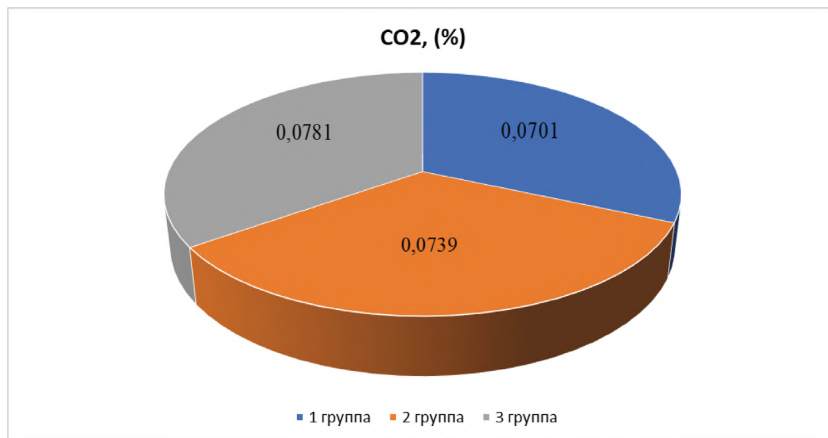


Рис. 10. Уровень углекислого газа в воздухе исследуемых животных (%).

Fig. 10. Carbon dioxide levels in the air of the study animals (%).

Уровень аммиака в зоне экспериментальных животных показан на рис. 11.

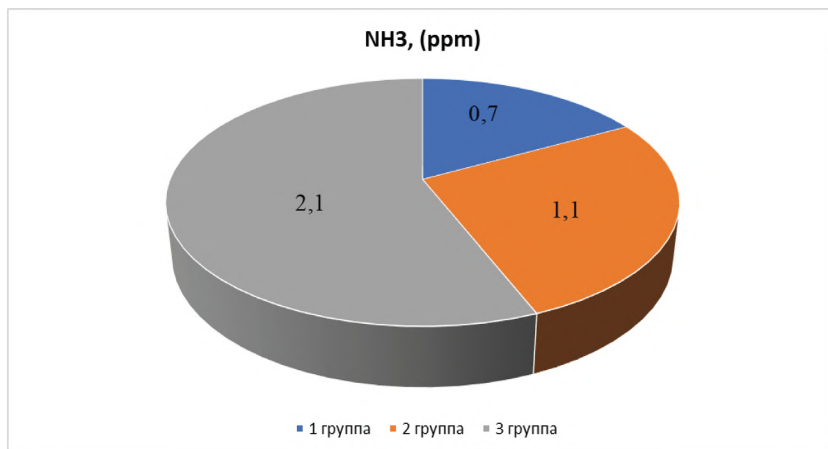


Рис. 11. Уровень аммиака в воздухе помещения экспериментальных животных, (ppm)

Fig. 11. Ammonia levels in the air of the experimental animals' enclosure (ppm)

Количество аммиака в воздухе в трех площадках, где находились экспериментальные животные было в следующих пределах, так, у первой группы 0,7 ppm, у второй 1,1 ppm, у контрольной 2,1 ppm.

Уровень аммиака в воздухе у первой группы был на 66,6% ниже, чем у контрольной, у второй – на 47,6% к контролю.

Таким образом можно отметить, что при добавлении препарата Biofermo в подстилку животных в животноводческих помещениях, в воздухе снижается уровень аммиака на 66,6%, а при применении добавки Bioforce на 47,6%.

Исследования в животноводческом помещении проведены в условиях базы №2 (рис. 12).



Рис. 12. Размещение экспериментальных животных (дойных коров) в условиях животноводческого предприятия

Fig. 12. Housing of experimental animals (dairy cows) at a livestock farm

Первая (опытная) группа (рис. 13а), вторая (опытная) группа (рис. 13б), третья (контрольная) (рис. 13в) группа животных были размещены в одном ряду типового коровника, в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями.

Система навозоудаления шнековая.

Уборка навоза проходила не реже одного раза в сутки.

Смена подстилки проводилась ежедневно. Для подстилки использовал опил из расчета 3-6 кг в сутки на одну дойную корову.

Уклон пола в стойле был в пределах 1,5%, согласно нормативов.

Стойла, в которых содержались экспериментальные животные, относились к типу коротких. Содержание привязное, в одном ряду по 50 голов. Размещение четырехрядное.

Моцион животным предоставлялся ежедневно в условиях кормо-выгульной площадки.



Рис. 13. Экспериментальные животные: первая группа (а), вторая группа (б), третья группа (в).

Fig. 13. Experimental animals: first group (a), second group (б), third group (в)

Обсуждение

В последние годы было изучено множество стратегий предотвращения неприятных запахов и борьбы с ними. Можно добиться лишь частично-го устранения неприятных запахов, уменьшить образование неприятного запаха, использовать методы сквозной очистки и улучшить рассеивание. Образование неприятного запаха можно уменьшить с помощью диетических манипуляций, добавок, низкоэмиссионного животноводства и систем удаления навоза.

Результаты наших исследований показали, что при добавлении добавки Biofermo в подстилку первой группы лабораторных мышей температура

воздуха в клетке была на 0,47% выше, чем в клетке второй группы мышей, которым в подстилку добавляли Bioforce, и на 1,8% выше, чем в контрольной группе мышей. мыши (21,2°C). Относительная влажность воздуха в клетке первой группы была в среднем на 6,6% ниже, в то время как в клетке второй группы она была на 3,8% ниже по сравнению с контрольной группой (50,1%). Аммиак не был обнаружен в воздухе первой и второй групп мышей, но в контрольной группе он был обнаружен на уровне 0,9 ppm. Показатель углекислого газа в воздухе в первой группе мышей в среднем был 0,0861%, к контролю ниже на 0,099%, второй группы – 0,1219%, к контролю ниже на 0,063%, в контрольной - 0,1850%. Полученные данные отражают эффективность применения добавки Biofermo в подстилку лабораторных мышей 1 экспериментальной группы.

Производственные эксперименты в животноводческом комплексе образовательного учреждения показали, что средняя температура в первой группе была на 1,3% выше, чем во второй, что на 4,8% выше, чем в контрольной группе (22,7°C). Относительная влажность воздуха в указанных помещениях была в разных пределах, так, в первой группе на 6,0% ниже, во второй группе на 2,2% ниже, по сравнению с контрольной группой (65,7%). Концентрация углекислого газа в воздухе, соответственно, в первой группе на 10,2% ниже, во второй на 5,3% по сравнению с контролем (0,0781%). Количество аммиака в воздухе в местах нахождения подопытных животных в первой группе было на 66,6% ниже, чем в контрольной, и на 47,6 % ниже во второй группе к контролю.

Санитарно-гигиенические проблемы, связанные с содержанием животных, можно уменьшить, обработав подстилку препаратами, содержащими микроорганизмы, разлагающие отходы.

Можно отметить, что при добавлении Biofermo в подстилку для животных в животноводческих помещениях уровень аммиака в воздухе снижается на 66,6%, а при добавлении Bioforce - на 47,6%.

Этот результат еще раз доказывает эффективность этих добавок в снижении агрессивности окружающей среды, включая уровень загазованности и относительную влажность, в помещениях, где содержатся животные.

Заключение

Санитарно-гигиенические проблемы, связанные с содержанием животных, можно снизить путем обработки подстилки препаратами, содержащими микроорганизмы, разрушающие отходы. Полученные результаты показали, что при смешивании добавки Biofermo в подстилку лаборатор-

ных мышей первой группы температура воздуха в клетке этих животных была на 0,47% выше, в клетке мышей второй группы, в подстилке которых добавили Bioforce, температура воздуха на 1,8%, к контрольной группе мышей (21,2 °C). Относительная влажность в клетке первой группы в среднем была ниже на 6,6%, у второй на 3,8% ниже, к контролю (50,1%). Аммиак в воздухе клетках мышей первой и второй групп не обнаруживался, в контрольной же группе уровень этого вещества составил - 0,9 ppm. Углекислый газ в первой группе мышей был ниже на 0,099%, во второй группе ниже на 0,063%, к таковым данным контрольной группы. Полученные данные отражают эффективность применения добавки Biofermo в подстилку лабораторных мышей 1 экспериментальной группы.

Производственные опыты в животноводческом помещении учебного хозяйства, показали, что температура воздуха в помещении, где находилась первая группа, в среднем была на 1,3% выше, где находилась вторая группа на 4,8% выше, чем в контрольной группе (22,7°C). Относительная влажность в указанных площадках находилась в разных пределах, так, у первой группы на 6,0% ниже, у второй группы 2,2% ниже, в сравнении с контрольной группой (65,7%). Концентрация углекислого газа в воздухе соответственно у первой группы на 10,2% ниже, у второй на 5,3% к контролю (0,0781%).

Количество аммиака в воздухе на площадках, где находились экспериментальные животные, у первой группы была на 66,6% ниже к контролю, у второй – на 47,6 %.

Таким образом можно отметить, что при добавлении препарата Biofermo в подстилку животных в животноводческих помещениях, в воздухе снижается уровень аммиака на 66,6%, а при применении добавки Bioforce на 47,6%. Полученный результат еще раз доказывает эффективность действия данных добавок по снижению агрессивных сред, в том числе загазованности, относительной влажности, в зоне размещения животных.

Заключение комитета по этике. Работа проводилась в лабораториях при кафедрах морфологии, физиологии и общей патологии, незаразных болезней сельскохозяйственных животных и в условиях учебного опытного хозяйства ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья».

Информация о конфликте интересов. У всех авторов статьи нет конфликта интересов.

Список литературы

1. Афанесян, М. К. (2011). Проблема регулирования трансграничных загрязнений в контексте современного состояния экономического развития мировых держав. *Terra Economicus*, 9(2-2), 213–216. EDN: <https://elibrary.ru/NXSQUJ>
2. Бочкарева, И. И., & Майманова, Е. А. (2019). Птицефабрика как источник загрязнения окружающей среды. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 4(2), 106–111. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-2-106-111>. EDN: <https://elibrary.ru/FGRMXJ>
3. Гладаренко, П. А., & Зырянова, Н. А. (2024). Гигиенические аспекты содержания овец. В *Стратегические ресурсы Тюменского АПК: люди, наука, технологии: Сборник LVII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* (с. 28–34). Государственный аграрный университет Северного Зауралья. EDN: <https://elibrary.ru/CBDJXS>
4. Госс, А. С., & Зырянова, Н. А. (2023). Влияние повышенных концентраций содержания аммиака в воздухе животноводческих помещений на организм крупного рогатого скота. В *Достижения молодежной науки для Агропромышленного комплекса: сборник LVI научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* (с. 14–18). Государственный аграрный университет Северного Зауралья.
5. Государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. (2021). Росприроднадзор. URL: https://uonvos.rpn.gov.ru/rpn/pto-uonvos/onv_registry (дата обращения: 29.10.2024).
6. Забокрицкий, А. Н., & Бочарова, А. А. (2024). Запаховые загрязнения на территории Тюмени и Тюменского района. В *Стратегические ресурсы Тюменского АПК: люди, наука, технологии* (с. 57–62). ГАУ Северного Зауралья. EDN: <https://elibrary.ru/QPJVSJ>
7. Зепалов, М. В., & Зепалов, С. М. (2011). Технология приготовления органоминерального удобрения на основе птичьего помета. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, (5), 84–90.
8. Зырянова, Н. А., & Селезенева, М. В. (2022). Влияние микотоксинов на физиологического состояние животных. В *Успехи молодежной науки агропромышленном комплексе: Сборник трудов LIX Студенческой научно-практической конференции* (с. 167–175). Государственный аграрный университет Северного Зауралья. EDN: <https://elibrary.ru/CNYVYA>
9. Кириллова, А. В., & Зырянова, Н. А. (2024). Взаимосвязь зоогигиенических условий содержания и заболеваемости конечностей у крупного рогатого скота. В *Стратегические ресурсы Тюменского АПК: люди, наука, технологии: Сборник LVII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* (с. 69–73). Государственный аграрный университет Северного Зауралья.

10. Крупнейшие птицефабрики России. (2019). Птицефабрики.ру. URL: <https://pticefabriki.ru/articles/krupnejshie-pticefabriki-rossii> (дата обращения: 29.10.2024).
11. Поголовье Боровской птицефабрики возросло до 1,6 млн птиц. (2022). Тюменская область сегодня. URL: <https://tumentoday.ru/2022/08/22/pogolove-borovskoj-pticefabriki-vozroslo-do-16-mln-ptic/> (дата обращения: 29.10.2024).
12. Производство. (2020). Птицефабрика Боровская. URL: <http://www.borfab.ru> (дата обращения: 29.10.2024).
13. Реестр жалоб, плановых и внеплановых проверок, их результатов и выданных предписаний. (2024). URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/main/public/aggregate-feedback.html> (дата обращения: 29.10.2024).
14. Садовов, Н. А., Дуктов, А. П., Бахарев, А. А., и др. (2024). *Гигиена сельскохозяйственных животных и птицы: учебник*. Тюмень. 412 с. EDN: <https://elibrary.ru/XSFBIG>
15. Сырчина, Н. В., Пилип, Л. В., & Ашихмина, Т. Я. (2022). Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*, (2), 26–34. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-2-026-034>. EDN: <https://elibrary.ru/QXKQXR>
16. Трофимова, Н. А. (2018). Любовь и запахи: репрезентация ольфакторности в романтическом дискурсе. *Вестник Московского Государственного Лингвистического университета. Гуманитарные науки*, 403–416. EDN: <https://elibrary.ru/VWRBNC>
17. Устинова, У. П., & Зырянова, Н. А. (2025). Гигиенические аспекты содержания свиней. В *Аграрная наука в контексте времени: Сборник трудов LX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* (с. 118–123). Государственный аграрный университет Северного Зауралья. EDN: <https://elibrary.ru/OTVBLQ>
18. Столбова, О. А., Зырянова, Н. А., Ряднов, А. А., и др. (2024). Физиологический статус крупного рогатого скота при пододерматитах. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, (114), 322–328. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-114-322-328>. EDN: <https://elibrary.ru/HQNLDB>
19. Чепегин, И. В., & Андрияшина, Т. В. (2025). Выбросы пахучих веществ в атмосферу. Проблемы и решения. *Вестник технологического университета*, (10), 80–83. URL: <https://naukaru12.ru/ru/nauka/article/60722/view> (дата обращения: 03.09.2026).
20. Kostarev, S. N., Sidorova, K. A., Ravilov, R. Kh., & Kochetova, O. V. (2019). Development of an automated system for integrated environmental monitoring of a municipal waste landfill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineer-*

- ing, 537, 62028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062028>. EDN: <https://elibrary.ru/HRHXLL>
21. Kostarev, S. N., Sereda, T. G., Sidorova, K. A., & Kochetova, O. V. (2019). Disinfecting of the leachate of solid waste landfills with the application of hydrobiological cleaning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 315, 52008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052008>. EDN: <https://elibrary.ru/GRXIJJ>
 22. Shvets, N. I., Sidorova, K. A., Yurina, T. A., & Matveeva, A. A. (2022). Ecological monitoring of soils in urban and rural areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1045(1), 012144. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012144>. EDN: <https://elibrary.ru/PDAUPH>
 23. Guadalupe-Fernandez, V., De Sario, M., & Vecchi, S. (2024). Industrial odour pollution and human health: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Health*. URL: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-021-00774-3#citeas> (дата обращения: 20.10.2024).

References

1. Afanasyan, M. K. (2011). The problem of regulating transboundary pollution in the context of the current state of economic development of world powers. *Terra Economicus*, 9(2-2), 213–216. EDN: <https://elibrary.ru/NXSQUJ>
2. Bochkareva, I. I., & Maimanova, E. A. (2019). Poultry farm as a source of environmental pollution. *Interexpo Geo-Siberia*, 4(2), 106–111. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-2-106-111>. EDN: <https://elibrary.ru/FGRMXJ>
3. Gladarenko, P. A., & Zyryanova, N. A. (2024). Hygienic aspects of sheep husbandry. In *Strategic resources of the Tyumen agro-industrial complex: people, science, technology: Proceedings of the LVII international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists* (pp. 28–34). State Agrarian University of the Northern Trans-Urals. EDN: <https://elibrary.ru/CBDJXS>
4. Goss, A. S., & Zyryanova, N. A. (2023). The effect of elevated ammonia concentrations in the air of livestock premises on the body of cattle. In *Achievements of young science for the agro-industrial complex: Proceedings of the LVI scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists* (pp. 14–18). State Agrarian University of the Northern Trans-Urals.
5. State register of objects having a negative impact on the environment. (2021). Rosprirodnadzor. URL: https://uonvos.rpn.gov.ru/rpn/pto-uonvos/onv_registry (accessed: 29.10.2024).
6. Zabokritsky, A. N., & Bocharova, A. A. (2024). Odor pollution in the territory of Tyumen and the Tyumen region. In *Strategic resources of the Tyumen agro-industrial complex: people, science, technology* (pp. 57–62). State Agrarian University of the Northern Trans-Urals. EDN: <https://elibrary.ru/QPJVSJ>

7. Zepalov, M. V., & Zepalov, S. M. (2011). Technology for preparing organomineral fertilizer based on poultry manure. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, (5), 84–90.
8. Zyryanova, N. A., & Selezeneva, M. V. (2022). The effect of mycotoxins on the physiological state of animals. In *Successes of young science in the agro-industrial complex: Proceedings of the LIX Student scientific and practical conference* (pp. 167–175). State Agrarian University of the Northern Trans-Urals. EDN: <https://elibrary.ru/CNYVYA>
9. Kirillova, A. V., & Zyryanova, N. A. (2024). The relationship between zoohygienic housing conditions and the incidence of limb diseases in cattle. In *Strategic resources of the Tyumen agro-industrial complex: people, science, technology: Proceedings of the LVII international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists* (pp. 69–73). State Agrarian University of the Northern Trans-Urals.
10. Largest poultry farms in Russia. (2019). Pticefabriki.ru. URL: <https://pticefabriki.ru/articles/krupnejshie-pticefabriki-rossii> (accessed: 29.10.2024).
11. The livestock of the Borovskaya poultry farm increased to 1.6 million birds. (2022). Tyumen Region Today. URL: <https://tumentoday.ru/2022/08/22/pogolove-borovskoj-pticefabriki-vozslo-do-16-mln-ptic/> (accessed: 29.10.2024).
12. Production. (2020). Borovskaya Poultry Farm. URL: <http://www.borfab.ru> (accessed: 29.10.2024).
13. Register of complaints, planned and unscheduled inspections, their results and issued orders. (2024). URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/main/public/aggregate-feedback.html> (accessed: 29.10.2024).
14. Sadowov, N. A., Duktov, A. P., Bakharev, A. A., et al. (2024). *Hygiene of farm animals and poultry: textbook*. Tyumen. 412 pp. EDN: <https://elibrary.ru/XSFBIG>
15. Sychina, N. V., Pilip, L. V., & Ashikhmina, T. Ya. (2022). Control of odor pollution of atmospheric air (review). *Theoretical and Applied Ecology*, (2), 26–34. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-2-026-034>. EDN: <https://elibrary.ru/QXKOXR>
16. Trofimova, N. A. (2018). Love and smells: representation of olfaction in romantic discourse. *Bulletin of the Moscow State Linguistic University. Humanities*, 403–416. EDN: <https://elibrary.ru/VWRBNC>
17. Ustinova, U. P., & Zyryanova, N. A. (2025). Hygienic aspects of pig husbandry. In *Agrarian science in the context of time: Proceedings of the LX international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists* (pp. 118–123). State Agrarian University of the Northern Trans-Urals. EDN: <https://elibrary.ru/OTVBLQ>
18. Stolbova, O. A., Zyryanova, N. A., Ryadnov, A. A., et al. (2024). Physiological status of cattle with pododermatitis. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*,

- (114), 322–328. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-114-322-328>. EDN: <https://elibrary.ru/HQNLDB>
19. Chepegin, I. V., & Andriyashina, T. V. (2025). Emissions of odorous substances into the atmosphere. Problems and solutions. *Bulletin of the Technological University*, (10), 80–83. URL: <https://naukaru12.ru/ru/nauka/article/60722/view> (accessed: 03.09.2026).
 20. Kostarev, S. N., Sidorova, K. A., Ravilov, R. Kh., & Kochetova, O. V. (2019). Development of an automated system for integrated environmental monitoring of a municipal waste landfill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537, 62028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062028>. EDN: <https://elibrary.ru/HRHXLL>
 21. Kostarev, S. N., Sereda, T. G., Sidorova, K. A., & Kochetova, O. V. (2019). Disinfecting of the leachate of solid waste landfills with the application of hydrobiological cleaning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 315, 52008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052008>. EDN: <https://elibrary.ru/GRXIJJ>
 22. Shvets, N. I., Sidorova, K. A., Yurina, T. A., & Matveeva, A. A. (2022). Ecological monitoring of soils in urban and rural areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1045(1), 012144. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012144>. EDN: <https://elibrary.ru/PDAUPH>
 23. Guadalupe-Fernandez, V., De Sario, M., & Vecchi, S. (2024). Industrial odour pollution and human health: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Health*. URL: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-021-00774-3#citeas> (accessed: 20.10.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

Зырянова Н.А.: существенный вклад в разработку, практическое исследование в лабораторных и производственных условиях; сбор, анализ, интерпретация полученных данных.

Пашаян С.А.: существенный вклад в разработку, практическое исследование в лабораторных условиях, сбор, анализ, интерпретация полученных данных. С.А. Пашаян, помимо соавторства в статье, координирует переписку с редакцией журнала.

Столбова О.А.: написание статьи и ее редактирование с целью повышения ее научной значимости.

Сидорова К.А.: окончательное одобрение версии работы, которая будет опубликована.

Саткеева А.Б.: написание статьи и ее редактирование с целью повышения ее научной значимости.

Драгич О.А.: согласие нести ответственность и гарантировать, что все вопросы, связанные с точностью или единством всех частей работы проработаны и разрешены.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors made an equal contribution to the preparation of this article for publication.

Natalia A. Zyryanova: significant contribution to the development of the study, practical research in laboratory and industrial settings; collection, analysis, and interpretation of the data obtained.

Susanna A. Pashayan: significant contribution to the development of the study, practical research in the laboratory, and the collection, analysis, and interpretation of the data obtained. In addition to co-authoring this article, Susanna A. Pashayan coordinates correspondence with the journal's editorial board.

Olga A. Stolbova: writing and editing the article to enhance its scientific significance.

Klavdiya A. Sidorova: final approval of the version of the paper to be published.

Amina B. Satkeeva: writing and editing the article to enhance its scientific significance.

Olga A. Dragich: agreement to take responsibility and ensure that all issues related to the accuracy or consistency of all parts of the work are addressed and resolved.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Зырянова Наталья Александровна, к-т биол. наук, доцент кафедры незаразных болезней сельскохозяйственных животных

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

ул. Институтская, 4, г. Тюмень, 625041, Российская Федерация

Zyryanovana@gausz.ru

Пашаян Сусанна Арестовна, д-р биол. наук, профессор кафедры морфологии, физиологии и общей патологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

ул. Институтская, 4, г. Тюмень, 625041, Российская Федерация

Pashayansa@gausz.ru

Столбова Ольга Александровна, д-р вет. наук, доцент, заведующий кафедрой незаразных болезней сельскохозяйственных животных

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

ул. Институтская, 4, г. Тюмень, 625041, Российская Федерация

Stolbovaoa@gausz.ru

Сидорова Клавдия Александровна, д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой морфологии, физиологии и общей патологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»
ул. Институтская, 4, г. Тюмень, 625041, Российская Федерация
sidorova@gausz.ru

Саткеева Амина Бестаевна, д-р с-х. наук, профессор кафедры морфологии, физиологии и общей патологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»
ул. Институтская, 4, г. Тюмень, 625041, Российская Федерация
Satkeevaab@gausz.ru

Драгич Ольга Александровна, д-р биол. наук, профессор морфологии, физиологии и общей патологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»
ул. Институтская, 4, г. Тюмень, 625041, Российская Федерация
Dragichoa@gausz.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR(S)

Natalia A. Zyryanova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Non-Infectious Diseases of Farm Animals
State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
4, Institutskaya Str., Tyumen, 625041, Russian Federation
Zyryanovana@gausz.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6869-8877>

Susanna A. Pashayan, Doctor of Biological Sciences, Professor of Morphology, Physiology, and General Pathology
State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
4, Institutskaya Str., Tyumen, 625041, Russian Federation
Pashayansa@gausz.ru

Olga A. Stolbova, Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Non-Contagious Diseases of Farm Animals

State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
4, Institutskaya Str., Tyumen, 625041, Russian Federation
Stolbovaova@gausz.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4545-815X>
ResearcherID: AAC-4488-2022
Scopus Author ID: 57202165081

Klavdiya A. Sidorova, Dr. Biol. Sci., Professor, Head of the Department of Morphology, Physiology and General Pathology
State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
4, Institutskaya Str., Tyumen, 625041, Russian Federation
sidorova@gausz.ru

Amina B. Satkeeva, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Morphology, Physiology, and General Pathology
State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
4, Institutskaya Str., Tyumen, 625041, Russian Federation
Satkeevaab@gausz.ru

Olga A. Dragich, Doctor of Biological Sciences, Professor of Morphology, Physiology, and General Pathology
State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
4, Institutskaya Str., Tyumen, 625041, Russian Federation
Dragichoa@gausz.ru

Поступила 16.07.2025

После рецензирования 05.12.2025

Принята 26.12.2025

Received 16.07.2025

Revised 05.12.2025

Accepted 26.12.2025

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513)EDN: [HERUUR](https://www.edn.ru/HERUUR)

УДК 582.661.15:581.5:579.6



Влияние эндофитных грибов на формирование устойчивости у *Krascheninnikovia* *ceratoides* Gueldenst. к засухе

П.А. Кузьмин, П.А. Крылов, П.А. Панасенко, А.А. Олейников

ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоград, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В настоящее время остается не изученным вопрос влияния указанных эндофитных, в том числе арбускулярных микоризных грибов (АМГ) на формирование устойчивости к засухе у *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst. на территории Юга России.

Цель – изучить влияния представителей эндофитных грибов *Fusarium oxysporum* var. *redolens* и *Simplicillium obclavatum* (W. Gams) Zare & W. Gams, а также АМГ *Rhizophagus intraradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler и *Funnelformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler на формирование устойчивости у *K. ceratoides* к засухе.

Материалы и методы. Исследования проводили в контролируемых условиях полива и засухи (n=80). Объект исследования – двухлетние саженцы *K. ceratoides*. Схема опыта включала три экспериментальных группы: *F. oxysporum* var. *redolens*, *S. Obclavatum* и *Glomeraceae*. Проводилась оценка жизненного состояния *K. ceratoides* по морфологическим признакам. Анализ содержания фотосинтетических пигментов и метаболитов в листьях *K. ceratoides* проводили с помощью анализатора растений Dualex Scientific. Оценка наличия и степени заселения корневой системы эндофитной микоризой, проводилась с использованием метода Травло.

Результаты. Жизненное состояние по морфологическим параметрам и фотосинтетическим показателям *K. ceratoides* варьировало по экспериментальным группам и по срокам наблюдения. Лучше жизненное состояние *K. ceratoides* отмечено в вариантах с инокуляцией *S. obclavatum* и *Glomeraceae* при засухе к концу эксперимента по сравнению с *F. oxysporum* var. *redolens*. Содержание суммы хлорофиллов в листьях *K. ceratoides* в вариантах *S. Obclavatum* и *Glomeraceae*

при засухе через две недели эксперимента увеличивается, но к концу эксперимента снижалось. Наибольшее содержания флавоноидов и антоцианов в листьях *K. ceratoides* в условиях засухи к концу эксперимента наблюдалось после инокуляции *F. oxysporum* var. *redolens*. Динамика микоризации во всех инокулированных грибами растениях демонстрировала последовательное увеличение показателей между началом и концом эксперимента. Различия между видами грибов выражались преимущественно в показателях обилия арбускул в корневой системе *K. ceratoides*. Наиболее заметное повышение содержания хлорофиллов, улучшение морфологического состояния и активный рост листьев при дефиците влаги отмечались в растениях с *S. obclavatum* и *Glomeraceae*.

Ключевые слова: *Krascheninnikovia ceratoides*; эндوفитная микориза; арбускулярные микоризные грибы; фотосинтетический аппарат; засуха

Для цитирования. Кузьмин, П. А., Крылов, П. А., Панасенко, П. А., & Олейников, А. А. (2026). Влияние эндوفитных грибов на формирование устойчивости у *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. к засухе. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 134–156. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513>

The effect of endophytic fungi on the formation of resistance in *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. to the drought

P.A. Kuzmin, P.A. Krylov, P.A. Panasenko, A.A. Oleynikov

FSC of Agroecology RAS, Volgograd, Russian Federation

Abstract

Background. Currently, the influence of these endophytic fungi, including arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), on the formation of drought resistance in *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. in Southern Russia remains unexplored.

Purpose. The aim was to study the effects of representatives of the endophytic fungi *Fusarium oxysporum* var. *redolens* and *Simplicillium obsclavatum*, as well as AMF *Rhizophagus intradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler and *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler on the formation of resistance in *K. ceratoides* to drought.

Materials and methods. The studies were conducted under controlled laboratory experimental conditions (n=80). The object of the study is two-year-old *K. ceratoides* seedlings. The experimental scheme included four experimental groups: 1. Control; 2. *F. oxysporum* var. *redolens*; 3. *S. Obsclavatum*; 4. *Glomeraceae*. In each group, the reaction from irrigation and drought was determined. The content of photosynthetic pigments and metabolites in *K. ceratoides* leaves was analyzed using a Dualox Scientific plant

analyzer. The assessment of the presence and degree of colonization of the root system by endophytic mycorrhiza was carried out using the Etching method.

Results. The state of life in terms of morphological parameters and photosynthetic parameters of *K. ceratoides* varied by experimental groups and by observation periods. A better vital condition of *K. ceratoides* was noted in variants with inoculation of *S. oblatum* and *Glomeraceae* during drought by the end of the experiment compared with *F. oxysporum* var. *redolens*. The total chlorophyll content in the leaves of *K. ceratoides* in the *S. Oblatum* and *Glomeracea* variants increases after two weeks of the experiment during drought, but decreased by the end of the experiment. The highest content of flavonoids and anthocyanins in the leaves of *K. ceratoides* in drought conditions was observed by the end of the experiment after inoculation with *F. oxysporum* var. *redolens*. The dynamics of mycorrhization in all plants inoculated with fungi demonstrated a consistent increase in indicators between the beginning and the end of the experiment. The differences between the fungal species were expressed mainly in the abundance of arbuscules in the root system of *K. ceratoides*. The most noticeable increase in chlorophyll content, improvement in morphological condition, and active leaf growth with moisture deficiency were observed in plants with *S. oblatum* and *Glomeraceae*.

Keywords: *Krascheninnikovia ceratoides*; endophytic mycorrhiza; arbuscular mycorrhizal fungi; photosynthetic apparatus; drought

For citation. Kuzmin, P. A., Krylov, P. A., Panasenko, P. A., & Oleynikov, A. A. (2026). The effect of endophytic fungi on the formation of resistance in *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. to the drought. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 134–156. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513>

Введение

Терескен серый (*Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst.) является типичным ксерофитом, важным элементом в фитоценозах засушливых территорий, применяется в агролесомелиоративных технологиях. *K. ceratoides* – многолетний полукустарничек, играющий ключевую экологическую роль в пустынных экосистемах, а также используется в качестве ценного кормового ресурса [2; 13; 22].

Арбускулярные микоризные грибы (АМГ) способствуют формированию симбиотических связей между растением и грибом, за счет которого обеспечивается питание, рост и формирование устойчивости древесных и кустарниковых растений к неблагоприятным факторам внешней среды. АМГ является космополитным представителем различных биоценозов [11; 23]. АМГ значительно усиливает доступность минеральных веществ, витаминов, воды, ферментов, гормонов и активных веществ (фосфат и ам-

моний) для растений за счет увеличения площади питания и стабилизации функционирования фотосинтетического аппарата [1; 5].

Типичным представителем АМГ являются *Rhizophagus intraradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler и *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler, относящиеся к семейству *Glomeraceae*. Данные грибы образуют симбиотические связи с корнями многих видов растений. АМГ широко используется в сельском хозяйстве для стимулирования роста растений, улучшения урожайности и снижения зависимости от химических удобрений [8; 26].

Ранее нами были выявлены и идентифицированы следующие представители эндофитных грибов в корневой системе *K. ceratoides*: *Fusarium oxysporum* var. *redolens* (Wollenw.) W.L. Gordon и *Simplicillium obclavatum* (W. Gams) Zare & W. Gams (Bioproject: PRJNA1188096). Эндофитные грибы рассматриваются как перспективные биологические агенты, способные повышать толерантность растений к абиотическим стрессам за счёт регуляции водного обмена, усиления антиоксидантной защиты и модуляции фитогормонального статуса [10; 16; 17]. *F. oxysporum* var. *redolens* широко распространён в различных экосистемах и часто выступает в роли фитопатогена [6; 12]. *S. obclavatum* часто относят к фитопатогенам, однако также имеются сведения о его антагонистической роли по отношению к ним [24].

В настоящее время остается не изученным вопрос влияния указанных эндофитных грибов, в том числе АМГ, на формирование устойчивости к засухе у *K. ceratoides* на территории Юга России.

В связи с этим целью исследования стало изучение влияния представителей эндофитных грибов *Fusarium oxysporum* var. *redolens* (Wollenw.) W.L. Gordon и *Simplicillium obclavatum* (W. Gams) Zare & W. Gams, а также АМГ *Rhizophagus intraradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler и *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler на формирование устойчивости у *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst. к засухе.

Материалы и методы

Изучение влияния *F. oxysporum* и *S. obclavatum*, а также АМГ *R. intraradices* и *F. mosseae* (коммерческий препарат «Эджис») на формирование устойчивости *K. ceratoides* проводилось в лабораторных условиях. Для проведения эксперимента было выращено 80 двухлетних *K. ceratoides* из семян, собранных с насаждений в Астраханской области на территории «урочища Кордон» (47°24'49.2»N 47°53'01.2»E) в 2023 году. Перед посевом семена подвергли

обработке 1%-м раствором марганцовки для обеззараживания и снижения риска возникновения грибковой гнили во время стратификации. По окончании обработки семена смешивали с влажным песком (соотношение 1:3) и помещали в холодильник при температуре +4 °C на 30 дней для стратификации. Через месяц семена замачивались со стимулятором роста и развития «Эпин-экстра» (соотношение 0,5 мл на 1 л воды) на 2 часа. Обработанные семена помещали в подготовленный заранее грунт: смесь почв с естественного места произрастания (зональные бурые аридные супесчаные и песчаные почвы [3]) и песка в соотношении 1:2 соответственно. Влажность почвы измеряли с помощью влагомера почвы Landtek AZ MC-7828SOIL (AZ Instrument, Китай). Условия проращивания растений из семян подбирались согласно ГОСТу 13056.6-97. Поливали посеянные семена каждые два дня, при этом влажность почвы сохраняли в диапазоне 70-80 % НВ в горшках объемом 2 л, температуру в тепличной комнате на базе Фитотрона ФНЦ агроэкологии РАН, поддерживали около +25 °C. В течение всего периода развития растения получали освещение от полноспектральной фитолампы (максимальная мощность ламп 60 Вт) и имели 12-часовой фотопериод.

Перед началом эксперимента было сформировано одна контрольная (20 особей) и три экспериментальные (60 особей) группы. Контрольная группа представляла собой смесь почв с естественного места произрастания *K. ceratoides*. В первой и второй экспериментальной группе в почву добавляли чистые культуры *F. oxysporum* var. *redolens* и *S. obclavatum* соответственно, которые были нами ранее выделены и идентифицированы в корневой системе *K. ceratoides* (Bioproject: PRJNA1188096). Инокулянты эндофитных грибов добавлялись при первом поливе растений в объеме 20 мл. В третьей экспериментальной группе в почву добавляли смесь *R. intraradices* и *F. mosseae* (*Glomeraceae*). В каждой группе было по две подгруппы (по 10 растений в каждой), в одной из которых осуществлялся полив (влажность почвы 65-75 % НВ), а в другой была смоделирована почвенная засуха (влажность почвы 15-25 % НВ).

Измерение содержания суммы хлорофиллов *a* и *b*, флавоноидов и антоцианов (в мкг/см²), а также расчета индекса азотного баланса (NBI) в листьях *K. ceratoides* проводили с помощью анализатора растений Dualex Scientific (Pessl Instruments GmbH, Австрия).

Измерение содержания фотосинтетических пигментов и метаболитов, а также отбор боковых корней для оценки микоризации корневой системы осуществлялась в начале эксперимента (НЭ), а также через 2 и 4 недели соответственно.

Оценка наличия и степени заселения корневой системы эндофитной микоризой, проводилась с использованием метода Травло [21]. Сегменты корней *K. ceratoides* размером 1 см, предварительно очищенные от земли, дважды промывались в 2%-ном растворе КОН в течение 60 мин при температуре 90°C на водяной бане BW-12 (BEING, Китай). Далее с помощью сетки и пинцетов корни трижды промывали под проточной водой, а затем помещались в 2%-й раствор HCl на 45 мин. После этого корни в индивидуальных кассетах помещались на 1 час в раствор 0,05% трипанового синего в лактоглицерине (молочная кислота, глицерин и вода в соотношении 5:1:1) при температуре 90°C на водяной бане.

Корни после окраски переносились в чашку Петри с 50%-м раствором глицерина. С помощью пинцета аккуратно отделяли слой ризодермы и помещали на предметное стекло. Готовые препараты просматривали на световом микроскопе Микомед-5 (Ломо, Россия). Микрофотографии были получены с помощью насадки для микроскопа E3ISPM08300KPE (ООО «Центр Информационных Технологий «НЕ-ЛИАН», Россия) и программы TourView (TourTek, Китай). Оценка колонизации микоризой корней *K. ceratoides* проводилась на 6 сегментах в 30 полях зрения по следующим показателям в процентах: F – частота появления микоризы в корневой системе (%), M – интенсивность заселения корневой системы микоризой (%), m – интенсивность заселения микоризой фрагментов корней (%), а – наличие арбускул в корневой системе (%) и A – обилие арбускул в микоризных частях фрагментов корней (%). Оценка жизненного состояния *K. ceratoides* проводилась по комплексу признаков, согласно методике [4]: цвету и форме листьев, приросту, наличию увядших молодых побегов и листьев. Были определены следующие категории:

- 1 – хорошее состояние кустарников;
- 2 – удовлетворительное состояние кустарников;
- 3 – неудовлетворительное состояние кустарников.

Количественные данные, полученные после расчета F, M, m, a и A в процентах, обрабатывали с помощью программы Statistica 12.0 (StatSoftInc., США). Рассчитывались показатели, принятые для оценки непараметрических выборок в биологических исследованиях: нормальность распределения значений, медиана [1-й квартиль, 3-й квартиль], анализировалась достоверность различий выборок. Для определения различий между двумя независимыми выборками использовали критерий Манна – Уитни при уровне достоверности $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

В течение всего эксперимента регулярно проводили измерения влажности почвы, результаты которых представлены на рисунке 1. Влажность почвы при засухе составляла от 15 % до 28 % НВ, при поливе – от 58 % до 82 % НВ.

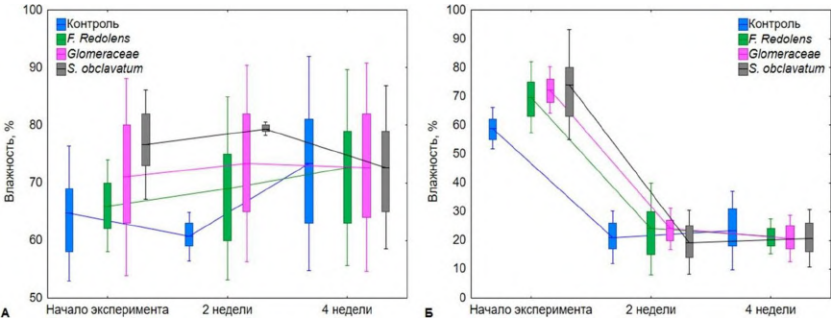


Рис. 1. Показатели влажности почвы в течение 4 недель лабораторных экспериментов у двух подгрупп: А – «полив», Б – «засуха».

Fig. 1. Soil moisture readings over the course of 4 weeks of laboratory experiments for two subgroups: А – “irrigation,” В – “drought.”

Результаты оценки жизненного состояния *K. ceratoides* до и после инокуляции исследуемыми видами эндофитных грибов, а также АМГ, представлены в таблице 1.

Жизненное состояние растений с повышенной концентрацией *F. oxysporum* в почве по прошествии двух недель эксперимента как при поливе, так и при засухе было таким же, как и в контрольном варианте, и составляло 1,2 балла.

Таблица 1.

Оценка жизненного состояния *K. ceratoides* в течение эксперимента

Table 1. Assessment of the Vital Condition of *K. ceratoides* Throughout the Experiment

Экспериментальная группа		Средний балл жизненного состояния
Начало эксперимента		1,1
2 недели		
Контрольная группа	полив	1,2
	засуха	1,2
<i>F. oxysporum</i>	полив	1,2
	засуха	1,2
<i>S. obclavatum</i>	полив	1,1
	засуха	1,2
<i>Glomeraceae</i>	полив	1,1
	засуха	1,3

4 недели		
Контрольная группа	полив	1,2
	засуха	2,6
<i>F. oxysporum</i>	полив	1,2
	засуха	2,7
<i>S. obclavatum</i>	полив	1,1
	засуха	2,6
<i>Glomeraceae</i>	полив	1,3
	засуха	2,8

В варианте с применением *S. obclavatum* и *Glomeraceae* при поливе наблюдалось снижение баллов жизненного состояния растений на 0,1 балл, а при засухе, наоборот, увеличение баллов на 0,1 и 0,2 соответственно, по сравнению с контролем. В течение первых двух недель у растений во всех группах активно развивались новые зелёные побеги, почки и молодые листья (рис. 2). Было отмечено появление новых корневых волосков в контрольной группе растений, а также с *S. obclavatum* и *Glomeraceae* в почве.



Рис. 2. Общий вид *K. ceratoides* через две недели в условиях полива:

А – контрольная группа, Б – *F. oxysporum*, В – *S. obclavatum*, Г – *Glomeraceae* и засухи: Д, Е, Ж, З – А – контрольная группа, Б – *F. oxysporum*, В – *S. obclavatum*, Г – *Glomeraceae*

Fig. 2. General view of *K. ceratoides* after two weeks under irrigated conditions: А – control group, В – *F. oxysporum*, С – *S. obclavatum*, Д – *Glomeraceae*; and under drought conditions:

Е, F, G, H – А – control group, В – *F. oxysporum*, С – *S. obclavatum*, Д – *Glomeraceae*

Через четыре недели эксперимента было отмечено увеличение на 1,4 и 1,6 баллов жизненного состояния при засухе во всех вариантах эксперимента, по сравнению с контролем. Наилучшие значения параметров морфологического состояния наблюдались в группе *S. obclavatum* в варианте с поливом. У большинства растений данной группы отмечался активный прирост относительно начала эксперимента (средний показатель около

13,5 см), длина листовых пластин составляла в среднем 1,3-1,5 см, а ширина – 0,5-0,6 см. У контрольной группы растений и в варианте с применением *F. oxysporum* при поливе среднее значение прироста составляло 6,0-7,0 см и 3,0-4,0 см при засухе соответственно. В варианте с использованием *Glomeraceae* прирост побегов растений составлял 5,0-6,0 см в условиях полива и засухи, длина листьев – 1,5 см (при поливе) и 0,3-0,5 см (при засухе) (Рис. 3).



Рис. 3. Общий вид *K. ceratoides* через четыре недели в условиях полива: А – контрольная группа, Б – *F. oxysporum*, В – *S. obclavatum*, Г – *Glomeraceae* и засухи: Д – контрольная группа, Е – *F. oxysporum*, Ж – *S. obclavatum*, З – *Glomeraceae*

Fig. 3. General view of *K. ceratoides* after four weeks under irrigated conditions: А – control group, В – *F. oxysporum*, С – *S. obclavatum*, D – *Glomeraceae*; and under drought conditions: Е – control group, F – *F. oxysporum*, G – *S. obclavatum*, H – *Glomeraceae*

Результаты по содержанию суммы хлорофиллов, флавоноидов, антоцианов и индекса азотного баланса в листьях у *K. ceratoides*, выращенного в лабораторных условиях в вариантах с применением эндофитных грибов и АМГ при поливе и засухе, представлены в таблице 2.

Через две недели после начала эксперимента максимальное содержание суммы хлорофиллов при поливе отмечено в контрольной группе (8,0 мкг/см² сырой массы). В экспериментальной группе, где была произведена инокуляция *F. oxysporum*, достоверная разница в содержании хлорофиллов составила 7,39 мкг/см² сырой массы по сравнению с контролем, в группе с инокуляцией *S. obclavatum* – 15,84 мкг/см² сырой массы и 10,30 мкг/см² сырой массы относительно варианта с *Glomeraceae*. На второй неделе при инокуляции *S. obclavatum* большее содержание хлорофиллов было при засухе, и разница составила 15,7 мкг/см² сырой массы ($p < 0,05$). При инокуляции *K. ceratoides* *Glomeraceae* показатель содержания хлорофиллов в листьях увеличился и был выше при засухе на 13,13 мкг/см² сырой массы по сравнению с поли-

вом. Также были выявлены достоверные отличия между экспериментальными группами на второй неделе при засухе, а именно в группе с *F. oxysporum* было наименьшее содержание хлорофиллов по сравнению с *S. obclavatum* и *Glomeraceae* на 15,84 и 10,24 мкг/см² сырой массы соответственно. Через две недели при засухе после инокуляции *S. obclavatum* и *Glomeraceae* было зафиксировано превышение на 16,9 и 11,3 мкг/см² сырой массы суммы хлорофиллов, а на четвертой неделе на 2,25 и 1,97 мкг/см² сырой массы соответственно. При этом внутри этих же экспериментальных групп отмечалась тенденция по снижению данного показателя к четвертой неделе.

Таблица 2.

**Содержание фотосинтетических пигментов и метаболитов
у *K. ceratoides* в условиях засухи и полива**

Table 2. Content of photosynthetic pigments and metabolites in *K. ceratoides*
under drought and irrigation conditions

Экспериментальная группа	Параметры	Хл <i>a + b</i> , мкг/см ² сырой массы	Флавоноиды, мкг/см ² сырой массы	Антоцианы, мкг/см ² сырой массы	NBI, усл. ед.
	Начало эксперимента	6,73* [4,61 ÷ 8,04]	0,25* [0,16 ÷ 0,35]	0,26 [0,22 ÷ 0,32]	21* [16 ÷ 30]
	2 недели				
Контрольная	Полив	8,00#& [7,57 ÷ 11,0]	0,35& [0,22 ÷ 0,35]	0,34& [0,29 ÷ 0,44]	25 [18 ÷ 38]
	Засуха	15,15#& [11,0 ÷ 23,6]	0,16 [0,14 ÷ 0,30]	0,26 [0,15 ÷ 0,30]	50 [14 ÷ 65]
<i>F. oxysporum</i>	Полив	3,52 [3,04 ÷ 8,35]	0,14&^ [0,13 ÷ 0,21]	0,30 [0,21 ÷ 0,45]	22* [16 ÷ 52]
	Засуха	7,76&^ [6,16 ÷ 8,77]	0,15* [0,10 ÷ 0,29]	0,36 [0,16 ÷ 0,37]	43^ [21 ÷ 57]
<i>S. obclavatum</i>	Полив	7,90#^ [6,42 ÷ 13,04]	0,90*^ [0,29 ÷ 1,10]	0,26 [0,17 ÷ 0,29]	21*# [18 ÷ 22]
	Засуха	23,6*#^ [19,46 ÷ 24,23]	0,23 [0,20 ÷ 0,62]	0,35 [0,27 ÷ 0,39]	35*# [31 ÷ 115]
<i>Glomeraceae</i>	Полив	4,87#&^ [2,67 ÷ 5,68]	0,13 [0,10 ÷ 0,36]	0,22& [0,19 ÷ 0,23]	19# [16 ÷ 42]
	Засуха	18,00*#^ [15,07 ÷ 19,29]	0,21 [0,08 ÷ 0,31]	0,31 [0,10 ÷ 0,37]	89*#^ [58 ÷ 170]
4 недели					
Контрольная	Полив	5,20 [3,13 ÷ 8,06]	0,05#& [0,04 ÷ 0,12]	0,28 [0,26 ÷ 0,33]	71#& [65 ÷ 97]
	Засуха	9,19 [5,69 ÷ 10,12]	0,40#& [0,34 ÷ 0,66]	0,17& [0,17 ÷ 0,27]	16#& [15 ÷ 23]

<i>F. oxysporum</i>	Полив	10,54 [7,58 ÷ 11,76]	0,09# [^] [0,06 ÷ 0,20]	0,37 [0,30 ÷ 0,38]	81*# [^] [57 ÷ 151]
	Засуха	8,90 [5,47 ÷ 9,83]	0,42*# [^] [0,39 ÷ 0,48]	0,41& [^] [0,32 ÷ 0,45]	21# [^] [11 ÷ 25]
<i>S. obclavatum</i>	Полив	10,57 [7,81 ÷ 12,43]	0,08* [0,02 ÷ 0,15]	0,33 [0,30 ÷ 0,35]	131* [^] [82 ÷ 289]
	Засуха	8,98* [7,95 ÷ 9,92]	0,22& [^] [0,06 ÷ 0,23]	0,39 [0,27 ÷ 0,40]	43* [^] [40 ÷ 125]
<i>Glomeraceae</i>	Полив	6,79 [5,28 ÷ 8,49]	0,25& [^] [0,14 ÷ 0,42]	0,38 [0,25 ÷ 0,56]	20& [^] [16 ÷ 57]
	Засуха	8,70* [8,17 ÷ 12,40]	0,26 [^] [0,23 ÷ 0,57]	0,25 [^] [0,11 ÷ 0,32]	32* [14 ÷ 52]

* – достоверно значимые различия между началом эксперимента, 2-мя и 4-мя неделями в каждой экспериментальной группы, # – между экспериментальными под-группами «засуха» и «полив», & – между контрольной группой и экспериментальной группой, ^ – между экспериментальными группами. Тест Манна-Уитни ($p < 0,05$)

* – statistically significant differences between the start of the experiment, weeks 2 and 4 in each experimental group; # – between the “drought” and “irrigation” experimental subgroups; & – between the control group and an experimental group; ^ – between experimental groups. Mann-Whitney test ($p < 0.05$)

Через две недели после начала эксперимента максимальное содержание флавоноидов, являющихся ключевыми компонентами защиты от окислительного стресса [19], при регулярном поливе выявили в группе с *S. obclavatum* (0,9 мкг/см² сырой массы), а при засухе – у *Glomeraceae* (0,25 мкг/см² сырой массы). В этот же период при поливе были выявлены достоверные различия в содержании флавоноидов между *F. oxysporum* и контрольной группой. При этом в варианте с *S. obclavatum* содержание флавоноидов в листьях *K. ceratoides* было больше на 0,76 мкг/см² сырой массы, чем у *F. oxysporum*. В контрольной группе на четвертой неделе при засухе увеличилось на 0,35 мкг/см² сырой массы по сравнению с поливом. Аналогичная картина наблюдалась также в группе *F. oxysporum*. Через четыре недели содержание флавоноидов при группе с добавлением *Glomeraceae* увеличилось на 0,20 мкг/см² сырой массы и по сравнению с контролем, а в варианте с *S. obclavatum*, наоборот, уменьшилось на 0,18 мкг/см² сырой массы ($p < 0,05$). К концу четвёртой недели динамика флавоноидов изменилась: на фоне адаптации растений к стрессу их уровень оставался более стабильным, но при этом варианты с *F. oxysporum* и *S. obclavatum* демонстрировали более высокую активность вторичного метаболизма, что подтверждает участие эндофитов в регуляции антиоксидантных путей [7].

Содержание антоцианов в листьях *K. ceratoides* в течение всего эксперимента значительно не снижалось. Однако, на второй неделе было зафиксировано снижение в группе с *Glomeraceae* на 0,12 мкг/см² сырой массы ($p < 0,05$). На четвертой неделе при засухе содержание антоцианов резко выросло в группе с *F. oxysporum* по сравнению с *Glomeraceae* ($p < 0,05$). Такое резкое увеличение содержания растительных пигментов может свидетельствовать о включении дополнительных механизмов защиты мембран в условиях сильного стресса.

Индекс азотного баланса в варианте с засухой через две недели после начала эксперимента был достоверно выше, чем при поливе на 14 и 70 единиц в экспериментальных группах *S. obclavatum* и *Glomeraceae*, соответственно. В этот же период показатель индекса азотного баланса был в 2 раза выше в группе *Glomeraceae* по сравнению с *F. oxysporum* ($p < 0,05$). На четвертой неделе после инокуляции *F. oxysporum* были выявлены достоверные различия между поливом и засухой. В группе с *S. obclavatum* индекс азотного баланса был меньше на 27 единиц по сравнению с контролем. В группе с *F. oxysporum* индекс был меньше в 2 раза по сравнению с *S. obclavatum* к концу эксперимента в условиях засухи ($p < 0,05$). Было зафиксировано, что к концу четвертой недели индекс азотного баланса сильно снизился при поливе и засухе в группе, где растения были инокулированы АМГ относительно *F. oxysporum* и *S. obclavatum*.

Таблица 3.

**Показатели интенсивности микоризации эндوفитными грибами
и АМГ корневой системы *K. ceratoides***

Table 3. Indicators of the intensity of mycorrhization by endophytic fungi and AMF
in the root system of *K. ceratoides*

	Параметры	F, %	M, %	m, %	a, %	A, %
Экспериментальная группа	Начало эксперимента	66*	21*	42	32	8*
	2 недели					
Контрольная	Полив	17&	1&	1&	1&	1
	Засуха	66&	6&	8&	1&	2
<i>F. oxysporum</i>	Полив	100*&	43&	43&	6&^	5^
	Засуха	100*&	60*&^	13&	5&^	4^
<i>S. obclavatum</i>	Полив	100*&	56*&	56&	8&^	5^
	Засуха	100*&	42&^	42&^	7&^	3^
<i>Glomeraceae</i>	Полив	100*&	71&	71&	57*&^	39*&^
	Засуха	100*&	69*&	69&	57&^	49*&^

	4 недели					
Контрольная	Полив	83	27&	32&	28&	49&
	Засуха	68	44&	45&	7	11
<i>F. oxysporum</i>	Полив	100*	90	90	14#	7#&^
	Засуха	100*	72*&	72&	6^	2^
<i>S. obclavatum</i>	Полив	100*	90*&	90&	10#&^	7^
	Засуха	100*	75&	75	15#^	8^
<i>Glomeraceae</i>	Полив	100*	75	75	48*&^	36*&^
	Засуха	100*	80*\$	80\$	46^	36*&^

* – достоверно значимые различия между внутри каждой экспериментальной группы, # – между экспериментальными подгруппами «засуха» и «полив», & – между контрольной группой и экспериментальной, ^ – между экспериментальными группами. Показатели колонизации корневой системы эндофитными грибами, включая АМГ. F – частота появления микоризы в корневой системе, M – интенсивность заселения корневой системы микоризо, m – интенсивность заселения микоризой фрагментов корней, a – наличие арбускул в корневой системе и A – обилие арбускул в микоризных частях фрагментов корней.

* – statistically significant differences within each experimental group; # – between the “drought” and “irrigation” experimental subgroups; & – between the control group and an experimental group; ^ – between experimental groups. Indicators of endophytic fungal colonization of the root system, including AM fungi. F – frequency of mycorrhiza occurrence in the root system; M – intensity of mycorrhizal colonization of the root system; m – intensity of mycorrhizal colonization of root fragments; a – presence of arbuscules in the root system; and A – abundance of arbuscules in the mycorrhizal parts of root fragments.

Динамика микоризации во всех инокулированных грибами растениях демонстрировала последовательное увеличение показателей между началом эксперимента, двумя и четырьмя неделями. Наиболее заметное увеличение наблюдалось в показателях частоты колонизации микоризой в корневой системе, которая у растений с инокуляцией всех трёх исследуемых грибов достигала 100% уже на второй неделе и сохранялась на этом уровне до четвертой недели как при поливе, так и при засухе. Показатели интенсивности микоризной колонизации в вариантах с *F. oxysporum* и *S. obclavatum* были умеренно выше контрольных значений, однако обилие арбускул в микоризных частях корневой системы в вариантах *F. oxysporum* и *S. obclavatum* и контролем оставалось низким. Во всех вариантах опыта в начале эксперимента наблюдались единичные арбускулярные структуры.

Через 2 недели во всех корнях инокулированных растений происходило резкое увеличение частоты микоризы. Частота появления микоризы достигала 100 % у *Glomeraceae*, *F. oxysporum* и *S. obclavatum* независимо от ре-

жима увлажнения, при этом значения были достоверно выше контрольных измерений. В вариантах с засухой через две недели наблюдалось увеличение микоризной колонизации корневой системы и фрагментов корней на 54 %, 36 % и 63 % соответственно в группах *F. oxysporum*, *S. obclavatum* и *Glomeraceae* ($p < 0,05$). При поливе наблюдалась аналогичная ситуация. На четвертой неделе эксперимента в варианте с засухой наблюдалось усиление интенсивности микоризации корневой системы *K. ceratoides* во всех экспериментальных группах по сравнению с контролем.

На второй неделе эксперимента как при поливе, так и при засухе было выявлено максимальное значение наличия арбускул и их обилие в фрагментах корневой системы *K. ceratoides* после инокуляции *Glomeraceae* по сравнению с контролем и другими экспериментальными группами ($p < 0,05$). Данная тенденция сохранялась к концу эксперимента.

Таким образом, на всех этапах эксперимента образцы, взятые из инокулированных грибами *K. ceratoides*, демонстрировали достоверный рост частоты микоризы, интенсивности микоризной колонизации и обилия арбускул относительно контроля. Различия между видами грибов выражались преимущественно в показателях обилия арбускул, что отражало различную степень формирования арбускулярных структур в корневой системе *K. ceratoides*.

Наиболее заметное повышение содержания хлорофиллов, улучшение морфологического состояния и активный рост листьев при дефиците влаги отмечались в растениях при инокуляции *S. obclavatum*. Сходные эффекты описаны в работах по представителям близких родов *Simplicillium* и *Scolecobasidium*. Например, *Scolecobasidium humicola* стимулировал рост томата и повышал способность растений усваивать органический азот благодаря эндوفитной модуляции метаболизма [14]. Это совпадает с наблюдаемым у *K. ceratoides* ростом содержанием хлорофиллов, а также усилением физиологической активности под воздействием *S. obclavatum*, что позволяет предположить о возможной мутуалистической связи.

У *K. ceratoides* отмечается специфическая ответная реакция на засуху при инокуляции корневой системы *F. oxysporum*, которая проявляется в повышении содержания антоцианов и флавоноидов, что указывает на стресс, испытываемый растений и включением элементов антиоксидантной системы защиты. Подобная двойственная природа штаммов рода *Fusarium* хорошо известна: они могут как стимулировать рост растений, так и проявлять латентную патогенность в зависимости от условий и конкретного генотипа штамма [18; 20]. Исследования подчёркивают, что эндوفитные

штаммы *Fusarium* синтезируют широкий спектр вторичных метаболитов, способных усиливать стрессоустойчивость растений, хотя в ряде случаев описано наличие фитопатогенных свойств у близких популяций [9].

Наиболее предсказуемый и классический эффект продемонстрировали АМГ. Вариант *Glomeraceae* характеризовался высокой частотой и интенсивностью микоризации, значительным образованием арбускул и улучшением физиологического состояния растений как при поливе, так и при засухе. Эти результаты полностью соответствуют многочисленным исследованиям [8, 26], показывающим, что АМГ повышают устойчивость растений к засухе за счёт улучшения поглощения воды, фосфора и регулирования осмотического статуса. Например, *Rhizophagus clarus* значительно повышал устойчивость сои к водному дефициту за счёт улучшения фотосинтетической активности и статуса воды [15], а *R. irregularis* регулировал азотный обмен и усиливал устойчивость к засухе у других культур [25]. Это согласуется с наблюдаемым у *K. ceratoides* повышением NBI, увеличением содержания хлорофиллов и ускоренным развитием корневой микоризы под воздействием АМГ.

Заключение

1. В варианте с применением *S. obclavatum* и *Glomeraceae* при поливе наблюдается снижение баллов жизненного состояния растений на 0,1 балл, а при засухе, наоборот, увеличение баллов на 0,1 и 0,2 соответственно, по сравнению с контролем. Через четыре недели эксперимента отмечается увеличение на 1,4 и 1,6 баллов жизненного состояния при засухе во всех вариантах эксперимента, по сравнению с контролем. Наилучшие значения параметров морфологического состояния наблюдаются в группе *S. obclavatum* в варианте с поливом.

2. Содержание суммы хлорофиллов в листьях *K. ceratoides* в вариантах *S. Obclavatum* и *Glomeracea* при засухе через две недели эксперимента увеличивается, по сравнению с контролем, а через четыре недели, наоборот, снижается. В вариантах с засухой в течение всего периода наблюдения отмечается увеличение содержания флавоноидов в листьях *K. ceratoides*, при этом более высокое содержание его в вариантах с *F. oxysporum* и *S. Obclavatum*. Содержание антоцианов в листьях *K. ceratoides* в течение всего эксперимента значительно не снижалось. На четвертой неделе при засухе содержание антоцианов резко выросло в группе с *F. oxysporum* по сравнению с *Glomeraceae*. Индекс азотного баланса в варианте с засухой через две недели после начала эксперимента достоверно выше, чем при

поливе на 14 и 70 единиц в экспериментальных группах *S. obclavatum* и *Glomeraceae*, соответственно.

3. Динамика микоризации во всех инокулированных грибами растениях демонстрирует последовательное увеличение показателей между началом эксперимента, двумя и четырьмя неделями. Наиболее заметное увеличение наблюдается в показателях частоты колонизации микоризой в корневой системе, которая у растений с инокуляцией всех трёх исследуемых грибов достигает 100% уже на второй неделе и сохраняется на этом уровне до четвертой недели как при поливе, так и при засухе. В вариантах с засухой через две недели наблюдается увеличение микоризной колонизации корневой системы и фрагментов корней на 54 %, 36 % и 63% соответственно в группах *F. oxysporum*, *S. obclavatum* и *Glomeraceae*.

4. Во всех вариантах опыта наблюдается увеличение частоты микоризации, интенсивности микоризной колонизации и обилия арбускул относительно контроля. Различия между вариантами отмечаются в показателях обилия арбускул. Максимальные значения по содержанию хлорофиллов, морфологическим параметрам и активности роста листьев при дефиците влаги отмечаются в растениях, инокулированных *S. obclavatum*. Вариант с применением *Glomeraceae* характеризуется высокой частотой и интенсивностью микоризации, значительным образованием арбускул и улучшением физиологического состояния растений как при поливе, так и при засухе.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 24-26-00174 «Видовое разнообразие арбускулярной эндомикоризы и ее влияние на засухоустойчивость ксерофитных растений аридных территорий Юга России».

Список литературы

1. Брындина, Л. В., Арнаут, Ю. И., & Алыкова, О. И. (2022). Микоризообразующие грибы в формировании биогеоценозов: аналитический обзор. *Лесотехнический журнал*, 12(1), 5–20. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/1>. EDN: <https://elibrary.ru/TNJJDG>
2. Булахтина, Г. К. (2022). Изучение адаптивного потенциала кормовых кустарниковых растений для использования в восстановлении деградированных полупустынных пастбищных экосистем. *Аграрный вестник Урала*, 1(216), 2–11. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-216-01-2-11>. EDN: <https://elibrary.ru/BHZFBU>
3. Бурукина, Е. А., Колесников, С. И., Яковлева, Л. В., & Минникова, Т. В. (2024). Исследование фитотоксичности почв Астраханской области, подверженных

- пастбищной дигрессии. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*, 1(221), 126–132. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-1-126-132>. EDN: <https://elibrary.ru/DONAMC>
4. Кириллов, С. Н., & Половинкина, Ю. С. (2013). Оценка состояния зеленых насаждений общего пользования г. Волгограда. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки*, 1(5), 29–34. EDN: <https://elibrary.ru/RTPMBP>
 5. Abdel Latef, A. A. H., & Chaoxing, H. (2011). Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in tomato plants subjected to low temperature stress. *Acta Physiol Plant*, 33, 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0650-3>. EDN: <https://elibrary.ru/GUXHHP>
 6. Abdel-Azeem, A. M., Abdel-Azeem, M. A., Darwish, A. G., Nafady, N. A., & Ibrahim, N. A. (2019). *Fusarium*: Biodiversity, ecological significances, and industrial applications. In A. Yadav, S. Mishra, S. Singh, & A. Gupta (Eds.), *Recent advancement in white biotechnology through fungi*. Fungal Biology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1_6
 7. Hamilton, C. E., Gundel, P. E., Helander, M., & Saikkonen, K. (2012). Endophytic mediation of reactive oxygen species and antioxidant activity in plants: a review. *Fungal Diversity*, 54, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13225-012-0158-9>. EDN: <https://elibrary.ru/PIODNL>
 8. Huang, S., Gill, S., Ramzan, M., Ahmad, M. Z., Danish, S., Huang, P., Al Obaid, S., & Alharbi, S. A. (2023). Uncovering the impact of AM fungi on wheat nutrient uptake, ion homeostasis, oxidative stress, and antioxidant defense under salinity stress. *Scientific reports*, 13(1), 8249. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35148-x>. EDN: <https://elibrary.ru/PJLGGS>
 9. Kamel, N. M., Abdel-Motaal, F. F., & El-Zayat, S. A. (2020). Endophytic fungi from the medicinal herb *Euphorbia geniculata* as a potential source for bioactive metabolites. *Arch Microbiol*, 202, 247–255. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01740-x>. EDN: <https://elibrary.ru/HSLVIX>
 10. Khan, A. L., Hussain, J., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., & Lee, I. J. (2015). Endophytic fungi: resource for gibberellins and crop abiotic stress resistance. *Critical reviews in biotechnology*, 35(1), 62–74. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.800018>
 11. Kryukov, A. A., Yurkov, A. P., Gorbunova, A. O., Kudriashova, T. R., Gorenkova, A. I., Kosulnikov, Y. V., & Laktionov, Y. V. (2025). Evaluation of the biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi during regenerative succession in quarries. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii*, 29(1), 72–78. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-09>. EDN: <https://elibrary.ru/FMBHOQ>

12. Laurence, M. H., Burgess, L. W., Summerell, B. A., & Liew, E. C. (2012). High levels of diversity in *Fusarium oxysporum* from non-cultivated ecosystems in Australia. *Fungal biology*, 116(2), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.11.011>
13. Liu, Y., Zheng, C., Su, X., Chen, J., Li, X., Sun, C., & Nizamani, M. M. (2024). Comparative analysis and characterization of the chloroplast genome of *Krascheninnikovia ceratoides* (Amarathaceae): a xerophytic semi-shrub exhibiting drought resistance and high-quality traits. *BMC genomic data*, 25(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s12863-024-01197-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FIBJIX>
14. Mahmoud, R. S., & Narisawa, K. (2013). A new fungal endophyte, *Scolecobasidium humicola*, promotes tomato growth under organic nitrogen conditions. *PloS one*, 8(11), e78746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078746>
15. Oliveira, T. C., Cabral, J. S. R., Santana, L. R., Tavares, G. G., Santos, L. D. S., Paim, T. P., Müller, C., Silva, F. G., Costa, A. C., Souchie, E. L., & Mendes, G. C. (2022). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* improves physiological tolerance to drought stress in soybean plants. *Scientific reports*, 12(1), 9044. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13059-7>. EDN: <https://elibrary.ru/MOGAPC>
16. Ramatsitsi, N., & Manyevere, A. (2025). Roles of endophytic fungi in plant resilience under abiotic stress: A mechanistic review with implications for climate-smart agriculture. *Plant Signaling & Behavior*, 20(1), 2578712. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2578712>. EDN: <https://elibrary.ru/LUBRCG>
17. Ripa, F. A., Cao, W. D., Tong, S., & Sun, J. G. (2019). Assessment of plant growth promoting and abiotic stress tolerance properties of wheat endophytic fungi. *BioMed research international*, 2019, 6105865. <https://doi.org/10.1155/2019/6105865>
18. Rodriguez, R. J., White, J. F., Jr., Arnold, A. E., & Redman, R. S. (2009). Fungal endophytes: diversity and functional roles. *The New phytologist*, 182(2), 314–330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
19. Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food chemistry*, 383, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>. EDN: <https://elibrary.ru/JJBYKA>
20. Toghuco, R. M. K. (2019). Bioprospecting endophytic fungi from *Fusarium* genus as sources of bioactive metabolites. *Mycology*, 11(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1645053>
21. Trouvelot, A., Kough, J. L., & Gianinazzi-Pearson, V. (1986). Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In V. Gianinazzi-Pearson & S. Gianinazzi (Eds.), *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae* (pp. 217–221). INRA Press.
22. Tyutyuma, N. V., Bulakhtina, G. K., & Kudryashova, N. I. (2018). Creation of fodder agrophytocenoses for the restoration of degraded native pastures and im-

- provement of their performance. *Arid Ecosyst*, 8, 122–128. <https://doi.org/10.1134/S2079096118020099>. EDN: <https://elibrary.ru/XXZCPZ>
23. Walker, C., Schüßler, A., Vincent, B., Cranenbrouck, S., & Declerck, S. (2021). Anchoring the species *Rhizophagus intraradices* (formerly *Glomus intraradices*). *Fungal systematics and evolution*, 8, 179–201. <https://doi.org/10.3114/fuse.2021.08.14>. EDN: <https://elibrary.ru/ZUDEOU>
 24. Wang, N., Fan, X., Zhang, S., Liu, B., He, M., Chen, X., Tang, C., Kang, Z., & Wang, X. (2020). Identification of a hyperparasitic *Simplicillium obclavatum* strain affecting the infection dynamics of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici on wheat. *Frontiers in microbiology*, 11, 1277. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01277>. EDN: <https://elibrary.ru/LPDAOW>
 25. Wang, Z., Zhang, S., Liang, J., Chen, H., Jiang, Z., Hu, W., & Tang, M. (2024). *Rhizophagus irregularis* regulates RiCPSI and RiCARI expression to influence plant drought tolerance. *Plant physiology*, 197(1), kiae645. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae645>
 26. Wu, F., Luo, W., Li, J., Xing, W., Lyu, L., Yang, J., Liu, R., & Shi, Z. (2022). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on accumulation and translocation of selenium in winter wheat. *Journal of the science of food and agriculture*, 102(14), 6481–6490. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12015>. EDN: <https://elibrary.ru/YGXXGG>

References

1. Bryndina, L. V., Arnaut, Yu. I., & Alykova, O. I. (2022). Mycorrhiza-forming fungi in the formation of biogeocenoses: An analytical review. *Forest Engineering Journal*, 12(1), 5–20. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/1>. EDN: <https://elibrary.ru/TNJJDG>
2. Bulakhtina, G. K. (2022). Study of the adaptive potential of fodder shrub plants for use in the restoration of degraded semi-desert pasture ecosystems. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 1(216), 2–11. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-216-01-2-11>. EDN: <https://elibrary.ru/BHZFBU>
3. Burukina, E. A., Kolesnikov, S. I., Yakovleva, L. V., & Minnikova, T. V. (2024). Study of phytotoxicity of soils in the Astrakhan region subjected to pasture degradation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Series: Natural Sciences*, 1(221), 126–132. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-1-126-132>. EDN: <https://elibrary.ru/DONAMC>
4. Kirillov, S. N., & Polovinkina, Yu. S. (2013). Assessment of the condition of public green spaces in Volgograd. *Science Journal of Volgograd State University. Series 11: Natural Sciences*, 1(5), 29–34. EDN: <https://elibrary.ru/RTPMBP>
5. Abdel Latef, A. A. H., & Chaoxing, H. (2011). Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in toma-

- to plants subjected to low temperature stress. *Acta Physiol Plant*, 33, 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0650-3>. EDN: <https://elibrary.ru/GUXHHP>
6. Abdel-Azeem, A. M., Abdel-Azeem, M. A., Darwish, A. G., Nafady, N. A., & Ibrahim, N. A. (2019). *Fusarium*: Biodiversity, ecological significances, and industrial applications. In A. Yadav, S. Mishra, S. Singh, & A. Gupta (Eds.), *Recent advancement in white biotechnology through fungi*. Fungal Biology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1_6
 7. Hamilton, C. E., Gundel, P. E., Helander, M., & Saikkonen, K. (2012). Endophytic mediation of reactive oxygen species and antioxidant activity in plants: A review. *Fungal Diversity*, 54, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13225-012-0158-9>. EDN: <https://elibrary.ru/PIODNL>
 8. Huang, S., Gill, S., Ramzan, M., Ahmad, M. Z., Danish, S., Huang, P., Al Obaid, S., & Alharbi, S. A. (2023). Uncovering the impact of AM fungi on wheat nutrient uptake, ion homeostasis, oxidative stress, and antioxidant defense under salinity stress. *Scientific Reports*, 13(1), 8249. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35148-x>. EDN: <https://elibrary.ru/PJLGGS>
 9. Kamel, N. M., Abdel-Motaal, F. F., & El-Zayat, S. A. (2020). Endophytic fungi from the medicinal herb *Euphorbia geniculata* as a potential source for bioactive metabolites. *Arch Microbiol*, 202, 247–255. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01740-x>. EDN: <https://elibrary.ru/HSLVIX>
 10. Khan, A. L., Hussain, J., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., & Lee, I. J. (2015). Endophytic fungi: Resource for gibberellins and crop abiotic stress resistance. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(1), 62–74. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.800018>
 11. Kryukov, A. A., Yurkov, A. P., Gorbunova, A. O., Kudriashova, T. R., Gorenkova, A. I., Kosulnikov, Y. V., & Laktionov, Y. V. (2025). Evaluation of the biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi during regenerative succession in quarries. *Vavilovskii zhurnal genetiki i seleksii*, 29(1), 72–78. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-09>. EDN: <https://elibrary.ru/FMBHOQ>
 12. Laurence, M. H., Burgess, L. W., Summerell, B. A., & Liew, E. C. (2012). High levels of diversity in *Fusarium oxysporum* from non-cultivated ecosystems in Australia. *Fungal Biology*, 116(2), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.11.011>
 13. Liu, Y., Zheng, C., Su, X., Chen, J., Li, X., Sun, C., & Nizamani, M. M. (2024). Comparative analysis and characterization of the chloroplast genome of *Krascheninnikovia ceratoides* (Amaranthaceae): A xerophytic semi-shrub exhibiting drought resistance and high-quality traits. *BMC Genomic Data*, 25(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s12863-024-01197-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FIBJIX>
 14. Mahmoud, R. S., & Narisawa, K. (2013). A new fungal endophyte, *Scolecobasidium humicola*, promotes tomato growth under organic nitrogen conditions. *PloS ONE*, 8(11), e78746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078746>

15. Oliveira, T. C., Cabral, J. S. R., Santana, L. R., Tavares, G. G., Santos, L. D. S., Paim, T. P., Müller, C., Silva, F. G., Costa, A. C., Souchie, E. L., & Mendes, G. C. (2022). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* improves physiological tolerance to drought stress in soybean plants. *Scientific Reports*, 12(1), 9044. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13059-7>. EDN: <https://elibrary.ru/MOGAPC>
16. Ramatsitsi, N., & Manyevere, A. (2025). Roles of endophytic fungi in plant resilience under abiotic stress: A mechanistic review with implications for climate-smart agriculture. *Plant Signaling & Behavior*, 20(1), 2578712. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2578712>. EDN: <https://elibrary.ru/LUBRCG>
17. Ripa, F. A., Cao, W. D., Tong, S., & Sun, J. G. (2019). Assessment of plant growth promoting and abiotic stress tolerance properties of wheat endophytic fungi. *BioMed Research International*, 2019, 6105865. <https://doi.org/10.1155/2019/6105865>
18. Rodriguez, R. J., White, J. F., Jr., Arnold, A. E., & Redman, R. S. (2009). Fungal endophytes: Diversity and functional roles. *The New Phytologist*, 182(2), 314–330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
19. Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 383, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>. EDN: <https://elibrary.ru/JBYKA>
20. Toghueo, R. M. K. (2019). Bioprospecting endophytic fungi from *Fusarium* genus as sources of bioactive metabolites. *Mycology*, 11(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1645053>
21. Trouvelot, A., Kough, J. L., & Gianinazzi-Pearson, V. (1986). Measurement of the VA mycorrhization rate of a root system. Search for estimation methods having a functional significance. In V. Gianinazzi-Pearson & S. Gianinazzi (Eds.), *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae* (pp. 217–221). INRA Press.
22. Tyutyuma, N. V., Bulakhtina, G. K., & Kudryashova, N. I. (2018). Creation of fodder agrophytocenoses for the restoration of degraded native pastures and improvement of their performance. *Arid Ecosystems*, 8, 122–128. <https://doi.org/10.1134/S2079096118020099>. EDN: <https://elibrary.ru/XXZCPZ>
23. Walker, C., Schüßler, A., Vincent, B., Cranenbrouck, S., & Declerck, S. (2021). Anchoring the species *Rhizophagus intraradices* (formerly *Glomus intraradices*). *Fungal Systematics and Evolution*, 8, 179–201. <https://doi.org/10.3114/fuse.2021.08.14>. EDN: <https://elibrary.ru/ZUDEOU>
24. Wang, N., Fan, X., Zhang, S., Liu, B., He, M., Chen, X., Tang, C., Kang, Z., & Wang, X. (2020). Identification of a hyperparasitic *Simplicillium obclavatum* strain affecting the infection dynamics of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici on wheat. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1277. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01277>. EDN: <https://elibrary.ru/LPDAOW>

25. Wang, Z., Zhang, S., Liang, J., Chen, H., Jiang, Z., Hu, W., & Tang, M. (2024). *Rhizopagus irregularis* regulates RiCPSI and RiCARI expression to influence plant drought tolerance. *Plant Physiology*, 197(1), kiae645. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae645>
26. Wu, F., Luo, W., Li, J., Xing, W., Lyu, L., Yang, J., Liu, R., & Shi, Z. (2022). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on accumulation and translocation of selenium in winter wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(14), 6481–6490. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12015>. EDN: <https://elibrary.ru/YGXXGG>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кузьмин Петр Анатольевич, канд. с.-х. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией молекулярной селекции
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
kuzmin-p@vfanc.ru

Крылов Павел Андреевич, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геномных и постгеномных технологий
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
krylov-p@vfanc.ru

Панасенко Полина Александровна, лаборант-исследователь лаборатории геномных и постгеномных технологий
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
panasenko.p@vfanc.ru

Олейников Александр Александрович, лаборант-исследователь лаборатории геномных и постгеномных технологий
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
olejnikov.a@vfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Petr A. Kuzmin, Cand. Sc. (Agriculture), Docent, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Molecular Breeding

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation kuzmin-p@vfanc.ru

SPIN-code: 7551-8803

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1303-765X>

ResearcherID: N-4277-2016

Scopus Author ID: 56192995500

Pavel A. Krylov, Cand. Sc. (Biology), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation krylov-p@vfanc.ru

SPIN-code: 9652-7459

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9587-5886>

ResearcherID: V-6884-2017

Scopus Author ID: 57213164834

Polina A. Panasenko, Laboratory Research Assistant of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation panasenko.p@vfanc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2618-5786>

Alexander A. Oleynikov, Laboratory Research Assistant of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation olejnikov.a@vfanc.ru

SPIN-code: 7869-2080

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8225-6001>

Поступила 18.11.2025

После рецензирования 26.12.2025

Принята 14.01.2026

Received 18.11.2025

Revised 26.12.2025

Accepted 14.01.2026

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783)EDN: [JYTJOO](https://www.edn.ru/JYTJOO)

УДК 631.95:631.412.1:631.417.1



Оценка эффективности улавливания CO₂ растениями-сидератами в агроэкосистемах

П.А. Курынцева, А.Р. Камалова, С.И. Красовская,
Н.А. Пронович, С.Ю. Селивановская

*Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ,
Казань, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. В условиях глобального изменения климата актуализируется поиск эффективных методов улавливания углекислого газа (CO₂). Растения-сидераты являются ключевым элементом агроэкосистем, способными не только улучшать плодородие почвы, но и связывать атмосферный углерод, что делает оценку их потенциала чрезвычайно важной для снижения парникового эффекта.

Цель. Провести сравнительную оценку эффективности десяти видов растений-сидератов по улавливанию CO₂ из атмосферы и определить их влияние на агрохимические свойства почвы для выбора оптимальных культур.

Материалы и методы. В рамках мелкоделяночного эксперимента исследовались 10 видов растений-сидератов: редька масличная, рапс яровой, вика, фацелия, горох полевой, ячмень яровой, горох посевной, овес, горчица белая и горчица сарептская. Методика включала определение динамики прироста наземной и корневой биомассы, измерение содержания углерода в фитомассе и анализ изменения ключевых почвенных показателей после их внесения.

Результаты. Установлено, что максимальный прирост биомассы наблюдался на 14-42 сутки (от 9 до 672%). Содержание углерода в фитомассе стабилизировалось в диапазоне 33–58% в ходе роста. Объем фиксации CO₂ варьировал от 40 до 13 464 кгC/га, с максимумом у гороха посевного (10 022–13 464 кгC/га), а минимальное - у вики (765 кгC/га). Внесение сидератов повысило содержание органического углерода (на 2–23%), азота (на 3–27%), калия (на 6–42%), фосфора (на 6–28%), а также микробную биомассу (11–17 мкг/г), снизив при этом емкость катионного обмена и электропроводность. Расчет баланса эмиссии и улавливания CO₂ показал, что только горох полевой, горох посевной и овес обеспечили фикса-

цию CO₂ в биомассе, в то время как у других культур доминировала эмиссия CO₂ от почвенного дыхания.

Заключение. Полученные результаты имеют практическое значение для выбора оптимальных сидератов с целью повышения углеродной емкости почв и снижения парникового эффекта.

Ключевые слова: растения-сидераты; улавливание CO₂; углеродный баланс; фитомасса; парниковый эффект

Для цитирования. Курынцева, П. А., Камалова, А. Р., Красовская, С. И., Пронovich, Н. А., & Селивановская, С. Ю. (2026). Оценка эффективности улавливания CO₂ растениями-сидератами в агроэкосистемах. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 157–186. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783>

Assessment of CO₂ sequestration efficiency by cover crops in agroecosystems

P.A. Kuryntseva, A.R. Kamalova., S.I. Krasovskaya,
A.N. Pronovich, S.Yu. Selivanovskaya

*Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
of Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation*

Abstract

Background. In the context of global climate change, the search for effective methods of capturing carbon dioxide (CO₂) is becoming increasingly urgent. Green manure plants are a key element of agroecosystems, capable of not only improving soil fertility but also sequestering atmospheric carbon. This makes assessing their potential extremely important for mitigating the greenhouse effect.

Purpose. To conduct a comparative assessment of the effectiveness of ten species of green manure plants in capturing CO₂ from the atmosphere and to determine their impact on the agrochemical properties of the soil for the selection of optimal crops.

Materials and methods. A small-plot experiment was conducted to study 10 species of green manure plants: oil radish, spring rape, vetch, phacelia, field pea, barley, garden pea, oat, white mustard, and brown mustard. The methodology included determining the dynamics of aboveground and root biomass growth, measuring the carbon content in the phytomass, and analyzing changes in key soil indicators after their incorporation.

Results. It was found that the maximum biomass increase was observed on days 14–42 (from 9 to 672%). The carbon content in the phytomass stabilized in the range of 33–58% during growth. The volume of CO₂ fixation varied from 40 to 13,464 kgC/ha, with a maximum in garden pea (10,022–13,464 kgC/ha) and a minimum in vetch

(765 kgC/ha). The application of green manure increased the content of organic carbon (by 2–23%), nitrogen (by 3–27%), potassium (by 6–42%), phosphorus (by 6–28%), and microbial biomass (11–17 µg/g), while decreasing the cation exchange capacity and electrical conductivity. Calculation of the balance of CO₂ emission and capture showed that only field pea, garden pea and oats ensured CO₂ fixation in biomass, while for other crops, CO₂ emission from soil respiration dominated.

Conclusion. The obtained results have practical significance for the selection of optimal green manure crops in order to increase the carbon capacity of soils and reduce the greenhouse effect.

Keywords: cover crops; CO₂ sequestration; carbon balance; phytomass; greenhouse effect

For citation. Kuryntseva, P. A., Kamalova, A. R., Krasovskaya, S. I., Pronovich, N. A., & Selivanovskaya, S. Yu. (2026). Assessment of CO₂ sequestration efficiency by cover crops in agroecosystems. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 157–186. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783>

Введение

Глобальное изменение климата, вызванное растущей концентрацией парниковых газов (преимущественно углекислого газа) в атмосфере, требует разработки новых подходов для улавливания углерода. Многие исследователи признают одним из наиболее перспективных направлений внедрение изменений в сельскохозяйственные системы [19; 31; 35]. Одним из таких подходов является использование растений-сидератов, известных своей двойной пользой: повышением плодородия почв и снижением воздействия на окружающую среду. Введение сидератов в севооборот представляет собой эффективный способ улавливания углерода и сокращения выбросов CO₂ [4]. Эти культуры широко применяются для улучшения структуры почвы, снижения эрозии, а также для увеличения содержания органического вещества и улучшения микробиологической активности почвы [5; 6]. Биологическая ценность сидератов, особенно бобовых, также проявляется в их способности фиксировать атмосферный азот в корневых клубеньках благодаря симбиозу с бактериями рода *Rhizobium*, что способствует увеличению содержания азота в почве и уменьшает потребность в минеральных удобрениях [7; 10; 14]. Экологическая роль сидератов также проявляется в их способности снижать эмиссию парниковых газов, в частности углекислого газа, за счет фиксации углерода в биомассе и накопления его в почве [1; 12; 13]. Совокупность этих факторов позволяет рассматривать растения-сидераты как эффективный и экологически устойчивый инструмент повышения плодородия почв и снижения углеродного следа сельскохозяйственного производства.

Согласно последним оценкам, даже незначительное ежегодное увеличение содержания органического углерода в почвах сельскохозяйственных угодий на 0,4% может потенциально компенсировать годовые выбросы углерода, связанные со сжиганием ископаемого топлива [36]. Это подчёркивает важнейшую роль устойчивых методов ведения сельского хозяйства, таких как введение в севооборот сидеральных культур, для достижения глобальных целей углеродной нейтральности [12; 42].

Сельскохозяйственные почвы традиционно рассматриваются как источники эмиссии углерода, а изменение традиционных технологий может приводить к снижению этих выбросов и интенсификации процессов накопления углерода в почве, а значит и увеличению ее плодородия. С этой точки зрения выращивание сидератов, в частности в качестве промежуточной культуры после раннего сбора озимых, может стать эффективным путем смягчения последствий изменений климата и принести дополнительные выгоды, такие как улучшение здоровья и плодородия почвы.

Целью исследования являлось попытка оценить потенциал улавливания углерода различными видами сидератов в условиях мелкоделяночного эксперимента, путем количественной оценки эмиссии CO_2 из почвы и накопления фитомассы различными видами сидератов, которая впоследствии перейдет в почвенный профиль.

Материалы и методы

1. Организация мелкоделяночного эксперимента

В 2024 году был проведен мелкоделяночный эксперимент по выращиванию растений-сидератов: редька масличная, рапс яровой, вика, фацелия, горох полевой, ячмень яровой, горох посевной, овес, горчица белая, горчица сарептская. В начале мая, после схода снега и подсыхания верхнего слоя почвы, было проведено рыхление (боронование) верхнего слоя почвы опытного участка зубowymi боровами БЗТУ-1 в два следа сцепкой С-11 трактором МТЗ-1221, что обеспечило сохранение влаги в почве. В дальнейшем боронование повторяли еще дважды с интервалом в 14 суток для уничтожения сорной растительности. После третьего боронования участок был разбит на делянки площадью 10 м^2 ($5 \times 2 \text{ м}$). Для каждого варианта было предусмотрено 3 повторности делянок, расположенные в случайном порядке. Для исключения взаимного влияния между делянками были оставлены защитные полосы шириной 1 м, а расстояние от участка до дорог и соседних полей составило 15 м. После разбивки делянок и уста-

новки разметочных колышков с номерами с каждой делянки был отобран почвенный образец с глубины 0–10 см для проведения агрохимического и микробиологического анализа. Внесение минеральных удобрений и пестицидов в эксперименте не предусматривалось.

Посев растений-сидератов был осуществлен 30 мая 2024 года. Далее каждые 7 дней (07.06.2024, 14.06.2024, 21.06.2024, 28.06.2024, 05.07.2024, 12.07.2024, 19.07.2024, 26.07.2024, 01.08.2024, 05.08.2024) проводился отбор растений по 5 штук с каждой делянки (всего 15 растений на вариант опыта), выбранных случайным образом. Растения доставлялись в лабораторию, где измеряли длину корня и побега, высушивали до постоянного веса с последующим определением сухой биомассы корня и побега, а также содержание углерода в фитомассе. В указанные даты также отбирались почвенные пробы для определения респираторной активности согласно ISO 16072:2002 с анализом на газовом хроматографе [28]. 5 августа 2024 года был проведен заключительный отбор растительных проб, после чего все сидераты, за исключением рапса, были заделаны в почву. Рапс яровой был запахан ранее в связи с переходом в фазу созревания семян. 16 августа 2024 года, после запахки сидератов, был осуществлен последний отбор проб почвы для оценки агрохимических свойств, респираторной активности и микробной биомассы.

2. Оценка агрохимических параметров

Образцы почвы для определения агрохимических характеристик отбирались согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 [2]. pH и ЕС определяли согласно ГОСТ 26423-85 [30]. Влажность почвы оценивали гигроскопическим методом, ЕКО определяли методом Бобко-Аскинази-Алешина в модификации ЦИНАО согласно ГОСТ 5180–2015 [4]. Для определения содержания общего углерода и общего азота использован метод сухого сжигания согласно DIN/ISO 13878 на анализаторе Elementar Vario MAX Cube (Germany) [37]. Содержание подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО согласно ГОСТ Р 54650-2011 [5], гранулометрический состав методом лазерной дифракции согласно ISO 13320:2020 [27].

3. Оценка функционирования почвенной микробиоты

Для оценки почвенного дыхания (эмиссии CO_2) использовали «камерный метод» [9], определяющий изменение концентрации CO_2 в непрозрачных цилиндрических ПВХ-камерах объемом 1.5 л. и диаметром 110 мм, вкопанных в почву на глубину 4 см. Камеры герметично закрывали крышкой, общее время экспозиции составляло 4 мин. Концентрацию CO_2

фиксируют инфракрасным газоанализатором CD 210 (Wohler, Германия) через 1 и через 3 минуты после начала инкубации. Для расчета изменения массы углерода (в форме CO_2) в камере за время экспозиции использовали выражение, основанное на уравнении Менделеева–Клапейрона [9]. Параллельно измерялась температура приземного слоя воздуха и почвы на глубине 5 и 10 см, с помощью прибора Checktemp-1 (Hanna, Германия) с точностью до 0.1°C .

Углерод микробной биомассы почвы оценивали методом субстрат-индуцированного дыхания согласно ISO 16072:2002 с окончанием на газовом хроматографе Nexis GC-2030 (Shimadzu, Япония) [28]. Навеску почвы массой 1 г и 10 мг D-глюкозы в качестве легкодоступного питательного субстрата помещали в хроматографическую вials и инкубировали в течение 24 ч при температуре 20°C . Измерение проводили на капиллярной колонке Rt-Q-BOND 30 m с диаметром 0.53 мм и толщиной слоя нанесённой фазы 20 мкм. Скорость потока составляла 10 мл/мин, объём впрыска – 10 мкл, общее время измерения составляло 5 минут на образец.

Все измерения проводились не менее чем в трёхкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью Microsoft Office Excel 2021 (США). Все графические данные содержат средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при $\alpha = 0,05$.

Результаты и обсуждение

Мелкоделяночный эксперимент проводился на изменённых сельскохозяйственных почвах лесостепной зоны, тип почвы определен как серая лесная. Агрохимические характеристики почвы до начала эксперимента представлены в табл. 1. Емкость катионного обмена варьировала в диапазоне от 39,00 до 75,80 мг*экв/100 г, pH – в пределах от 6,33 до 7,31, электропроводность – от 46,40 до 84,20 мкСм/см, а влажность – от 18,11 до 19,48 %. Содержание макроэлементов составило: 23,62-42,96 г/кг для С, 0,86-1,88 г/кг для N, 125-163 мг/кг для К, 43-62 мг/кг для Р, что соответствует данным, приведенным в литературе для серых лесных почв. Так, согласно литературе, содержание К в таких почвах составляет 90-135 мг/кг, а Р – 46-126 мг/кг [11,15,34,38]. Содержание углерода, согласно литературным данным, изменяется в диапазоне 1,79-8,10 % [18,29,30,17]. По результатам гранулометрического анализа методом лазерной дифракции, почва, на которой проводился эксперимент, относится к песчаным суглинкам.

Таблица 1.

Агрохимические характеристики почвы до начала мелкоделяночного эксперимента**Table 1.** Agrochemical characteristics of the soil prior to the start of the small-plot experiment

Дата	30.05.2024								
Показатель/ Культуры	ЕКО, мг*экв/100 г СЕС, meq/100g	pH	ЕС, мкСм/см	С, %	N, %	К, мг/кг	Р, мг/кг	Влажность, %	ГМС
Редька масличная	39,00± 0,51	7,25±0 ,02	83,20± 5,10	35,60± 0,95	1,65± 0,12	380 ±12	53±2	18,50 ±0,390	песчаный суглинок
Рапс яровой	48,80± 0,41	7,21± 0,02	75,10± 7,12	36,83± 0,85	0,86± 0,15	315 ±15	61±4	19,48 ±0,42	песчаный суглинок
Вика	64,80± 0,28	7,19± 0,03	84,20± 2,80	42,96± 0,77	1,88± 0,17	312 ±21	62±3	19,25 ±0,92	песчаный суглинок
Фацелия	45,00± 0,44	7,31± 0,05	77,20± 4,12	35,08± 1,25	1,51± 0,21	407 ±23	62±4	18,71 ±0,52	песчаный суглинок
Горох полевой	65,20± 0,52	7,16± 0,06	79,20± 8,60	35,31± 1,63	1,39± 0,24	327 ±30	43±5	18,41 ±0,47	песчаный суглинок
Ячмень яровой	68,80± 0,71	7,10± 0,03	54,10± 2,69	31,57± 1,37	1,48± 0,20	319 ±34	51±4	18,83 ±0,68	песчаный суглинок
Горох посевной	59,80± 0,85	6,93± 0,02	49,70± 4,37	35,24± 0,89	1,00± 0,09	395 ±37	52±3	18,13 ±0,51	песчаный суглинок
Овес	56,60± 0,41	6,96± 0,04	55,50± 5,33	28,65± 0,92	1,06± 0,18	334 ±26	60±4	18,30 ±0,49	песчаный суглинок
Горчица белая	75,80± 0,95	6,33± 0,05	46,40± 6,85	27,32± 0,47	1,09± 0,16	384 ±25	46±5	18,11 ±0,61	песчаный суглинок
Горчица сарептская	51,00± 0,15	7,03± 0,07	61,50± 6,52	23,62± 1,27	1,04± 0,15	334 ±32	49±6	18,95 ±0,44	песчаный суглинок

Динамика морфометрических показателей растений в ходе эксперимента представлена на рис.1-10 [8]. Поскольку в данном исследовании растения-сидераты рассматриваются преимущественно как средство снижения эмиссии парниковых газов, в частности CO₂, выделяемого при почвенном дыхании, и в меньшей степени – как «зеленые удобрения», то к оптимальным были отнесены те виды, отличающиеся быстрым накоплением биомассы и её максимальными значениями к концу вегетационного сезона.

Согласно полученным данным, всходы вики появились после 7 июня 2024 г. Длина корня увеличивалась на протяжении вегетационного сезона,

достигнув максимальных значений в августе - 15,5 и 19,7 см (отбор проб 1 августа и 5 августа). Аналогично изменялась длина побега, значения которой к концу эксперимента составили 80-97 см. Фитомасса вики увеличивалась до 12 июля, после чего прирост был незначительным, вероятно, из-за отмирания нижних листьев. Полученные значения соответствуют типичным для данной культуры: длина корня – до 100 см, высота побега – 50-100 см, биомасса – от 2500 до 5200 кг/га [21; 25; 39; 40].

Первые всходы гороха полевого были зафиксированы также после 7 июня 2024 г. В течение вегетационного периода длина корня и побега стабильно увеличивалась. Растения, отобранные 1 августа и 5 августа, по морфометрическим параметрам достоверно не различались: длина корня составила 17–19 см, длина побега – 107–108,6 см, фитомасса – 14,9–15,8 г ($p>0,05$). Эти показатели соответствуют средним значениям, указанным производителем семян (побеги 80–100 см, корневая система с основным корнем проникает до 1,5 м, боковые корни – 20–40 см).

Первые всходы гороха посевного были отмечены 7 июня 2024 г. В дальнейшем длина корня, побега и фитомасса растений постепенно увеличивались, достигая максимальных значений в августе 2024 года: длина корня - 18,6–21,4 см, побега - 49,6–60,4 см, фитомасса - 20,3–21,0 г. Стоит отметить, что после 12 июля прирост фитомассы замедлился.

Всходы горчицы белой были зафиксированы 7 июля 2024 г. В ходе вегетации морфометрические показатели увеличивались, достигнув к концу наблюдений длины корня в среднем 13,5 см, длины побега 51 см и фитомассы 2,5 г. Эти результаты совпадают со средними показателями вида, где высота побега достигает до 70 см, а длина корня - до 60 см.

Горчица сарептская, аналогично горчице белой, взошла 7 июня 2024 г. Длина корня и побега постепенно увеличивалась, однако скорость прироста снизилась после 12 июля. Фитомасса растений горчицы сарептской увеличивалась на протяжении всего вегетационного эксперимента, с наименьшим приростом после 1 августа. В эксперименте не выявлено статистически значимых различий по высоте побега, длине корня и фитомассе между двумя видами горчицы ($p>0,05$). С увеличением продолжительности вегетации длина побега и фитомасса овса увеличивались, достигнув максимальных значений 5 августа (в среднем 79 см и 5,6 г, соответственно). Длина корня после 12 июля достоверно не увеличивалась и находилась в диапазоне 7,6–11,2 см ($p>0,05$).

Рапс яровой характеризовался стабильным приростом всех морфометрических характеристик на протяжении эксперимента, достигнув макси-

мальных значений к 1 августа: средняя длина корня 26,6 см, побега - 108 см, фитомассы - 11,6 г. Полученные значения соответствуют средним показателям длины корня – 20-40 см, длины побега – 60-150 см. Поскольку созревание семян рапса произошло раньше, запашка данного варианта была проведена сразу после отбора проб 1 августа, чтобы предотвратить попадание зрелых семян в почву и потенциального её засорения. Следует отметить, что наблюдаемое в динамике снижение некоторых средних значений морфометрических показателей, связано с неоднородностью развития растений в одном варианте и случайным отбором проб, что объясняет значительный разброс полученных данных.

Всходы редьки масличной появились 7 июня 2024 г. Интенсивный рост длины корня и побега, а также прирост биомассы отмечены в период с 7 июня по 12 июля. К концу вегетации средняя длина корня достигла 19 см, длина побега - 85,7 см, фитомасса - 13,0 г.

Всходы фацелии зафиксированы после 14 июня 2024 года. Длина побега и фитомасса увеличивались на протяжении всего вегетационного периода, достигнув максимума 5 августа (86,4 см и 9,1 г соответственно). Длина корня интенсивно увеличивалась до 12 июля, затем колебалась в пределах 10–18 см. Эти результаты соответствуют типичным для фацелии значениям: длина побега до 1 м, длина корня до 60 см.

Всходы ячменя ярового отмечены 7 июня 2024 г. В последующий период наблюдалось увеличение длины корня, побега и фитомассы. К 5 августа средние значения составили: длина корня - 7 см, длина побега - 75 см, фитомасса - 5,8 г. После 12 июля для ряда растений отмечен прирост который не был статистически значим по длине корня (ячмень яровой, фацелия, редька масличная, овес, горчица сарептская, горох посевной, горох полевой, вика), длине побега (редька масличная, горчица сарептская, горох посевной, вика) и фитомассе (редька масличная, овес, горох посевной, горох полевой, вика) ($p > 0,05$).

После оценки морфометрических характеристик отобранные растения были подготовлены для определения содержания углерода (рис. 11). Установлено, что в начале вегетации растения характеризовались минимальным содержанием углерода - от 24 до 58 %. К концу эксперимента (на 5 августа) наибольшим содержанием углерода характеризовались растения овса (51,4 %), наименьшим – растения ячменя (41 %). Полученные данные будут использованы для последующего расчета интенсивности поглощения углерода из атмосферы и его фиксации в растительной биомассе.

Далее была проведена оценка респираторной активности почвенного микробного сообщества, на основании которой была рассчитана эмиссия CO_2 из почвы (табл. 2). Респираторная активность почвенного микробного сообщества зависит от климатических факторов, таких как температура и влажность почвы [20,22,24,26,32,33,43,44,45], и биотических факторов, в частности влияние корневой системы растений посредством выделения экссудатов и образования отмерших корней [23]. В начале эксперимента почва характеризовалась минимальной эмиссией CO_2 и наименьшим разбросом данных, поскольку растения либо ещё не имели проростков, либо их корневая система была недостаточно развита для значительного влияния на микробную активность и, следовательно, на эмиссию CO_2 . Так, 7 июня 2024 г. эмиссия CO_2 составляла от 0,050 до 0,112 г $\text{C}/\text{M}^2\cdot\text{ч}$. Рост и развитие корневой системы и повышенная влажность почвы привела к увеличению эмиссии CO_2 в период с 14 по 21 июня в 4–31 раз. В дальнейшем респираторная активность микробного сообщества стабилизировалась, эмиссия CO_2 колебалась в диапазоне от 0,123 до 0,534 г $\text{C}/\text{M}^2\cdot\text{ч}$. Следует отметить, что почва под горчицей сарептской, викой и фацелией характеризовалась повышенной респираторной активностью на протяжении всего вегетационного периода.

Таблица 2.

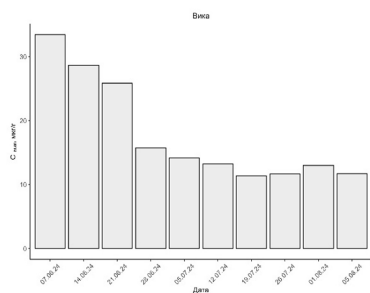
Изменение эмиссии CO_2 за счет респираторной активности почвенного микробного сообщества в динамике вегетационного эксперимента под растениями

Table 2. Changes in CO_2 emissions due to the respiratory activity of the soil microbial community over the course of a vegetation experiment under plants

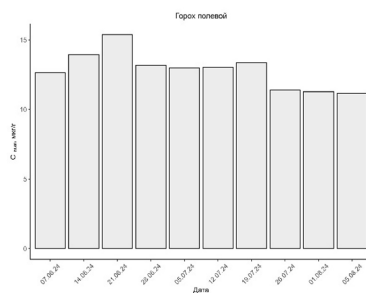
Культуры	Эмиссия CO_2 , г $\text{C}/\text{M}^2\cdot\text{ч}$									
Дата	07.06.2024	14.06.2024	21.06.2024	28.06.2024	05.07.2024	12.07.2024	19.07.2024	26.07.2024	01.08.2024	05.08.2024
Редька масличная	0,112	0,394	0,731	0,185	0,251	0,344	0,237	0,188	0,166	0,366
Рапс яровой	0,085	0,513	0,944	0,174	0,229	0,297	0,280	0,200	0,220	0,240
Вика	0,083	0,620	1,113	0,159	0,241	0,395	0,338	0,360	0,308	0,429
Фацелия	0,047	0,474	0,854	0,184	0,242	0,390	0,481	0,534	0,449	0,303
Горох полевой	0,050	0,295	0,506	0,124	0,207	0,269	0,224	0,147	0,123	0,239
Ячмень яровой	0,094	0,514	0,924	0,131	0,190	0,244	0,268	0,265	0,282	0,182
Горох посевной	0,097	0,552	0,979	0,146	0,240	0,353	0,401	0,393	0,339	0,190
Овес	0,095	0,354	0,627	0,187	0,237	0,339	0,239	0,164	0,191	0,349
Горчица белая	0,089	1,026	1,783	0,155	0,234	0,312	0,292	0,195	0,189	0,267
Горчица сарептская	0,055	0,896	1,701	0,194	0,298	0,497	0,329	0,294	0,258	0,309

Наиболее подвижной фракцией углерода, отражающей состояние микробного сообщества, является углерод микробной биомассы. В ходе вегетационного эксперимента содержание углерода микробной биомассы определяли методом субстрат-индуцированного дыхания. Результаты представлены на рис. 1.

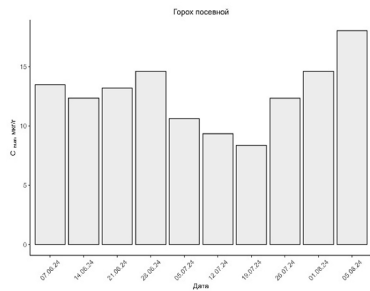
А



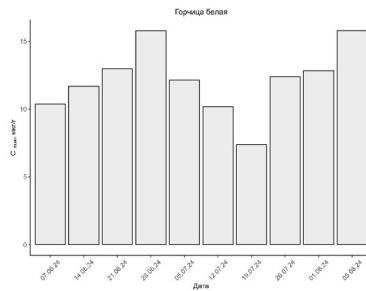
Б



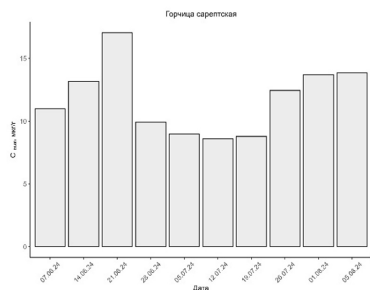
В



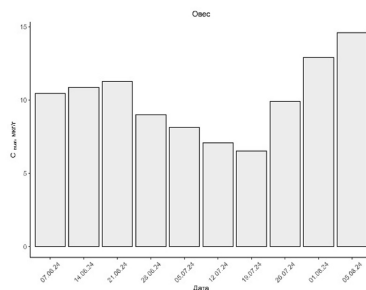
Г



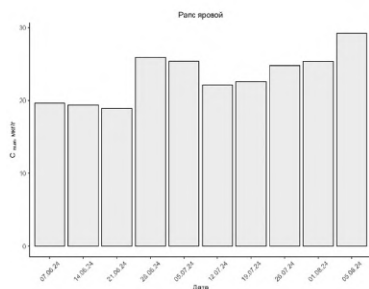
Д



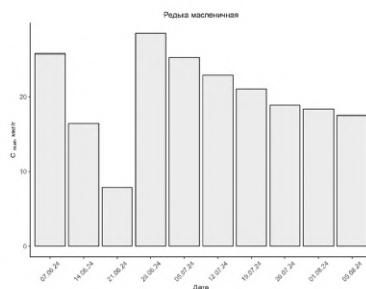
Е



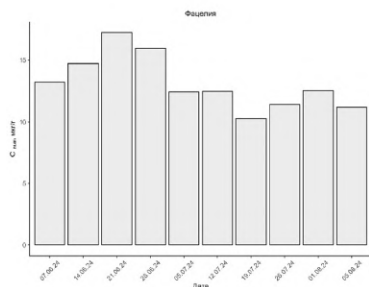
Ж



З



И



К

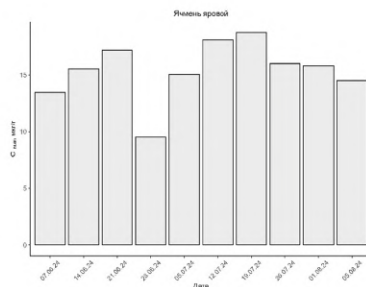


Рис. 1. Изменение содержания углерода микробной биомассы в почве под растениями-сидератами в динамике вегетационного эксперимента (А – вика, Б – горох полевой, В – горох посевной, Г – горчица белая, Д – горчица сарептская, Е – овес, Ж – рапс яровой, З – редька масличная, Ж – фацелия, З – ячмень яровой).

Fig. 1. Changes in the carbon content of microbial biomass in the soil under green manure crops over the course of a growing season experiment (A – vetch, B – field peas, C – garden peas, D – white mustard, E – Sarepta mustard, F – oats, G – spring rapeseed, H – oil radish, I – phacelia, J – spring barley).

Показано, что почвы, на которых проводился эксперимент, характеризуются невысоким содержанием микробной биомассы – от 6,5 до 33,5 мкг С/г. В большинстве вариантов к концу эксперимента отмечено либо значительное увеличение содержания углерода микробной биомассы (горох посевной, горчица белая, овес), либо отсутствие достоверных изменений (горох полевой, горчица сарептская, рапс яровой, редька масличная, фацелия, ячмень яровой) ($p > 0,05$). На последнем этапе (16 августа 2024 г.), через два месяца после заделки сидератов, были отобраны пробы почвы для определения агрохимических показателей (табл. 3).

Таблица 3.

**Агрохимические характеристики почвы после окончания
мелкоделяночного эксперимента**

**Table 3. Agrochemical Characteristics of the Soil Following the Completion
of the Small-Plot Experiment**

Культуры	ЕКО, мг*экв/100 г	pH	ЕС, мкСм/см	С, %	N, %	К, мг/кг	Р, мг/кг	Влажность, %	ГМС
Редька масличная	10,20 ±1,20	7,28± 0,20	79,50± 7,5	36,25± 0,34	1,34± 0,02	162± 15	60± 5	8,12± 0,50	песчаный суглинок
Рапс яровой	32,00 ±2,50	7,38± 0,30	79,90± 6,1	37,13± 0,24	1,05± 0,01	143± 11	71± 3	8,33± 0,24	песчаный суглинок
Вика	23,20 ±2,45	7,25± 0,15	58,60± 5,5	40,54± 0,61	1,94± 0,02	144± 12	59± 4	8,95± 0,21	песчаный суглинок
Фацелия	37,00± 4,01	7,20± 0,20	57,80± 6,4	36,22± 0,29	1,68± 0,09	185± 17	66± 5	7,54± 0,50	песчаный суглинок
Горох полевой	24,80± 2,08	7,01± 0,30	36,50± 4,1	35,77± 0,37	1,51± 0,05	149± 21	62± 6	7,01± 0,31	песчаный суглинок
Ячмень яровой	19,40± 1,85	7,14± 0,20	62,50± 5,9	34,27± 0,36	1,86± 0,07	164± 17	59± 5	7,30± 0,34	песчаный суглинок
Горох посевной	15,40± 2,00	7,06± 0,15	38,70± 3,2	35,34± 0,51	1,16± 0,05	131± 10	62± 4	9,85± 0,16	песчаный суглинок
Овес	42,80± 3,78	7,04± 0,30	47,40± 5,0	29,56± 0,29	1,21± 0,06	170± 15	65± 3	9,63± 0,17	песчаный суглинок
Горчица белая	11,20± 1,23	6,90± 0,40	43,20± 2,7	33,94± 0,37	1,39± 0,05	146± 14	62± 6	11,61± 0,05	песчаный суглинок
Горчица сарептская	30,20± 2,56	7,15± 0,30	48,00± 4,6	25,31± 0,25	1,27± 0,02	139± 11	54± 3	8,41± 0,05	песчаный суглинок

К концу мелкоделяночного эксперимента влажность почвы во всех вариантах изменялась в диапазоне 7-11,6 %. Выращивание растений-сидератов с последующей запашкой в почву не привело к изменению pH почвы (6,9-7,4), однако было зафиксировано снижение ёмкости катионного обмена и электропроводности, а также достоверное увеличение содержания в почве органического углерода (на 2–23%), азота (на 3–27%), калия (на 6–42%) и фосфора (на 6–28%) ($p < 0,05$). Ожидается, что наибольшим увеличением азота характеризовались варианты, в которых выращивались растения, относящиеся к семейству Бобовые (вика, горох полевой, горох посевной), способные формировать корневые клубеньки, в которых обитают азотфиксирующие бактерии рода *Rhizobium*, что позволяет им эффективно фиксировать атмосферный азот и обогащать почву.

Кроме агрохимических показателей была оценена эмиссия CO_2 за счет респираторной активности почвенного микробного сообщества (рис. 2) и содержания микробной биомассы (рис.3). Установлено, что к августу почвенная респираторная активность оказалась существенно ниже, чем в вегетационный период, и варьировала в пределах 0,05–0,11 г $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{ч}$, а микробная биомасса, наоборот, увеличилась и составила от 11 до 17 мкг/г, что, вероятно, связано с поступлением растительных остатков.

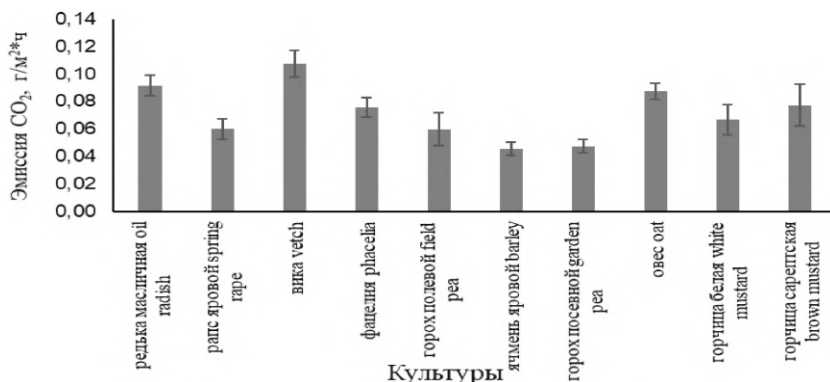


Рис. 2. Эмиссия CO_2 за счет респираторной активности почвы, отобранной 16.08.2024

Fig. 2. CO_2 emissions resulting from soil respiration in a soil sample collected on August 16, 2024

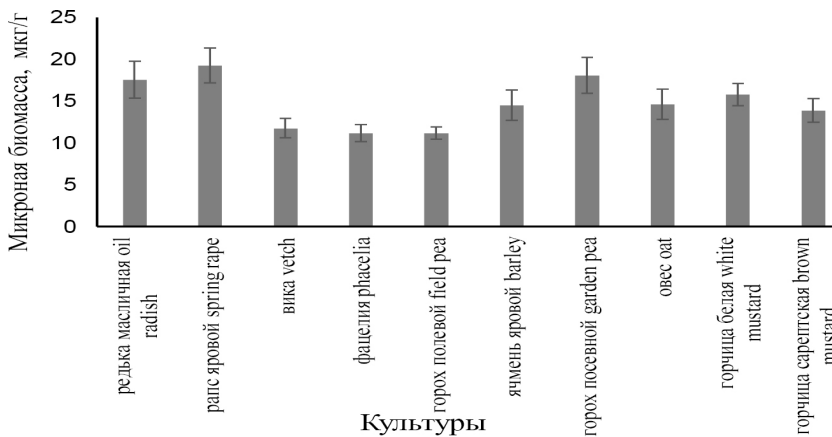


Рис. 3. Содержание микробной биомассы в почве, отобранной 16.08.2024

Fig. 3. Microbial biomass content in soil samples collected on August 16, 2024

На основе полученных экспериментальных данных была предпринята попытка оценить эффективность каждого из растений-сидератов с точки зрения улавливания CO_2 из атмосферы.

Для этого была определена кумулятивная эмиссия CO_2 для почвы под каждым видом растения за период его вегетации, на основании данных о количестве растений на 1 м^2 , биомассе одного растения и содержании в фитомассе углерода, было рассчитано количество углерода, зафиксированное в фитомассе растений, которое впоследствии было запахано в почву.

Показано, что наибольшей кумулятивной эмиссией CO_2 характеризовались почва по викой ($637 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$), фацелией ($635 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$), горчицей белой ($733 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$) и горчицей сарептской ($781 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$), наименьшей – по горохом полевым ($343 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$) и овсом ($429 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$) (рис. 4).

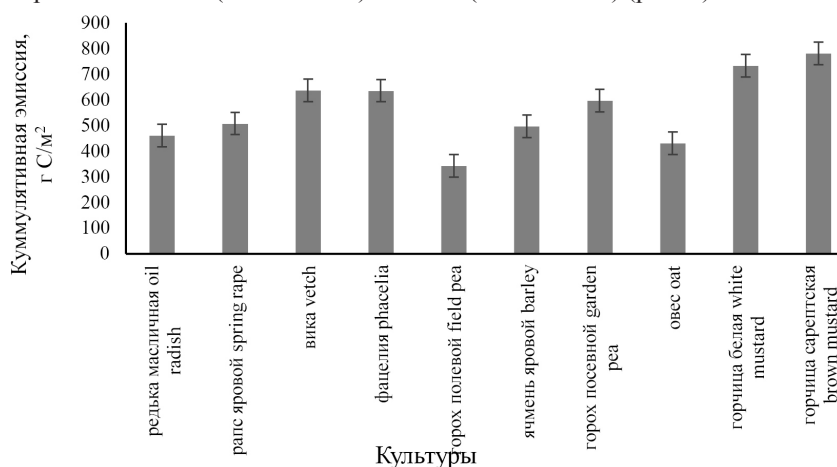


Рис. 4. Кумулятивная эмиссия CO_2 из почвы за период проведения мелкоделяночного эксперимента

Fig. 4. Cumulative CO_2 emissions from the soil during the small-plot experiment

На протяжении всего мелкоделяночного эксперимента горох полевой, горох посевной, ячмень яровой, овес характеризовались высокой фитомассой и большим количеством растений на 1 м^2 , что позволило им зафиксировать максимальное количество углерода в пересчете на гектар: 6606 кгC/га , 10868 кгC/га , 3537 кгC/га , 5716 кгC/га , соответственно (табл. 4). Стоит отметить, что, не смотря на высокую фитомассу, выращивание редьки масличной привело к невысокому улавливанию углерода из атмосферы - 1151

кгС/га за счет меньшего количества растений на единицу площади, что сопоставимо с данными улавливания углерода для горчицы сарептской, горчицы белой и фацелии.

На следующем этапе была оценена разница между улавливанием углерода в форме CO_2 в фитомассе растений-сидератов и эмиссией CO_2 за счет почвенного дыхания в динамике эксперимента (табл. 5). Отрицательные значения показывают преобладание процессов фиксации углерода в фитомассе, что возможно при невысокой респираторной активности почвенного микробного сообщества и высокой фитомассе растений.

Показано, что на протяжении всего вегетационного эксперимента горох полевой характеризовался преобладанием процесса фиксации атмосферного углерода, суммарное количество составило - 3179 кгС/га, что соответствует улавливанию 11656 кг CO_2 /га.

Таким образом, в условиях мелкоделяночного эксперимента показано, что оптимальным растением-сидератом, с точки зрения улавливания парниковых газов, в частности атмосферного CO_2 , является горох полевой, выращивание которого привело к улавливанию 3179 кгС/га, а запашка его фитомассы привела к увеличению содержания С в почве на 1,3 %, N – на 8 %, К – на 14 %, Р – на 42 %.

Таблица 4.

Количество углерода, зафиксированное в фитомассе растений-сидератов в динамике мелкоделяночного эксперимента

Table 4. Amount of carbon sequestered in the plant biomass of green manure crops over the course of a small-plot experiment

Культуры	Количество С, зафиксированного в фитомассе, кг/га									
	07.06.2024	14.06.2024	21.06.2024	28.06.2024	05.07.2024	12.07.2024	19.07.2024	26.07.2024	01.08.2024	05.08.2024
Редька масличная	42	129	242	188	759	1990	3149	1167	1278	1151
Рапс яровой	168	234	157	414	983	1512	1996	3268	3797	0
Вика	0	131	237	357	541	782	1005	715	1138	765
Фацелия	0	40	67	466	543	1021	1383	997	1821	2013
Горох полевой	0	715	1082	2627	3368	5601	7920	5631	8608	6606
Ячмень яровой	204	879	964	1712	1261	1844	2394	2689	3919	3537
Горох посевной	186	1043	1165	4394	5419	10575	9776	10022	13464	10868
Овес	244	1240	1342	2379	1873	3131	2988	2938	4914	5716
Горчица белая	226	393	347	180	201	406	534	749	1144	1357
Горчица сарептская	233	570	581	251	280	503	657	1187	1506	1974

Таблица 5.

**Разница между количеством углерода, зафиксированный
в фитомассе растений-сидератов и эмиссией углерода в форме CO₂
за счет почвенного дыхания**

**Table 5. Difference between the amount of carbon sequestered in the biomass of green manure
plants and carbon emissions in the form of CO₂ due to soil respiration**

Культуры	Разница между эмиссией и улавливанием CO ₂ в фитомассе, кгC/га								
	14.06.2024	21.06.2024	28.06.2024	05.07.2024	12.07.2024	19.07.2024	26.07.2024	01.08.2024	05.08.2024
Редька масличная	297	1128	1953	1749	1017	346	2685	2872	3445
Рапс яровой	269	1569	2252	2021	1934	1935	1066	890	5073
Вика	459	1810	2758	2911	3204	3597	4473	4611	5603
Фацелия	397	1487	1960	2241	2293	2663	3902	3904	4343
Горох полевой	-426	-119	-1134	-1597	-3430	-5335	-2734	-5485	-3179
Ячмень яровой	-368	755	892	1613	1395	1275	1427	657	1428
Горох посевной	-498	666	-1618	-2319	-6976	-5544	-5123	-7950	-4909
Овес	-862	-141	-494	367	-407	222	611	-1068	-1416
Горчица белая	544	2949	4744	5050	5303	5683	5877	5805	5974
Горчица сарептская	229	2400	4322	4706	5151	5691	5684	5829	5837

Заключение

1. Проведен мелкоделяночный эксперимент по выращиванию 10 видов растений-сидератов (редька масличная, рапс яровой, вика, фацелия, горох полевой, ячмень яровой, горох посевной, овес, горчица белая, горчица сарептская) с целью оценки их эффективности в улавливания CO₂ из атмосферы.

2. Максимальный прирост наземной и корневой биомассы (от 9 до 672%) наблюдался на 14–42 сутки эксперимента (с 14 июня по 12 июля 2024 г.) После 49 суток прирост наземной и корневой биомассы не превышал 86%. Наибольшим средним приростом характеризовались фацелия (112%), редька масличная (66%) и горох посевной (73%).

3. Показано, что в зависимости от продолжительности мелкоделяночного эксперимента, растения-сидераты способны фиксировать в своей биомассе от 40 до 13464 кгC/га. Максимальное поглощение CO₂ отмечалось у гороха посевного (10 022–13 464 кг C/га), минимальное – у вики (765 кг C/га). Содержание углерода в фитомассе в начале вегетационного периода было минимальным (24–46%). После 14-х суток эксперимента, содержание углерода в фитомассе растений-сидератов достоверно не изменялось и составило для ячменя ярового (33-51 %), фацелии (34-50 %),

гороха полевого (39-58 %), рапса ярового (35-56 %), вики яровой (40-55 %), горчицы сарептской (39-54 %), горчицы белой (37-54 %), редьки масличной (36-51 %), овса ярового (33-51 %) и гороха посевного (33-51 %) по срокам вегетации в мелкоделяночном эксперименте ($p>0,05$).

4. Выращивание растений-сидератов на серой лесной почве Поволжья с последующей запашкой увеличило содержание органического углерода (на 2–23%), азота (на 3–27%), калия (на 6–42%) и фосфора (на 6–28%), снизило емкость катионного обмена и электропроводность, но не привело к достоверному изменению pH почвы ($p>0,05$).

5. Запашка растений-сидератов способствовала увеличению микробной биомассы с 11 до 17 мкг/г, в то время как респираторная активность почвы в конце сезона снизилась до 0,05–0,11 г С/м²*ч из-за низкой влажности почвы и невысокой температуры окружающей среды.

6. Расчет эмиссии и улавливания CO₂ показал, что при выращивании редьки масличной, рапса ярового, вики, фацелии, ячменя ярового, горчицы белой и горчицы сарептской преобладают процессы эмиссии CO₂ в атмосферу, тогда как возделывание гороха полевого, гороха посевного и овса характеризуется преобладанием процессов фиксации CO₂ в фитомассе.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Список литературы

1. Белоусов, А. А., & Белоусова, Е. Н. (2023). Влияние предшественников на скорость продуцирования углекислого газа и содержание углерода микробной биомассы чернозема обыкновенного Красноярской лесостепи. В сборнике: *Современные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии* (стр. 24–31). Дальневосточный государственный аграрный университет. <https://doi.org/10.22450/9785964205609>. EDN: <https://elibrary.ru/BCPQFS>
2. ГОСТ 17.4.4.02-2017. (2018). *Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа* (с. 1–9). Стандартинформ.
3. ГОСТ 26423-85. (2011). *Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки* (с. 1–8). Стандартинформ.

4. ГОСТ 5180-2015. (2016). *Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик* (с. 1–23). Стандартиформ.
5. ГОСТ Р 54650-2011. (2013). *Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО* (с. 1–12). Стандартиформ.
6. Гребенюк, К. В. (2021). Анализ эффективности применения сидератов по системе No-till для северного региона Казахстана. *Научно-технический вестник: технические системы в АПК*, 2(10), 61–69. EDN: <https://elibrary.ru/KWRUBP>
7. Делаев, У. А., Зузиев, У. Г., & Шишхаев, И. Я. (2017). Фиксация атмосферного азота в зависимости от почвенно-климатических условий. В сборнике: *Материалы 6 Ежегодной итоговая конференции профессорско-преподавательского состава чеченского государственного университета* (стр. 209–212). Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова.
8. Дополнительные материалы. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/19Qgtp5pV-JP-LyeZCIGiDjdWn14rZqSx?usp=sharing> (дата обращения: 12.11.2025).
9. Карелин, Д. В., Замолотчиков, Д. Г., & Краев, Г. Н. (2015). *Методическое руководство по анализу эмиссий углерода из почв поселений в тундре*. ЦЭПЛ РАН. 64 с. ISBN: 978-5-9905012-1-8. EDN: <https://elibrary.ru/ZTISOF>
10. Каримова, Е. Р., & Худайгулов, Г. Г. (2018). Изучение влияния биопрепарата на основе клубеньковых бактерий *Rhizobium lupini* на бобовые и злаковые культуры. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: пищевые и биотехнологии*, 6(2), 52–57. <https://doi.org/10.14529/food180207>. EDN: <https://elibrary.ru/XRSXAL>
11. Каюгина, С. М., & Ерёмин, Д. И. (2022). Вариабельность физико-химических свойств тёмно-серых лесных почв Северного Зауралья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 96(4), 13–18. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-13-18>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBNTZC>
12. Кулачкова, С. А., Деревенец, Е. Н., Сорокин, А. С., & Пронина, В. В. (2025). Потоки парниковых газов и секвестрация углерода в агроэкосистемах с сидератами и многолетними травами на карбоновом полигоне «Чашниково». *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*, 80(3), 7–21. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-7-21>. EDN: <https://elibrary.ru/DAOUWZ>
13. Курынцева, П. А., Галиева, Г. Ш., Галицкая, П. Ю., Степанова, Н. Ю., & Селивановская, С. Ю. (2023). Влияние температурного режима на эффективность улавливания CO₂ из атмосферного воздуха и фиксацию его в биомассе гороха посевного (*Pisum sativum*). *Вестник Казанского государственного аграрно-*

- го университета, 4(72), 24–29. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-24-29>. EDN: <https://elibrary.ru/DXBHCK>
14. Лазарев, Н. Н., Кухаренкова, О. В., Авдеев, С. М., Куренкова, Е. М., & Дикарева, С. А. (2022). Симбиотическая фиксация азота многолетними бобовыми травами в луговых агрофитоценозах. *Кормопроизводство*, (2), 20–28. <https://doi.org/10.25685/krm.2022.2.2022.002>. EDN: <https://elibrary.ru/BPHMZE>
 15. Люлин, Д. А., & Арефьев, А. Н. (2023). Изменение содержания подвижных форм фосфора и калия в серой лесной почве под влиянием диатомита и двукратного внесения птичьего помета. В сборнике: *Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации* (стр. 159–162). Пензенский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/USYKXN>
 16. Харитонов, В. В., & Шахов, С. С. (2016). Оценка влияния сидератов на агрохимические показатели почвы. *Агрохимический вестник*, (3), 39–43. EDN: <https://elibrary.ru/XBVKLX>
 17. Чурагулова, З. С., Латыпов, Ф. Ш., & Габделхаков, А. К. (2007). Ход роста дуба черешчатого на темно-серой лесной почве лесостепи Башкирского Предуралья. *Аграрный вестник Урала*, 4(40), 48–51. EDN: <https://elibrary.ru/IJFJVR>
 18. Azarenko, Y., Alekseeva, Z., & Zinenko, S. (2023). Assessment of fallow grey forest soils fertility in sub-taiga zone of Omsk Priirtyshye. *E3S Web of Conferences*, 462, 03042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346203042>. EDN: <https://elibrary.ru/MTYGNO>
 19. Carbon sequestration practices in eastern Netherlands. URL: https://www.eurofins-agro.com/uploads/Forage/Carbon_sequestration_practices_in_eastern_Netherlands.pdf (дата обращения: 22.10.2025).
 20. Šapek, P., Starke, R., Hofmockel, K. S., Bond-Lamberty, B., & Hess, N. (2019). Apparent temperature sensitivity of soil respiration can result from temperature driven changes in microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.016>. EDN: <https://elibrary.ru/SNMXZV>
 21. Common Vetch (*Vicia sativa*): Mississippi State University Extension Service. URL: <https://extension.msstate.edu/agriculture/forages/legumes/common-vetch-vicia-sativa> (дата обращения: 22.10.2025).
 22. Dacal, M., Bradford, M. A., Plaza, C., Maestre, F. T., & García-Palacios, P. (2019). Soil microbial respiration adapts to ambient temperature in global drylands. *Nature Ecology & Evolution*, 3(2), 232. <https://doi.org/10.1038/S41559-018-0770-5>. EDN: <https://elibrary.ru/JSKVRA>
 23. de Vries, F. T., Williams, A., Stringer, F., Willcocks, R., McEwing, R., Langridge, H., & Straathof, A. L. (2019). Changes in root-exudate-induced respiration reveal a

- novel mechanism through which drought affects ecosystem carbon cycling. *The New Phytologist*, 224(1), 132. <https://doi.org/10.1111/NPH.16001>. EDN: <https://elibrary.ru/MBRJXU>
24. Dieleman, W. I. J., Vicca, S., Dijkstra, F. A., Hagedorn, F., Hovenden, M. J., Larsen, K. S., Morgan, J. A., Volder, A., Beier, C., Jeffrey, S. D., King, J., Leuzinger, S., Linder, S., Luo, Y., Oren, R., Angelis, De P., Tingey, D., Hoosbeek, M. R., & Janssens, I. A. (2012). Simple additive effects are rare: a quantitative review of plant biomass and soil process responses to combined manipulations of CO₂ and temperature. *Global Change Biology*, 18(9), 2681–2693. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02745.x>
25. Frasier, I., Noellemeyer, E., Fernández, R., & Quiroga, A. (2016). Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX*, 3, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2016.08.002>
26. Hamdi, S., Moyano, F., Sall, S., Bernoux, M., & Chevallier, T. (2013). Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 115–126. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2012.11.012>. EDN: <https://elibrary.ru/RMGLEJ>
27. ISO 13320:2020. (2020). *Particle size analysis — Laser diffraction methods* (pp. 1–59). International standart.
28. ISO 16072:2002. (2002). *Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration* (pp. 1–11). International standart.
29. Kayugina, S. M., & Eremin, D. E. (2022). Physicochemical properties of gray forest soils on the eastern outskirts of the Trans-Ural Plateau. *Journal of Siberian Federal University — Biology*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
30. Kostin, A. S., Krechetov, P. P., Chernitsova, O. V., & Terskaya, E. V. (2021). Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin. *Data in Brief*, 35, 106817. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>. EDN: <https://elibrary.ru/OHXBLG>
31. Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
32. Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3), 315. <https://doi.org/10.2307/2389824>
33. Meyer, N., Welp, G., & Amelung, W. (2018). The temperature sensitivity (Q₁₀) of soil respiration: controlling factors and spatial prediction at regional scale based on

- environmental soil classes. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(2), 306–323. <https://doi.org/10.1002/2017GB005644>. EDN: <https://elibrary.ru/YEQNZZ>
34. Osipova, R. A., Gilyazov, M. Y., Kuzhamberdieva, S. Z., & Abzhalelov, B. B. (2020). Impact of oil contamination of grey forest soil on its nutrient status and plant safety. *BIO Web of Conferences*, 27, 00046. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700046>. EDN: <https://elibrary.ru/FSOISI>
35. Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
36. Rios, J. D.L., Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Taube, F., & Loges, R. (2022). Integrating crop-livestock system practices in forage and grain-based rotations in Northern Germany: potentials for soil carbon sequestration. *Agronomy*, 12, 338. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020338>. EDN: <https://elibrary.ru/OIGXSH>
37. Roth, P. J., Lehtndorff, E., Brodowski, S., Bornemann, L., Sanchez-García, L., Gustafsson, Ö., & Amelung, W. (2012). Differentiation of charcoal, soot and diagenetic carbon in soil: Method comparison and perspectives. *Organic Geochemistry*, 46, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.01.012>. EDN: <https://elibrary.ru/PIAMDL>
38. Vasilyeva, G., Mikhedova, E., Zinnatshina, L., Strijakova, E., Akhmetov, L., Sushkova, S., & Ortega-Calvo, J.-J. (2022). Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. *Science of The Total Environment*, 850, 157952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>. EDN: <https://elibrary.ru/AWFYTX>
39. Vetch. Section 4. Plant growth and physiology. *GRDC Grownotes* (2018). URL: https://grdc.com.au/_data/assets/pdf_file/0034/370699/GrowNote-Vetch-North-04-Physiology.pdf (дата обращения: 29.10.2025).
40. Vetches: planting, pruning & winter care — Plantura. URL: <https://plantura.garden/uk/flowers-perennials/vetches/vetches-overview> (дата обращения: 29.10.2025).
41. Wang, P., Yu, A., Wang, F., Shang, Y., Wang, Y., Yin, B., Liu, Y., & Zhang, D. (2025). Mechanistic insights into farmland soil carbon sequestration: a review of substituting green manure for nitrogen fertilizer. *Agronomy*, 15(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051042>. EDN: <https://elibrary.ru/FZCNVV>
42. Xu, Y., Ding, H., Zhang, G., Li, Z., Guo, Q., Feng, H., Qin, F., Dai, L., & Zhang, Z. (2023). Green manure increases peanut production by shaping the rhizosphere bacterial community and regulating soil metabolites under continuous peanut production systems. *BMC Plant Biology*, 23(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04079-0>. EDN: <https://elibrary.ru/XGKHDO>
43. Zhang, J., Liu, S., Liu, C., Wang, H., Luan, J., Liu, X., Guo, X., & Niu, B. (2021). Different mechanisms underlying divergent responses of autotrophic and heterotro-

- phic respiration to long-term throughfall reduction in a warm-temperate oak forest. *Forest Ecosystems*, 8(1), 41. <https://doi.org/10.1186/S40663-021-00321-Z>. EDN: <https://elibrary.ru/IZETLX>
44. Zhang, Z., Li, Y., Williams, R. A., Chen, Y., Peng, R., Liu, X., Qi, Y., & Wang, Z. (2023). Responses of soil respiration and its sensitivities to temperature and precipitation: A meta-analysis. *Ecological Informatics*, 75, 102057. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102057>. EDN: <https://elibrary.ru/UWOTCT>
45. Zhao, C., Miao, Y., Yu, C., Zhu, L., Wang, F., Jiang, L., Hui, D., & Wan, S. (2016). Soil microbial community composition and respiration along an experimental precipitation gradient in a semiarid steppe. *Scientific Reports*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep24317>

References

1. Belousov, A. A., & Belousova, E. N. (2023). Influence of predecessors on the rate of carbon dioxide production and microbial biomass carbon content of ordinary chernozem of the Krasnoyarsk forest-steppe. In *Modern problems of soil science, agrochemistry and ecology* (pp. 24–31). Far Eastern State Agrarian University. <https://doi.org/10.22450/9785964205609>. EDN: <https://elibrary.ru/BCPQFS>
2. GOST 17.4.4.02-2017. (2018). *Nature protection. Soils. Methods of sampling and sample preparation for chemical, bacteriological, helminthological analysis* (pp. 1–9). Standartinform.
3. GOST 26423-85. (2011). *Soils. Methods for determination of specific electrical conductivity, pH and dense residue of water extract* (pp. 1–8). Standartinform.
4. GOST 5180-2015. (2016). *Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics* (pp. 1–23). Standartinform.
5. GOST R 54650-2011. (2013). *Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Kirsanov method as modified by TsINAO* (pp. 1–12). Standartinform.
6. Grebenyuk, K. V. (2021). Analysis of the effectiveness of using green manure crops under the No-till system for the northern region of Kazakhstan. *Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in Agribusiness*, 2(10), 61–69. EDN: <https://elibrary.ru/KWRUBP>
7. Delaev, U. A., Zuziev, U. G., & Shishkhaev, I. Ya. (2017). Atmospheric nitrogen fixation depending on soil and climatic conditions. In *Proceedings of the 6th Annual Final Conference of the Teaching Staff of the Chechen State University* (pp. 209–212). Chechen State University named after Akhmat Abdulhamidovich Kadyrov.
8. Supplementary materials. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/19Qgtp-5pV-JP-LyeZCIGiDjdWn14rZqSx?usp=sharing> (accessed: 12.11.2025).

9. Karelin, D. V., Zamolodchikov, D. G., & Kraev, G. N. (2015). *Methodological guide for the analysis of carbon emissions from settlement soils in the tundra*. Center for Forest Ecology and Production of the Russian Academy of Sciences. 64 p. ISBN: 978-5-9905012-1-8. EDN: <https://elibrary.ru/ZTISOF>
10. Karimova, E. R., & Khudaygulov, G. G. (2018). Study of the effect of a biological preparation based on nodule bacteria *Rhizobium lupini* on leguminous and cereal crops. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 6(2), 52–57. <https://doi.org/10.14529/food180207>. EDN: <https://elibrary.ru/XRSXAL>
11. Kayugina, S. M., & Eremin, D. I. (2022). Variability of physicochemical properties of dark gray forest soils of the Northern Trans-Urals. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 96(4), 13–18. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-13-18>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBNTZC>
12. Kulachkova, S. A., Derevenets, E. N., Sorokin, A. S., & Pronina, V. V. (2025). Greenhouse gas fluxes and carbon sequestration in agroecosystems with green manure crops and perennial grasses at the carbon polygon “Chashnikovo.” *Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*, 80(3), 7–21. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-7-21>. EDN: <https://elibrary.ru/DAOUWZ>
13. Kuryntseva, P. A., Galieva, G. Sh., Galitskaya, P. Yu., Stepanova, N. Yu., & Selivanovskaya, S. Yu. (2023). Influence of temperature regime on the efficiency of CO₂ capture from atmospheric air and its fixation in the biomass of garden pea (*Pisum sativum*). *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*, 4(72), 24–29. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-24-29>. EDN: <https://elibrary.ru/DXBHCK>
14. Lazarev, N. N., Kukharenskova, O. V., Avdeev, S. M., Kurenkova, E. M., & Dikareva, S. A. (2022). Symbiotic nitrogen fixation by perennial leguminous grasses in meadow agrophytocenoses. *Fodder Production*, (2), 20–28. <https://doi.org/10.25685/krm.2022.2.2022.002>. EDN: <https://elibrary.ru/BPHMZE>
15. Lyulin, D. A., & Arefiev, A. N. (2023). Changes in the content of mobile forms of phosphorus and potassium in gray forest soil under the influence of diatomite and double application of poultry manure. In *Regional problems of sustainable development of the agro-industrial complex under conditions of digital transformation* (pp. 159–162). Penza State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/USYKXN>
16. Kharitonov, V. V., & Shakhov, S. S. (2016). Assessment of the effect of green manure crops on agrochemical soil indicators. *Agrochemical Herald*, (3), 39–43. EDN: <https://elibrary.ru/XBVKLX>
17. Churagulova, Z. S., Latypov, F. Sh., & Gabelkhakov, A. K. (2007). Growth dynamics of pedunculate oak on dark gray forest soil of the forest-steppe of the Bashkir Cis-Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 4(40), 48–51. EDN: <https://elibrary.ru/IJFJVR>

18. Azarenko, Y., Alekseeva, Z., & Zinenko, S. (2023). Assessment of fallow grey forest soils fertility in sub-taiga zone of Omsk Priirtyshye. *E3S Web of Conferences*, 462, 03042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346203042>. EDN: <https://elibrary.ru/MTYGNO>
19. Carbon sequestration practices in eastern Netherlands. URL: https://www.eurof-ins-agro.com/uploads/Forage/Carbon_sequestration_practices_in_eastern_Netherlands.pdf (дата обращения: 22.10.2025).
20. Čapek, P., Starke, R., Hofmockel, K. S., Bond-Lamberty, B., & Hess, N. (2019). Apparent temperature sensitivity of soil respiration can result from temperature driven changes in microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 286–293. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2019.05.016>. EDN: <https://elibrary.ru/SNMXZV>
21. Common Vetch (*Vicia sativa*): Mississippi State University Extension Service. URL: <https://extension.msstate.edu/agriculture/forages/legumes/common-vetch-vicia-sativa> (дата обращения: 22.10.2025).
22. Dacal, M., Bradford, M. A., Plaza, C., Maestre, F. T., & García-Palacios, P. (2019). Soil microbial respiration adapts to ambient temperature in global drylands. *Nature Ecology & Evolution*, 3(2), 232. <https://doi.org/10.1038/S41559-018-0770-5>. EDN: <https://elibrary.ru/JSKVRA>
23. de Vries, F. T., Williams, A., Stringer, F., Willcocks, R., McEwing, R., Langridge, H., & Straathof, A. L. (2019). Changes in root-exudate-induced respiration reveal a novel mechanism through which drought affects ecosystem carbon cycling. *The New Phytologist*, 224(1), 132. <https://doi.org/10.1111/NPH.16001>. EDN: <https://elibrary.ru/MBRJXU>
24. Dieleman, W. I. J., Vicca, S., Dijkstra, F. A., Hagedorn, F., Hovenden, M. J., Larsen, K. S., Morgan, J. A., Volder, A., Beier, C., Jeffrey, S. D., King, J., Leuzinger, S., Linder, S., Luo, Y., Oren, R., Angelis, De P., Tingey, D., Hoosbeek, M. R., & Janssens, I. A. (2012). Simple additive effects are rare: a quantitative review of plant biomass and soil process responses to combined manipulations of CO₂ and temperature. *Global Change Biology*, 18(9), 2681–2693. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02745.x>
25. Frasier, I., Noellemeier, E., Fernández, R., & Quiroga, A. (2016). Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX*, 3, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2016.08.002>
26. Hamdi, S., Moyano, F., Sall, S., Bernoux, M., & Chevallier, T. (2013). Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 115–126. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2012.11.012>. EDN: <https://elibrary.ru/RMGLEJ>

-
27. ISO 13320:2020. (2020). *Particle size analysis — Laser diffraction methods* (pp. 1–59). International standard.
 28. ISO 16072:2002. (2002). *Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration* (pp. 1–11). International standard.
 29. Kayugina, S. M., & Eremin, D. E. (2022). Physicochemical properties of gray forest soils on the eastern outskirts of the Trans-Ural Plateau. *Journal of Siberian Federal University — Biology*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
 30. Kostin, A. S., Krechetov, P. P., Chernitsova, O. V., & Terskaya, E. V. (2021). Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin. *Data in Brief*, 35, 106817. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>. EDN: <https://elibrary.ru/OHXBLG>
 31. Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
 32. Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3), 315. <https://doi.org/10.2307/2389824>
 33. Meyer, N., Welp, G., & Amelung, W. (2018). The temperature sensitivity (Q10) of soil respiration: controlling factors and spatial prediction at regional scale based on environmental soil classes. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(2), 306–323. <https://doi.org/10.1002/2017GB005644>. EDN: <https://elibrary.ru/YEQNZZ>
 34. Osipova, R. A., Gilyazov, M. Y., Kuzhamberdieva, S. Z., & Abzhalelov, B. B. (2020). Impact of oil contamination of grey forest soil on its nutrient status and plant safety. *BIO Web of Conferences*, 27, 00046. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700046>. EDN: <https://elibrary.ru/FSOISI>
 35. Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops — A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
 36. Rios, J. D.L., Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Taube, F., & Loges, R. (2022). Integrating crop-livestock system practices in forage and grain-based rotations in Northern Germany: potentials for soil carbon sequestration. *Agronomy*, 12, 338. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020338>. EDN: <https://elibrary.ru/OIGXSH>
 37. Roth, P. J., Lehnendorff, E., Brodowski, S., Bornemann, L., Sanchez-García, L., Gustafsson, Ö., & Amelung, W. (2012). Differentiation of charcoal, soot and diagenetic carbon in soil: Method comparison and perspectives. *Organic Geochemistry*, 46, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.01.012>. EDN: <https://elibrary.ru/PIAMDL>

38. Vasilyeva, G., Mikhedova, E., Zinnatshina, L., Strijakova, E., Akhmetov, L., Su-shkova, S., & Ortega-Calvo, J.-J. (2022). Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. *Science of The Total Environment*, 850, 157952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>. EDN: <https://elibrary.ru/AWFYTX>
39. Vetch. Section 4. Plant growth and physiology. *GRDC Grownotes* (2018). URL: https://grdc.com.au/__data/assets/pdf_file/0034/370699/GrowNote-Vetch-North-04-Physiology.pdf (дата обращения: 29.10.2025).
40. Vetches: planting, pruning & winter care — Plantura. URL: <https://plantura.garden/uk/flowers-perennials/vetches/vetches-overview> (дата обращения: 29.10.2025).
41. Wang, P., Yu, A., Wang, F., Shang, Y., Wang, Y., Yin, B., Liu, Y., & Zhang, D. (2025). Mechanistic insights into farmland soil carbon sequestration: a review of substituting green manure for nitrogen fertilizer. *Agronomy*, 15(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051042>. EDN: <https://elibrary.ru/FZCNVV>
42. Xu, Y., Ding, H., Zhang, G., Li, Z., Guo, Q., Feng, H., Qin, F., Dai, L., & Zhang, Z. (2023). Green manure increases peanut production by shaping the rhizosphere bacterial community and regulating soil metabolites under continuous peanut production systems. *BMC Plant Biology*, 23(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04079-0>. EDN: <https://elibrary.ru/XGKHDO>
43. Zhang, J., Liu, S., Liu, C., Wang, H., Luan, J., Liu, X., Guo, X., & Niu, B. (2021). Different mechanisms underlying divergent responses of autotrophic and heterotrophic respiration to long-term throughfall reduction in a warm-temperate oak forest. *Forest Ecosystems*, 8(1), 41. <https://doi.org/10.1186/S40663-021-00321-Z>. EDN: <https://elibrary.ru/IZETLX>
44. Zhang, Z., Li, Y., Williams, R. A., Chen, Y., Peng, R., Liu, X., Qi, Y., & Wang, Z. (2023). Responses of soil respiration and its sensitivities to temperature and precipitation: A meta-analysis. *Ecological Informatics*, 75, 102057. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102057>. EDN: <https://elibrary.ru/UWOTCT>
45. Zhao, C., Miao, Y., Yu, C., Zhu, L., Wang, F., Jiang, L., Hui, D., & Wan, S. (2016). Soil microbial community composition and respiration along an experimental precipitation gradient in a semiarid steppe. *Scientific Reports*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep24317>

ВКЛАД АВТОРОВ

Курынцева П.А., Селивановская С.Ю.: разработка концепции научной работы, определение методологии, написание рукописи.

Камалова А.Р., Красовская С.И., Пронович Н.А.: сбор и анализ данных, проведение исследования, статистическая обработка полученных результатов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Polina A. Kuryntseva, Svetlana Y. Selivanovskaya: development of the concept of scientific work, definition of methodology, writing of manuscript.

Alina R. Kamalova, Sof'ya I. Krasovskaya, Nataliya A. Pronovich: data collection and analysis, conducting research, statistical processing.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Курынцева Полина Александровна, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, к.б.н.

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
polinazwerewa@yandex.ru

Камалова Алина Ринатовна, младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
akhtjamovaalina07@gmail.com

Красовская Софья Игоревна, студент

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
sophia@krasovsky.me

Пронович Наталия Андреевна, научный сотрудник, аспирант

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
pronovich.natascha@yandex.ru

Селивановская Светлана Юрьевна, ведущий научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, д.б.н., профессор

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Polina A. Kuryntseva, Ph.D. in Biological Sciences, Senior Researcher at the Educational and Research Laboratory of the Center for Agro- and Ecobiotechnology
Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

polinazwerewa@yandex.ru

SPIN-code: 3916-9347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9274-7077>

ResearcherID: M-3407-2016

Scopus Author ID: 56069925000

Alina R. Kamalova, Junior Researcher at the Educational and Research Laboratory of the Center for Agro- and Ecobiotechnology

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

akhtjamovaalina07@gmail.com

SPIN-code: 2691-5682

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7857-8756>

ResearcherID: AAO-8646-2020

Scopus Author ID: 56539926700

Sof'ya I. Krasovskaya, student

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

sophia@krasovsky.me

Nataliya A. Pronovich, Research Associate, Graduate Student

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

pronovich.natascha@yandex.ru

SPIN-code: 8373-0951

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3630-0055>

ResearcherID: LLK-5183-2024

Scopus Author ID: 58824221600

Svetlana Y. Selivanovskaya, Senior Researcher at the Educational and Research Laboratory of the Center for Agro- and Ecobiotechnology, Doctor of Biological Sciences, Professor

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

SPIN-code: 4867-6900

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6379-7166>

ResearcherID: L-8851-2013

Scopus Author ID: 6603604965

Поступила 16.11.2025

После рецензирования 17.12.2025

Принята 30.12.2025

Received 16.11.2025

Revised 17.12.2025

Accepted 30.12.2025

Почвоведение / Soil Science

Научная статья

Original article

DOI: 10.12731/2658-6649-2026-18-2-1454

EDN: KHIJPD

УДК 553.611.6



Изучение влияния катионных ПАВ на гидрофильно-гидрофобные свойства бентонита Таганского месторождения

А.А. Соколов, Р.В. Симонов, С.А. Сидяков, Л.В. Переломов,
И.В. Шахкельдян, Ю.М. Атрощенко

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,
Тула, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Применение глинистых минералов для удаления органических загрязнителей из окружающей среды ограничено высокой гидрофильностью их поверхности. Эффективные сорбенты органических токсикантов с регулируемыми гидрофильно-гидрофобными свойствами могут быть получены путем модификации поверхности глин сурфактантами.

Цель – изучить зависимость между количеством использованного для модификации природного бентонита Таганского месторождения катионного поверхностно-активного вещества - цетилтриметиламмоний бромида - и гидрофильно-гидрофобными характеристиками поверхности органоглины.

Материалы и методы. Исследуемые образцы органоглины были получены реакцией ионного обмена природного бентонита Таганского месторождения, отличающегося высоким содержанием монтмориллонита (98,5%), с цетилтриметиламмоний бромидом в воде. Для оценки гидрофильно-гидрофобных свойств были определены краевые углы смачивания водой (DSA 30, Krüss GmbH, Германия) и измерены дзета-потенциалы частиц органобентонита (Stabino II, Германия). Методом ИК-Фурье спектроскопии (ФСМ-2202, Инфраспек, Россия) изучена межслоевая конфигурация интеркалированного поверхностно-активного вещества в смектитовой глине.

Результаты. Рост содержания модификатора в органоглине вызывает уменьшение модуля отрицательных значений ζ -потенциала, а затем перезарядку частиц с тенденцией выхода кривой на плато. При этом краевой угол смачивания достигает максимальной величины ($>90^\circ$) при полном замещении катионов в бентони-

те гидрофобными катионами сурфактанта, после чего снижается. Изменения в ИК спектрах модифицированных образцов в области валентных (высокочастотное смещение полос) и деформационных (давыдовское расщепление) колебаний метиленовых групп алкиламмонийных цепей модификатора подтверждают возможность существования различных микрокристаллических фаз сурфактанта на внешней поверхности и в межслоевом пространстве бентонита. Кроме того, в ИК-спектрах органоглин снижается интенсивность всех полос ОН-групп, что свидетельствует об уменьшении гидратации поверхности.

Заключение. Жидкофазная интеркаляция катионов цетилтриметиламмония в бентонит Таганского месторождения является эффективным и простым методом приготовления модифицированных глин с регулируемыми гидрофильно-гидрофобными свойствами для применения в охране окружающей среды от органических загрязнителей.

Ключевые слова: бентонит; монтмориллонит; органоглина; цетилтриметиламмоний бромид; ИК-Фурье спектры; краевой угол; дзета-потенциал

Для цитирования. Соколов, А. А., Симонов, Р. В., Сидяков, С. А., Переломов, Л. В., Шахкельдян, И. В., & Атрошенко, Ю. М. (2026). Изучение влияния катионных ПАВ на гидрофильно-гидрофобные свойства бентонита Таганского месторождения. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 187–207. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1454>

Study of the influence of cationic surfactants on hydrophilic-hydrophobic properties of bentonite from the Tagansky deposit

A.A. Sokolov, R.V. Simonov, S.A. Sydyakov, L.V. Perelomov,
I.V. Shahkheldyan, Yu.M. Atroshchenko

Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University, Tula, Russian Federation

Abstract

Background. The use of clay minerals for removing organic pollutants from the environment is limited by the highly hydrophilic nature of their surfaces. Effective sorbents for organic toxicants with controlled hydrophilic-hydrophobic properties can be obtained by modifying the clay surface with surfactants.

Purpose – to study the relationship between the amount of cationic surfactant used for modification of natural bentonite from the Tagansky deposit - cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) - and the hydrophilic-hydrophobic characteristics of the forming organoclay surface.

Materials and methods. The studied organoclay samples were obtained by the ion exchange reaction between solution of cetyltrimethylammonium bromide and natural bentonite from the Tagansky deposit, which has a high content of montmorillonite (98.5%). To assess the hydrophilic-hydrophobic properties, the contact angles of wetting with water (DSA 30, Krüss GmbH, Germany) were determined and the zeta potentials (Stabino II, Germany) of organobentonite particles were measured. The interlayer configuration of the intercalated surfactant in smectite clay was studied using FTIR spectroscopy (FSM-2202, Infracore, Russia).

Results. An increase in the modifier concentration in organoclay leads to decrease in the modulus of negative values of the ζ -potential, and then to recharge of the particles with a tendency of potential stabilization. In this case, the contact angle reaches a maximum value ($>90^\circ$) with complete replacement of cations in bentonite with hydrophobic cations of the surfactant, after which it decreases. Changes in the FTIR spectra of modified samples in the region of valence (high-frequency shift of bands) and deformation (Davydov splitting) vibrations of methylene groups of alkylammonium chains of the modifier confirm the possibility of the existence of various microcrystalline phases of the surfactant on the outer surface and in the interlayer space of bentonite. In addition, in the FTIR spectra of organoclays, the intensity of all bands of OH groups decreases, which indicates a decrease in surface hydration.

Conclusion. Liquid-phase intercalation of cetyltrimethylammonium cations into bentonite from the Tagansky deposit is an effective and simple method for preparing modified clays with controlled hydrophilic-hydrophobic properties for use in environmental protection from organic pollutants.

Keywords: Bentonite; Montmorillonite; Organoclay; Cetyltrimethylammonium bromide; FTIR spectra; Contact angle; Zeta potential

For citation. Sokolov, A. A., Simonov, R. V., Sydyakov, S. A., Perelomov, L. V., Shakheldyan, I. V., & Atroshchenko, Yu. M. (2026). Study of the influence of cationic surfactants on hydrophilic-hydrophobic properties of bentonite from the Tagansky deposit. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 187–207. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1454>

Введение

Бентонит используется для многих целей благодаря своим уникальным свойствам, таким как большая площадь поверхности, высокая емкость катионного обмена (ЕКО), пластичность, набухаемость, биосовместимость, мукоадгезивность, хорошие механические свойства и химическая стабильность [9]. В составе промышленно добываемых бентонитовых глин доминируют набухающие глинистые минералы группы смектита (главным образом

- монтмориллонит) с отрицательно заряженными поверхностями, что обуславливает их хорошие гидрофильные свойства [17]. Однако, в ряде случаев необходимы материалы с регулируемыми гидрофильно-гидрофобными свойствами. С этой целью бентониты обычно модифицируют поверхностно-активными веществами (ПАВ), в основном – катионными, и полученные продукты называются органоглинами или органобентонитами [6]. Четвертичные алкиламмониевые соли, такие как цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ), широко используются в качестве катионных поверхностно-активных веществ для получения органобентонита. Интеркаляция катионных поверхностно-активных веществ в слои 2:1-глин, например, монтмориллонита, изменяет их поверхностные свойства с гидрофильных на гидрофобные из-за замены гидратированных катионов металлов (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и др.) между слоями катионными поверхностно-активными веществами.

Органобентониты используют в качестве адсорбентов гидрофобных органических загрязнителей [18], наполнителей в полимерных наноконкомпозитах с улучшенными механическими характеристиками [8], агентов, контролирующими реологические свойства буровых растворов [15], в красках и косметических средствах и др.

Для получения модифицированных бентонитов используются различные типы глин. Разрабатываемые в РФ бентониты, имеют сравнительно низкие концентрации монтмориллонита и соответствующие ей невысокие набухаемость, удельную поверхность и др. свойства [5]. Монтмориллонитовые глины Таганского месторождения, в которых содержание монтмориллонита достигает 95-98%, являются подходящим сырьем для синтеза модифицированных глин путем интеркаляции катионных ПАВ между глиняными слоями, что позволяет рассматривать широкий спектр их применения.

Поскольку химический и минералогический состав смектитовых глин варьируется от месторождения к месторождению, необходимы дополнительные исследования для оценки их свойств, в том числе гидрофильно-гидрофобного баланса. Гидрофобность/смачиваемость и ζ -потенциал – две важные характеристики материалов, используемые в исследованиях модификации поверхности глин. Кроме того, для выяснения межслоевой конфигурации интеркалированных поверхностно-активных веществ в смектитовой глине используют методы ИК-Фурье спектроскопии.

Целью настоящего исследования было определение взаимосвязи между количеством нанесенного на образцы природного бентонита Таганского месторождения (Республика Казахстан) катионного ПАВ - цетилтримети-

ламмоний бромида (ЦТАБ) - и гидрофильно-гидрофобными характеристиками поверхности органоглины.

Научная новизна. Изучена жидкофазная интеркаляция катиона цетилтриметиламмония в природную смектитовую глину Таганского месторождения и последующее изменение структуры и физико-химических свойств поверхности органобентонита. Установлена взаимосвязь между количеством нанесенного ПАВ и балансом гидрофильно-гидрофобных свойств. Кроме того, была выяснена межслоевая конфигурация интеркалированного поверхностно-активного вещества в смектитовой глине.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования был использован природный бентонит Таганского месторождения (Республика Казахстан). Химический состав бентонита, согласно предыдущим исследованиям [4], мас. %: SiO_2 – 66,2; Al_2O_3 – 20,8; Fe_2O_3 – 7,3; MgO – 3,2; CaO – 1,3; Na_2O – 1,2. Состав кристаллических фаз: смектит диоктаэдрический (монтмориллонит) – 98,5%, кварц – 1,5%.

Органическим модификатором для синтеза органобентонита служил катионный ПАВ – цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ). Органоглину получали по методике [7]. Навеску исходной глины измельчали и просеивали через сито 0,063 мм, после чего помещали в раствор ЦТАБ. При синтезе органоглин количество ЦТАБ бралось с учетом величины емкости катионного обмена бентонита и соответствовало следующим значениям ЕКО: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5. Емкость катионного обмена (ЕКО) бентонита, определенная методом адсорбции метиленового голубого [3], составила 88 мг-экв/100 г. Катионообменная реакция проводилась при $T = 80^\circ\text{C}$, в течение 8 часов при интенсивном перемешивании. Далее суспензию оставляли на сутки при комнатной температуре, после чего отделяли осадок центрифугированием, несколько раз отмывали его дистиллированной водой (до отрицательной реакции с раствором AgNO_3) и сушили при $T = 80^\circ\text{C}$ в течение 24 часов.

Получение ИК-спектров исследуемых образцов в таблетках КВг осуществлялось на ИК-Фурье спектрометре ФСМ-2202 (Инфраспек, Россия), в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, режим съёмки – пропускание, разрешение – 4 см^{-1} , количество сканирований – 8, аподизация Нортон-Бир средняя.

Статические краевые углы смачивания водой определяли методом лежащей капли при комнатной температуре с использованием цифрового гониометра DSA 30 (Krüss GmbH, Германия). Форма капли регистриро-

валась цифровой камерой в течении 20 с. Значения, полученные на пятой секунде сразу после падения капли на поверхность, регистрировали как краевой угол. Для каждого образца проводили не менее пяти измерений и записывали средние значения результатов. Для нанесения жидкости на поверхность образца использовали стальную иглу микрошприца диаметром 0,517 мм, объем капли – 2 мкл. Подготовка пленок образцов бентонита проводилась по видеоизмененной методике [21]. На обезжиренное ацетонном предметное стекло от микроскопа наносили 1,5 мл 1%-ной суспензии бентонита в деионизированной воде. Затем препарат сушили на воздухе в ламинарном боксе в течении двух суток при комнатной температуре. Измерения контактного угла показали хорошую воспроизводимость, о чем свидетельствуют сравнительно небольшие стандартные отклонения в диапазоне от 2° до 6°.

Дзета-потенциал частиц органоглины в воде при комнатной температуре определяли с помощью анализатора Stabino II (Германия). Измерения проводили не менее трех раз и результаты, имеющие минимальное стандартное отклонение (3–5%), регистрировали как значения ζ -потенциала.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение значений дзета-потенциала и краевого угла смачивания исходного и органически модифицированного бентонита показало значительные структурные изменения в межслоевом пространстве при поглощении разного количества органических катионов. Из полученных данных следует (табл. 1), что рост содержания ЦТАБ в органоглине приводит к резкому снижению модуля отрицательных значений электрокинетического потенциала частиц, затем их перезарядку с последующей стабилизацией положительных значений (рис. 1). Изоэлектрическая точка наблюдается для частиц с содержанием ЦТАБ, близким к 1,0ЕКО. Происходит нейтрализация льюисовских оснований (атомов кислорода на поверхности) в результате адсорбции органических катионов [13]. Образцы с низким содержанием органических катионов по-прежнему обладают слегка отрицательным поверхностным зарядом (–20,7 мВ для 0,5ЕКО и –6,8 мВ для 1,0ЕКО) (табл. 1). Это указывает на то, что распределение органических катионов на поверхности является мономолекулярным и может быть неполным. Положительно заряженные головные группы органических катионов взаимодействуют непосредственно с отрицательно заряженной поверхностью, тогда как неполярные алифатические цепи обращены от поверхности. Монослойное расположение образует гидрофобную поверх-

ность благодаря неполярным алифатическим хвостам органических катионов, о чем свидетельствуют измеренные краевые углы $>90^\circ$ ($112,92^\circ$ для 1,0ЕКО и $105,99^\circ$ для 1,5ЕКО, соответственно) (рис. 1). Отметим, что фиксируемые максимальные значения контактных углов близки к величинам, полученным рядом авторов для монтмориллонитов из других месторождений, модифицированными ЦТАБ: 106° [19], 105° [22].

Таблица 1.

Электрокинетический потенциал частиц исходного и модифицированного разным количеством ЦТАБ бентонита

Table 1. Electrokinetic potential of particles in bentonite that is either unmodified or modified with varying amounts of CTAB

Образец	Бентонит	Органоглина				
		0,5ЕКО	1,0ЕКО	1,5ЕКО	2,0ЕКО	2,5ЕКО
ζ , мВ	- 63,8	- 20,7	- 6,8	+ 28,5	+ 76,2	+ 72,7

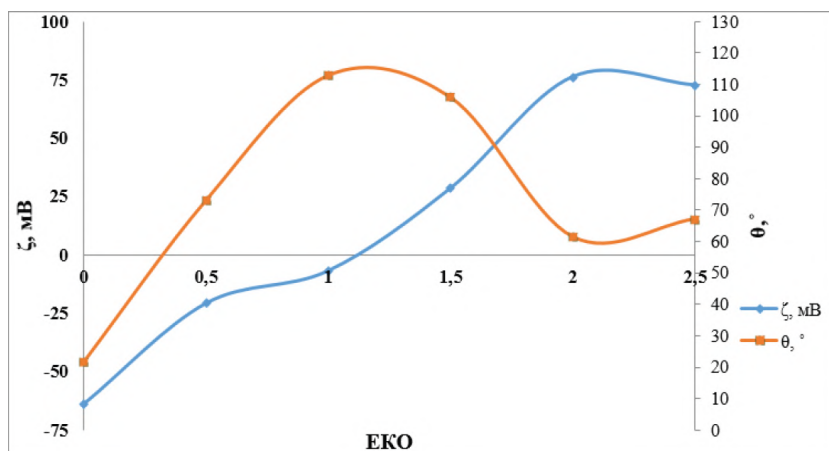


Рис. 1. Графики зависимости краевого угла смачивания (Θ) и дзета-потенциала (ζ) от количества ЦТАБ в органоглине

Fig. 1. Plots showing the relationship between the contact angle (Θ) and the zeta potential (ζ) as a function of the amount of CTAB in organoclay

Дальнейшая значительная нейтрализация поверхностного заряда по сравнению с исходным бентонитом обусловлена избыточным количеством адсорбированных органических катионов на внешней поверхности. Образцы с высоким содержанием органических катионов имеют положительный поверхностный заряд (+76,2 мВ для 2,0ЕКО и +72,2 мВ для 2,5ЕКО,

соответственно) (рис. 1). Образование бислой обусловлено ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями между неполярными алифатическими цепями органических катионов, а положительный заряд уравнивается остаточными адсорбированными анионами (в данном случае Br^-) из раствора. Наличие двухслойного расположения катионов ЦТА⁺ на внешней поверхности также подтверждается значительным уменьшением контактного угла смачивания водой и, соответственно, снижением гидрофобности, по сравнению с монослойным расположением ($61,58^\circ$ для 2,0ЕКО и $67,24^\circ$ для 2,5ЕКО) (рис. 2).

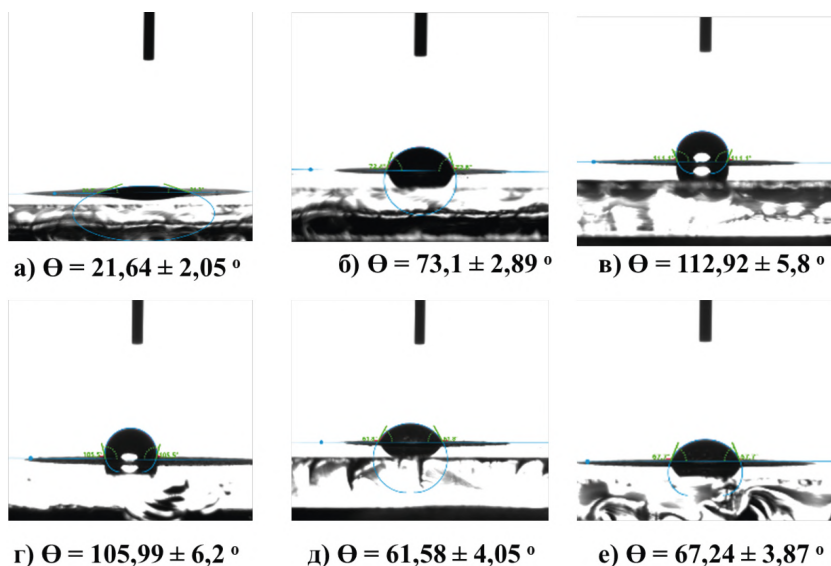


Рис. 2. Краевой угол смачивания исходного (а) и модифицированного разным количеством ЦТАБ бентонита: б) 0,5ЕКО; в) 1,0ЕКО; г) 1,5ЕКО; д) 2,0ЕКО; е) 2,5ЕКО

Fig. 2. Contact angle of the original (a) and bentonite modified with different amounts of CTAB: (b) 0.5 EKO; (c) 1.0 EKO; (d) 1.5 EKO; (e) 2.0 EKO; (f) 2.5 EKO

Полученные данные по измерению краевых углов смачивания и дзета-потенциалов природной и модифицированной глины свидетельствуют об изменении структуры и физико-химических свойств поверхности бентонита при нанесении на нее сурфактанта. С целью выяснения межслоевой конфигурации интеркалированного поверхностно-активного вещества в смектитовой глине был использован метод ИК-Фурье спектроскопии.

В ИК-спектре исходного бентонита (рис. 3а) наблюдаются ряд полос, характерных для монтмориллонита, а также примесей в бентонитовой глине [10]. Примеси кварца соответствует полоса низкой интенсивности при 797 см^{-1} . Полосы при 3445 и 1635 см^{-1} относятся к валентным и деформационным колебаниям группы $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ адсорбционной воды. Валентным колебаниям групп Al_2-OH и $\text{Al}(\text{Mg})-\text{OH}$ соответствует широкая полоса с максимумом 3624 см^{-1} , тогда как слабые полосы при 916 и 839 см^{-1} относятся к деформационным колебаниям структурных гидроксильных групп. Кроме того, в спектре наблюдаются интенсивные полосы валентных и деформационных колебаний связей $\text{Si}-\text{O}$ и $\text{Al}-\text{O}$ при 1037 , 525 и 470 см^{-1} .

На ИК спектре модифицированного образца (рис. 3б) присутствуют полосы валентных и деформационных колебаний метильных и метиленовых групп молекул модификатора в области $3000-2800$ и $1500-1400\text{ см}^{-1}$, соответственно, которых нет в ИК спектре исходной глины (рис. 3а).

Интенсивное поглощение в области $3700-3200\text{ см}^{-1}$ в ИК-спектре органоглин (рис. 3б) соответствует валентным колебаниям адсорбированных на поверхности алюмосиликата молекул H_2O и структурных OH -групп. Валентным колебаниям отдельных групп Al_2-OH и $\text{Al}(\text{Mg})-\text{OH}$ внутри кристаллической упаковки соответствует интенсивное поглощение с максимумом при 3624 см^{-1} [16; 20]. На полосе можно заметить два перегиба при 3653 и 3698 см^{-1} , что может быть связано с наличием примесей в кристаллической решетке бентонита, с катионами которых OH -группы образуют разные по прочности водородные связи.

Деформационные колебания связей $\text{Al}(\text{Mg})-\text{OH}$ и Al_2-OH проявляются в спектре органобентонита при 839 и 916 см^{-1} , соответственно. Полоса при 3230 см^{-1} отвечает валентным колебаниям OH -групп отдельно адсорбированных молекул воды. Тогда как валентным колебаниям $\text{O}-\text{H}$ связи полимолекулярно адсорбированных молекул H_2O , связанных слабыми водородными связями между собой и с OH -группами межслоевой поверхности бентонита соответствует широкая полоса в области $3420-3450\text{ см}^{-1}$. Полоса около 1640 см^{-1} , расщепленная на два подмаксимума при 1638 и 1623 см^{-1} , относится к деформационным колебаниям молекул воды.

Заметное снижение интенсивности всех полос OH -групп в ИК спектре свидетельствует об уменьшении гидратации поверхности бентонита из-за ее обработки ЦТАБ, что вызывает изменение гидрофильных свойств глины на гидрофобные [11, 16].

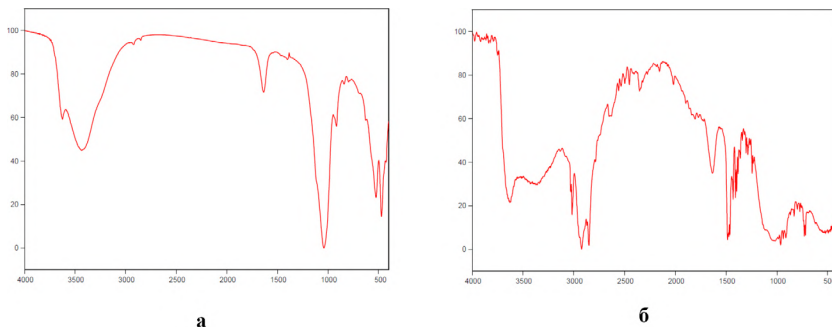


Рис. 3. ИК спектры: исходного бентонита (а), органоглины 2,5ЕКО (б)

Fig. 3. IR spectra: raw bentonite (a), 2.5EKO organoclay (b)

Уравнение Иогансена (1) позволяет оценить энтальпию водородной связи образованную ОН-группами в пакете алюмосиликата и молекулами адсорбированной воды разного типа [1; 2]:

$$-\Delta H = 0,3 \cdot (\Delta\nu - 40)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где $\Delta\nu = \nu_m - \nu$, $\nu_m = 3750 \text{ см}^{-1}$ – частота колебания отдельных молекул воды; ν – частота рассматриваемой полосы в ИК-спектре.

В таблице 2 приведены величины рассчитанных по уравнению (1) энтальпий водородных связей в исходном и модифицированном ЦТАБ бентоните.

Таблица 2.

Энтальпии водородных связей между изолированными ОН-группами поверхности алюмосиликата ($-\Delta H_1$), ассоциированными ($-\Delta H_2$) и отдельными ($-\Delta H_3$) молекулами воды

Table 2. Enthalpies of hydrogen bonds between isolated OH groups on the aluminosilicate surface ($-\Delta H_1$), associated water molecules ($-\Delta H_2$), and individual water molecules ($-\Delta H_3$)

Образец	ν , см^{-1}	$-\Delta H_1$, ккал/ моль	ν , см^{-1}	$-\Delta H_2$, ккал/ моль	ν , см^{-1}	$-\Delta H_3$, ккал/ моль
Бентонит	3624	2,8	3475	4,6	3235	6,5
Органобентонит	3624	2,8	3428	5,0	3230	6,6

Из данных таблицы 2 следует, что модифицирование бентонита ЦТАБ слабо влияет на энтальпию образования водородных связей. Вместе с тем, для органобентонита величина $-\Delta H_3$ превышает значение $-\Delta H_2$ на 1,6 ккал/моль. Это свидетельствует о том, что изолированные молекулы воды прочнее связаны водородной связью с поверхностью бентонита, чем полимолекулярная вода.

Валентным колебаниям связей Si-O в кристаллическом каркасе органобентонита соответствует наиболее интенсивная полоса при 1039 см^{-1} в спектре. Деформационные колебания связей Al-O-Al и Si-O-Si фиксируются в спектре при 470 и 522 см^{-1} . Отметим, что модификация бентонита ЦТАБ хотя и не вызывает заметных изменений в положении этих максимумов по сравнению с чистым бентонитом, полосы валентных и деформационных колебаний в кристаллической решетке органобентонита становятся более узкими и интенсивными. Вероятно, это связано с изменением силового поля на границе сурфактант-бентонит под влиянием многоатомных катионов ЦТА⁺.

Симметричные и антисимметричные валентные колебания триметиламмониевой группы CH_3N^+ проявляются в спектре органоглины при 3017 и 3031 см^{-1} , соответственно. Пики при 2942 и 2890 см^{-1} соответствуют валентным колебаниям концевой CH_3 -группы C16-цепи молекулы адсорбированного и интеркалированного ЦТАБ.

Полосы валентных колебаний групп CH_2 алкильной части сурфактанта смещены в сторону больших частот по сравнению со спектром чистого кристаллического ЦТАБ. Частота этих полос чувствительна к соотношению *гош*/*транс*-конформеров алкиламмониевых цепей. Сдвиг от низких частот, характерных для высокоупорядоченных, полностью *транс*-конформаций молекул в кристалле, к более высоким частотам сопровождается увеличением числа *гош*-конформеров, присутствующих в растворе («беспорядок» цепи) [14]. Так, в спектре кристаллического ЦТАБ наблюдаются полосы симметричных и антисимметричных колебаний при 2850 и 2918 см^{-1} в основном *транс*-конформеров с вытянутыми метиленовыми цепочками. В ИК спектре органоглин с разным содержанием ЦТАБ (от 0,5 до 2,5ЕКО) на спектральных кривых появляются две полосы в более высокочастотной области в виде перегибов при 2869 и 2959 см^{-1} , которые характерны для симметричных и антисимметричных колебаний *гош*-конформеров (рис. 3б). Эти данные свидетельствуют о сосуществовании упорядоченных и неупорядоченных конформеров молекул ПАВ в органоглинах, причем количество *транс*-конформеров возрастает с увеличением уровня нагрузки поверхностно-активного вещества. Очевидно, межслоевые органические фазы в органоглинах состоят из доменов полностью *транс*-цепей и доменов неупорядоченных *гош*-цепей. Небольшая разница энергий между *транс*- и *гош*-конформерами алкильных цепей обеспечивает значительную степень конформационной свободы для хвостовой части алкильной цепи поверхностно-активного вещества, огра-

ниченную только размерами межслоевой галереи бентонита. Вместе с тем, полосы валентных колебаний метиленовых групп *транс*-изомеров (2918 и 2850 см^{-1}) в ИК спектрах всех органоглин являются самыми интенсивными (рис. 3в), что говорит о преобладании и, следовательно, о возможности существования высокоупорядоченных микрокристаллических фаз ЦТАБ (моно- и бимолекулярных слоев) на алюмосиликатной поверхности.

Ранее на основании данных рентгеновской дифракции авторы работы [23] предположили, что с увеличением плотности упаковки расположение интеркалированных молекул ПАВ в межслоевом пространстве варьируется от латерального монослоя (параллельное расположение углеводородной цепи) к латеральному бислою, затем к монослою парафинового типа (алкиламмониевая цепь располагается под определенным углом к алюмосиликатной поверхности) и, наконец, к бислою парафинового типа.

Расщепление полос ножничных и маятниковых колебаний метиленовых групп алкильных хвостов в области $1450\text{--}1490$ и $710\text{--}740\text{ см}^{-1}$ является отражением межмолекулярного взаимодействия между двумя соседними углеводородными цепями ЦТАБ в элементарной орторомбической ячейке кристаллической решетки (давыдовское расщепление) [12]. В спектре органобентонитов с высоким содержанием ЦТАБ (2,5ЕКО) ножничные колебания CH_2 -групп проявляются в виде дублета при 1462 и 1472 см^{-1} (рис. 3в), тогда как в спектре образца с низким содержанием сурфактанта (0,5ЕКО) фиксируется широкий синглет при 1472 см^{-1} . Эти широкие синглеты относятся к неупорядоченной гексагональной упаковке субъчеек, где алкильная цепь свободно вращается вокруг своей оси. По мере увеличения плотности упаковки интеркалированного ПАВ синглеты расщепляются в дублеты. Аналогично давыдовское расщепление наблюдается и для маятниковых колебаний CH_2 -групп, которое фиксируется в спектре органобентонита в виде двух полос при 719 и 730 см^{-1} при увеличении нагрузки сурфактанта до 2,5ЕКО (рис. 3б).

Полоса антисимметричных деформационных колебаний головной триметиламмонийной группы сурфактанта в спектре расщеплена в дублет (1482 и 1486 см^{-1}) (рис. 3б), что близко к полосам чистого кристаллического ЦТАБ (1480 и 1482 см^{-1}). Эти результаты указывают что группы $(\text{CH}_3)_3\text{N}^+$ зафиксированы на поверхности слоя алюмосиликата.

Таким образом, анализ ИК-спектров природного бентонита и его модифицированных форм согласуется с данными по определению краевых углов и дзета-потенциала органоглин.

Заключение

1. Природная глина Таганского месторождения, отличающаяся высоким содержанием монтмориллонита (98,5%), была успешно интеркалирована ионообменной реакцией катионным ПАВ – цетилтриметиламмоний бромидом (ЦТАБ). Интеркаляция различных количеств четвертичных алкиламмониевых катионов (0,5-2,5ЕКО) в прослойки глины приводит к тому, что гидрофильные свойства необработанных глин изменяются на гидрофобные и органофильные.

2. Измерения краевых углов смачивания органобентонита с разным содержанием ЦТАБ показали, что при низкой концентрации сурфактанта (0,5-1,0ЕКО) значение краевого угла возрастает от 21,64° до 112,92°, затем уменьшается до 67,24° при более высокой концентрации ЦТАБ (1,5-2,5ЕКО).

3. Определение дзета-потенциала частиц органоглины показало, что рост содержания ЦТАБ в органоглине приводит к резкому снижению модуля отрицательных значений электрокинетического потенциала частиц от -63,8 мВ, затем их перезарядке с последующей стабилизацией положительных значений при +76,2 мВ.

4. Заметное снижение интенсивности всех полос ОН-групп в ИК спектре органоглин свидетельствует об уменьшении гидратации поверхности бентонита из-за ее обработки ЦТАБ, что вызывает изменение гидрофильных свойств глины сначала на гидрофобные, а затем снова на гидрофильные в зависимости от количества нанесенного катионного ПАВ.

5. В ИК спектре органоглин в области симметричных и антисимметричных валентных колебаний метиленовых групп, наряду с полосами *транс*-конформеров молекул сурфактанта с упорядоченным расположением алкиламмониевых цепей при 2850 и 2918 см⁻¹, характерным для чистого кристаллического ЦТАБ, наблюдаются перегибы на спектральных кривых при 2869 и 2959 см⁻¹. Высокочастотное смещение полос валентных колебаний СН₂-групп характерно для неупорядоченных *гош*-конформеров в растворе ЦТАБ. С ростом концентрации ПАВ доля *транс*-конформеров возрастает, что указывает на более упорядоченную ориентацию метиленовых звеньев.

6. В ИК-спектрах полученных образцов органоглин наблюдается расщепление полос в области деформационных колебаний СН₂-групп, обусловленное межмолекулярным взаимодействием между двумя близко расположенными углеводородными цепями в элементарной орторомбической ячейке кристаллического ЦТАБ (давидовское расщепление). Дублеты ножничных колебаний фиксируются при 1462 и 1472 см⁻¹, а дублеты

маятниковых колебаний – при 719 и 731 см⁻¹. Эти данные также подтверждают возможность существования различных микрокристаллических фаз сурфактанта (моно и бимолекулярных слоев) на внешней поверхности и в межслоевом пространстве бентонита.

Таким образом, жидкофазная интеркаляция катионов алкилтриметиламмония в бентонит Таганского месторождения является эффективным и простым методом приготовления модифицированных глин с регулируемыми гидрофильно-гидрофобными свойствами для применения в очистке окружающей среды от органических загрязнителей.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства просвещения РФ (Госзадание № 073-00065-25-01 от 18.03.2025 года на тему «Разработка сорбционных систем на основе минеральных слоистых материалов для адресной доставки лекарственных веществ»).

Список литературы

1. Безродная, Т. В., Несправа, В. В., Пучковская, Г. А., Чашечникова, И. Т., Бойко, Ю. П., & Баран, Я. (2011). Структура и спектроскопические свойства органоглин, модифицированных многостенными углеродными нанотрубками. *Журнал прикладной спектроскопии*, 78(1), 56–65. <https://doi.org/10.1007/s10812-011-9424-y>. EDN: <https://elibrary.ru/NCEZZP>
2. *Водородная связь*. (1981). [Под ред. Н. Д. Соколова] (стр. 112–155). Москва: Наука.
3. ГОСТ 21283-2024. (2024). *Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. Методы определения показателя адсорбции и емкости катионного обмена*. Москва: Российский институт стандартизации, 1–5.
4. Карпова, Т. В., Булучевский, Е. А., & Лавренев, А. В. (2019). Композитные мезопористые материалы на основе кислотно-активированных монтмориллонитов. *Вестник Томского государственного университета. Химия*(16), 15–28. <https://doi.org/10.17223/24135542/16/2>. EDN: <https://elibrary.ru/HCTPFG>
5. Крупин, С. В., & Трофимова, Ф. А. (2010). *Коллоидно-химические основы создания глинистых суспензий для промышленного дела*. Казань: КНИТУ, 411. ISBN: 978-5-7882-0894-7. EDN: <https://elibrary.ru/ZGJWYN>
6. Переломов, Л. В., Атрощенко, Ю. М., Минкина, Т. М., Переломова, И. В., Бауэр, Т. В., & Пинский, Д. Л. (2021). Органоглины — новый класс перспективных сорбентов для ремедиации химически загрязненных объектов окружающей среды. *Агрохимия*, 8, 82–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188121080111>. EDN: <https://elibrary.ru/XSDTAQ>

7. Чечетко, Е. С., Толпешта, И. И., & Завгородняя, Ю. А. (2017). О возможности использования модифицированного додецилтриметиламмоний бромидом бен-тонита для очистки вод от нефти и ее водорастворимых компонентов. *Вестн. Моск. ун-та. Почвоведение*, 17(3), 33–3.
8. Bergaya, F., Jaber, M., & Lambert, J. (2011). Organophilic Clay Minerals. In M. Galimberti (Ed.), *Rubber-Clay Nanocomposites – Science, Tecnology and Applications* (pp. 45–86). New York: J. Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118092866.ch2>.
9. Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (2006). *Handbook of Clay Science*. Amsterdam: Elsevier, 1246.
10. Chukanov, N. V. (2014). *Infrared spectra of mineral species: Extended library*. Mineralogy. Dordrecht: Springer, 1, 1733.
11. Cubuk, O., Caglar, B., Topcu, C., Coldur, F., Sarp, G., Tabak, A., & Sahin, E. (2015). Structural characterization of hexadecyltrimethylammonium-smectite composites and their potentiometric electrode applications. *Applied Surface Science*, 338, 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.110>.
12. Gureva, S. A., Marikhin, V. A., & Vlasova, E. N. (2023). Specifics of n-Alkanes Polymorphism during Temperature Phase Transitions. *Physics of the Solid State*, 65(12), 2197–2204. <https://doi.org/10.61011/PSS.2023.12.57695.246>.
13. Jai Prakash, B. S. (2004). Surface Thermodynamics of Clays (pp. 90–117). [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(04\)80038-3](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(04)80038-3).
14. Li, Z., Jiang, W.-T., & Hong, H. (2008). An FTIR investigation of hexadecyltrimethylammonium intercalation into rectorite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(4), 1525–1534. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.05.015>. EDN: <https://elibrary.ru/KUPFWR>
15. Liang, H., Long, Z., Yang, S., & Dai, L. (2015). Organic modification of bentonite and its effect on rheological properties of paper coating. *Applied Clay Science*, 104, 106–109. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.015>.
16. Madejová, J. (2003). FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, 31(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(02\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(02)00065-6). EDN: <https://elibrary.ru/BACCB>
17. Moslemizadeh, A., Khezerloo-ye Aghdam, S., Shahbazi, K., Khezerloo-ye Aghdam, H., & Alboghobeish, F. (2016). Assessment of swelling inhibitive effect of CTAB adsorption on montmorillonite in aqueous phase. *Applied Clay Science*, 127–128, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.014>.
18. Perelomov, L., Gertsen, M., Mandzhieva, S., Sychev, V., Dudnikova, T., Khaidanov, I., Perelomova, I., Minkina, T., & Atroshchenko, Y. (2025). Adsorption of Antibiotics by Natural Clay Minerals. *Minerals*, 15(7), 733. <https://doi.org/10.3390/min15070733>. EDN: <https://elibrary.ru/RKDBTC>

19. Schampera, B., Šolc, R., Tunega, D., & Dultz, S. (2016). Experimental and molecular dynamics study on anion diffusion in organically modified bentonite. *Applied Clay Science*, 120, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.026>.
20. Vicente-Rodríguez, M. A., Suarez, M., Bañares-Muñoz, M. A., & de Dios Lopez-Gonzalez, J. (1996). Comparative FT-IR study of the removal of octahedral cations and structural modifications during acid treatment of several silicates. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 52(13), 1685–1694. [https://doi.org/10.1016/S0584-8539\(96\)01771-0](https://doi.org/10.1016/S0584-8539(96)01771-0). EDN: <https://elibrary.ru/ANTZXJ>
21. Wu, W. (2001). Baseline Studies of the Clay Minerals Society Source Clays: Colloid and Surface Phenomena. *Clays and Clay Minerals*, 49(5), 446–452. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2001.0490511>. EDN: <https://elibrary.ru/TOSUOL>
22. Zhang, J., Li, L., Xu, J., & Sun, D. (2014). Effect of cetyltrimethylammonium bromide addition on the emulsions stabilized by montmorillonite. *Colloid and Polymer Science*, 292(2), 441–447. <https://doi.org/10.1007/s00396-013-3089-4>. EDN: <https://elibrary.ru/UAIYVS>
23. Zhu, L., Zhu, R., Xu, L., & Ruan, X. (2007). Influence of clay charge densities and surfactant loading amount on the microstructure of CTMA-montmorillonite hybrids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 304(1–3), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.04.019>. EDN: <https://elibrary.ru/LPHAZL>

References

1. Bezrodnaya, T. V., Nesprava, V. V., Puchkovskaya, G. A., Chashechnikova, I. T., Boyko, Yu. P., & Baran, Ya. (2011). Structure and spectroscopic properties of organoclays modified with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Applied Spectroscopy*, 78(1), 56–65. <https://doi.org/10.1007/s10812-011-9424-y>. EDN: <https://elibrary.ru/NCEZZP>
2. *Hydrogen bond*. (1981). [Ed. by N. D. Sokolov] (pp. 112–155). Moscow: Nauka.
3. GOST 21283-2024. (2024). *Bentonite clay for fine and construction ceramics. Methods for determining the adsorption index and cation exchange capacity*. Moscow: Russian Institute of Standardization, 1–5.
4. Karpova, T. V., Buluchevsky, E. A., & Lavrenov, A. V. (2019). Composite mesoporous materials based on acid-activated montmorillonites. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*(16), 15–28. <https://doi.org/10.17223/24135542/16/2>. EDN: <https://elibrary.ru/HCTPFG>
5. Krupin, S. V., & Trofimova, F. A. (2010). *Colloidal-chemical foundations for creating clay suspensions for industrial applications*. Kazan: KNRTU, 411. ISBN: 978-5-7882-0894-7. EDN: <https://elibrary.ru/ZGJWYN>
6. Perelomov, L. V., Atroshchenko, Yu. M., Minkina, T. M., Perelomova, I. V., Bauer, T. V., & Pinsky, D. L. (2021). Organoclays – a new class of promising sorbents for

- remediation of chemically contaminated environmental objects. *Agrochemistry*, 8, 82–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188121080111>. EDN: <https://elibrary.ru/XS-DTAQ>
7. Chechetko, E. S., Tolpeshta, I. I., & Zavgorodnyaya, Yu. A. (2017). On the possibility of using dodecyltrimethylammonium bromide-modified bentonite for water purification from oil and its water-soluble components. *Bulletin of Moscow University. Soil Science*, 17(3), 33–3.
 8. Bergaya, F., Jaber, M., & Lambert, J. (2011). Organophilic Clay Minerals. In M. Galimberti (Ed.), *Rubber-Clay Nanocomposites – Science, Technology and Applications* (pp. 45–86). New York: J. Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118092866.ch2>.
 9. Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (2006). *Handbook of Clay Science*. Amsterdam: Elsevier, 1246.
 10. Chukanov, N. V. (2014). *Infrared spectra of mineral species: Extended library*. Mineralogy. Dordrecht: Springer, 1, 1733.
 11. Cubuk, O., Caglar, B., Topcu, C., Coldur, F., Sarp, G., Tabak, A., & Sahin, E. (2015). Structural characterization of hexadecyltrimethylammonium-smectite composites and their potentiometric electrode applications. *Applied Surface Science*, 338, 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.110>.
 12. Gureva, S. A., Marikhin, V. A., & Vlasova, E. N. (2023). Specifics of n-Alkanes Polymorphism during Temperature Phase Transitions. *Physics of the Solid State*, 65(12), 2197–2204. <https://doi.org/10.61011/PSS.2023.12.57695.246>.
 13. Jai Prakash, B. S. (2004). Surface Thermodynamics of Clays (pp. 90–117). [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(04\)80038-3](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(04)80038-3).
 14. Li, Z., Jiang, W.-T., & Hong, H. (2008). An FTIR investigation of hexadecyltrimethylammonium intercalation into rectorite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(4), 1525–1534. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.05.015>. EDN: <https://elibrary.ru/KUPFWR>
 15. Liang, H., Long, Z., Yang, S., & Dai, L. (2015). Organic modification of bentonite and its effect on rheological properties of paper coating. *Applied Clay Science*, 104, 106–109. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.015>.
 16. Madejová, J. (2003). FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, 31(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(02\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(02)00065-6). EDN: <https://elibrary.ru/BACBB>
 17. Moslemizadeh, A., Khezerloo-ye Aghdam, S., Shahbazi, K., Khezerloo-ye Aghdam, H., & Alboghobeish, F. (2016). Assessment of swelling inhibitive effect of CTAB adsorption on montmorillonite in aqueous phase. *Applied Clay Science*, 127–128, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.014>.

18. Perelomov, L., Gertsen, M., Mandzhieva, S., Sychev, V., Dudnikova, T., Khaidanov, I., Perelomova, I., Minkina, T., & Atroshchenko, Y. (2025). Adsorption of Antibiotics by Natural Clay Minerals. *Minerals*, 15(7), 733. <https://doi.org/10.3390/min15070733>. EDN: <https://elibrary.ru/RKDBTC>
19. Schampera, B., Šolc, R., Tunega, D., & Dultz, S. (2016). Experimental and molecular dynamics study on anion diffusion in organically modified bentonite. *Applied Clay Science*, 120, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.026>.
20. Vicente-Rodríguez, M. A., Suarez, M., Bañares-Muñoz, M. A., & de Dios Lopez-Gonzalez, J. (1996). Comparative FT-IR study of the removal of octahedral cations and structural modifications during acid treatment of several silicates. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 52(13), 1685–1694. [https://doi.org/10.1016/S0584-8539\(96\)01771-0](https://doi.org/10.1016/S0584-8539(96)01771-0). EDN: <https://elibrary.ru/ANTZXJ>
21. Wu, W. (2001). Baseline Studies of the Clay Minerals Society Source Clays: Colloid and Surface Phenomena. *Clays and Clay Minerals*, 49(5), 446–452. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2001.0490511>. EDN: <https://elibrary.ru/TOSUOL>
22. Zhang, J., Li, L., Xu, J., & Sun, D. (2014). Effect of cetyltrimethylammonium bromide addition on the emulsions stabilized by montmorillonite. *Colloid and Polymer Science*, 292(2), 441–447. <https://doi.org/10.1007/s00396-013-3089-4>. EDN: <https://elibrary.ru/UAIYVS>
23. Zhu, L., Zhu, R., Xu, L., & Ruan, X. (2007). Influence of clay charge densities and surfactant loading amount on the microstructure of CTMA-montmorillonite hybrids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 304(1–3), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.04.019>. EDN: <https://elibrary.ru/LPHAZL>

ВКЛАД АВТОРОВ

Атрошенко Ю.М.: разработка концепции научной работы.

Соколов А.А., Симонов Р.В., Сидяков С.А.: проведение литературного поиска, проведение исследований.

Переломов Л.В., Шахкельдян И.В.: консультирование по вопросам методологии и реализации исследования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yuri M. Atroshchenko: development of the concept of scientific work.

Artiom A. Sokolov, Roman V. Simonov, Sergei A. Sidiyakov: conducting a literature search, conducting research.

Leonid V. Perelomov, Irina V. Shakhkeldyan: consulting on the methodology and implementation of the research.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Соколов Артем Алексеевич, аспирант кафедры химии

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
artiom.sokolov.2000@gmail.com*

Симонов Роман Викторович, научный сотрудник лаборатории биогеохимии Научного центра

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
tulalse2020@mail.ru*

Сидяков Сергей Андреевич, инженер кафедры химии

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
serzh.sidyakov.01@mail.ru*

Переломов Леонид Викторович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии Научного центра

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
perelomov@rambler.ru*

Шахкельдян Ирина Владимировна, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры химии

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
ira.shakhkeldyan@mail.ru*

Атрощенко Юрий Михайлович, доктор химических наук, профессор, директор Научного центра

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
reaktiv@tsput.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Artiom A. Sokolov, Postgraduate Student of the Department of Chemistry

Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University

125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation

artiom.sokolov.2000@gmail.com

SPIN-code: 9510-6449

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9900-3665>

Roman V. Simonov, Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry at the Scientific Center

Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University

125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation

tulalse2020@mail.ru

SPIN-code: 3655-2676

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8337-8147>

Sergei A. Sidyakov, Engineer of the Department of Chemistry

Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University

125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation

serzh.sidyakov.01@mail.ru

SPIN-code: 2989-2210

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5227-0401>

Leonid V. Perelomov, PhD in Biology, Head of the Laboratory of Biogeochemistry at the Scientific Center

Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University

125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation

perelomov@rambler.ru

SPIN-code: 2695-0200

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0507-4968>

ResearcherID: J-6178-2016

Scopus AuthorID: 12545141100

Irina V. Shakhkeldyan, Doctor of Chemistry, Professor, Professor of the Department of Chemistry

Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University

125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation

ira.shakhkeldyan@mail.ru

SPIN-code: 6173-4296

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4049-6168>

Scopus Author ID: 6603541419

Yuri M. Atroshchenko, Doctor of Chemistry, Professor, Director of the Scientific Center

Lev Tolstoy Tula State Pedagogical University

125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation

reaktiv@tsput.ru

SPIN-code: 9358-1895

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7235-8330>

ResearcherID: K-4859-2015

Scopus Author ID: 6701535725

Поступила 31.10.2025

После рецензирования 26.12.2025

Принята 14.01.2026

Received 31.10.2025

Revised 26.12.2025

Accepted 14.01.2026

Физиология и биохимия растений / Plant Physiology and Biochemistry

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1784](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1784)EDN: [KINIOY](https://www.edn.ru/KINIOY)

УДК 615.322



Изучение полифенольного состава листьев и коры *Salix alba* L. и *Populus nigra* L., произрастающих на юге России

А.Ф. Рябуха¹, И.В. Плетнева², А.Н. Гейсман², М.М. Корнеев²¹Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного
лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Российская Федерация²Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград,
Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Представители семейства *Salicaceae* и *Populus nigra* являются дикорастущими растениями, которые широко распространены в Волгоградской области и других регионах России. Эти растения также активно используются в системе агролесомелиорации по восстановлению и улучшению лесных и агролесных экосистем. Обеспечение эффективного подбора материала для лесопосадки и дальнейшего выращивания растений, позволяет изучать влияние условий произрастания, особенно в условиях аридности. Приспособительные биохимические механизмы, связанные с синтезом полифенолов, играют ключевую роль в обеспечении сопротивляемости растений к абиотическим факторам и биотическим воздействиям. Изучение полифенольного состава *Salix alba* L. и *Populus nigra* L., произрастающих в условиях засушливого региона Волгоградской области, позволит выявить связь между условиями среды обитания и уровнем содержания вторичных метаболитов.

Цель – идентифицировать и количественно оценить содержание полифенольных соединений и флавоноидов в экстракционных извлечениях, полученных из листьев и коры ивы белой (*Salix alba*) и тополя черного (*Populus nigra*), произрастающих на территории острова Сарпинский Волгоградской области.

Материалы и методы. Образцы растительного сырья были собраны в июне–июле 2025 года в Волгоградской области. Экстракты получали с применением 70% этанола при температуре 60°C. Полифенольные соединения определяли методом Фолина-Чокальтеу. Содержание флавоноидов определяли методом дифференци-

альной спектрофотометрии после реакции с алюминия хлоридом. Экстракты из листьев ивы анализировали, используя жидкостной хроматограф Shimadzu с диодно-матричным УФ-детектором.

Результаты. Определено суммарное содержание полифенольных соединений в экстрактах из листьев ивы ($2,85 \pm 0,05\%$), коры ивы ($1,76 \pm 0,04\%$), листьев тополя ($1,75 \pm 0,04\%$) и коры тополя ($3,26 \pm 0,06\%$). Определено содержание флавоноидов в экстрактах из листьев ивы ($1,81 \pm 0,015\%$), коры ивы ($0,28 \pm 0,005\%$), листьев тополя ($\pm 0,04\%$) и коры тополя ($\pm 0,06\%$). Методом тонкослойной хроматографии определены рутин в извлечении из листьев ивы и производные кверцетина в извлечении из листьев тополя. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в экстрактах из листьев ивы определены рутин и кверцетин.

Ключевые слова: листья; кора; ива белая, тополь черный; экстракты; полифенольные соединения

Для цитирования. Рябуха, А. Ф., Плетнева, И. В., Гейсман, А. Н., & Корнеев, М. М. (2026). Изучение полифенольного состава листьев и коры *Salix alba* L. и *Populus nigra* L., произрастающих на юге России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 208–225. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1784>

Study of the polyphenol composition of the leaves and bark of *Salix alba* L. and *Populus nigra* L., growing in southern Russia

A.F. Ryabukha¹, I.V. Pletneva², A.N. Geisman², M.M. Korneev²

¹Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russian Federation

²Volgograd State Medical University, Volgograd, Russian Federation

Abstract

Background. Members of the *Salicaceae* family and *Populus nigra* are wild plants widely distributed in the Volgograd region and other regions of Russia. These plants are also actively used in agroforestry systems to restore and improve forest and agroforestry ecosystems. Ensuring the effective selection of material for forest planting and subsequent plant cultivation allows for the study of the influence of growing conditions, particularly in arid conditions. Adaptive biochemical mechanisms associated with polyphenol synthesis play a key role in plant resistance to abiotic factors and biotic influences. Studying the polyphenolic composition of *Salix alba* L. and *Populus nigra* L., growing in the arid conditions of the Volgograd region, will help identify the relationship between environmental conditions and secondary metabolite levels.

Purpose. Identify and quantify the polyphenolic and flavonoid content of extracts obtained from the leaves and bark of white willow (*Salix alba*) and black poplar (*Populus nigra*) growing on Sarpinsky island in the Volgograd region.

Materials and methods. Plant samples were collected in June–July 2025 in the Volgograd region. Extracts were obtained using 70% ethanol at 60°C. Polyphenolic compounds were determined using the Folin-Ciocalteu method. Flavonoid content was determined by differential spectrophotometry after reaction with aluminum chloride. Willow leaf extracts were analyzed using a Shimadzu liquid chromatograph with a diode array UV detector.

Results. The total content of polyphenolic compounds was determined in extracts from willow leaves ($2.85 \pm 0.05\%$), willow bark ($1.76 \pm 0.04\%$), poplar leaves ($1.75 \pm 0.04\%$) and poplar bark ($3.26 \pm 0.06\%$). The content of flavonoids was determined in extracts from willow leaves ($1.81 \pm 0.015\%$), willow bark ($0.28 \pm 0.005\%$), poplar leaves ($\pm 0.04\%$) and poplar bark ($\pm 0.06\%$). Rutin in the extract from willow leaves and quercetin derivatives in the extract from poplar leaves were determined using thin-layer chromatography. Rutin and quercetin were determined in the extracts from willow leaves using high-performance liquid chromatography.

Keywords: leaves; bark; white willow; black poplar; extracts; polyphenolic compounds

For citation. Ryabukha, A. F., Pletneva, I. V., Geisman, A. N., & Korneev, M. M. (2026). Study of the polyphenol composition of the leaves and bark of *Salix alba* L. and *Populus nigra* L., growing in southern Russia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 208–225. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1784>

Введение

Волгоградская область расположена в зоне степей и полупустынь, леса занимают 4,3% от ее общей территории, поэтому здесь особенно важны работы по лесоразведению и лесовосстановлению [5, с. 4; 6, с. 10].

Представители семейства *Salicaceae* являются дикорастущими растениями Волгоградской области, а также широко используются в агролесомелиорации в южных регионах России. Ива белая (*Salix alba* L.) и тополь черный (*Populus nigra* L.) семейства *Salicaceae* широко применяются для обсадок русел водоемов, посадок по днищам балок и оврагов; в лесостепи и северной степи применяются для посадки вдоль дорог [4, с. 15].

Данные виды в качестве вторичных метаболитов содержат фенилпропаноиды – ароматические фенольные соединения, являющиеся основой для биосинтеза различных соединений, включая флавоноиды (антоцианы, проантоцианидины, флавонолы и т. д.), лигнины, кумарины и лигнаны [7, с. 23; 12, с. 48].

Полифенольные соединения, в частности флавоноиды, играют важную роль в росте и развитии растений, а также в их реакции на внешние раздра-

жители, защите от вредителей, воздействия ультрафиолета, обладая антиоксидантными свойствами, влияют по мнению ряда авторов на устойчивость растений к абиотическим и биотическим стрессам [13, p. 5, 17, p. 1].

Показано, что воздействие на растения стрессовых факторов (высокие и низкие температуры, УФ-радиация) может приводить к изменению количества полифенольных соединений, в том числе путем регуляции синтеза ферментов, влияющих на данные метаболические пути [9, с. 7]. Так, во время кратковременного воздействия низких температур на проростки кукурузы наблюдали изменения в содержании антоцианов и транскрипции генов, продукты которых участвуют в общем метаболизме фенилпропаноидов и антоцианов [14, с. 2]. У генно-модифицированных с использованием гена фенилпропаноидного метаболического пути PAL1 растений арабидопсиса увеличилась засухоустойчивость, повысилось продуцирование лигнина и салициловой кислоты, но снизились концентрации флавоноидов [19, p. 1].

Изучение полифенольного состава *Salix alba* L. и *Populus nigra* L., произрастающих в естественной среде в засушливых условиях Волгоградской области, позволит связать в дальнейшем конкретные условия местообитания растений с содержанием вторичных метаболитов, проводить правильный подбор древесных пород для защитного лесоразведения, целенаправленно проводить поиск генов, отвечающих за синтез данных соединений.

На первом этапе необходимо провести изучение содержания полифенольных веществ в различных тканях и органах ивы белой и тополя черного.

Цель исследования – определение суммы полифенольных веществ и флавоноидов в извлечениях из листьев и коры ивы белой и тополя черного, произрастающих на острове Сарпинский Волгоградской области.

Материалы и методы

Для исследования использовали высушенные листья, высушенную кору ивы белой и тополя черного. Растительное сырье собрано на острове Сарпинский, Волгоградская область (координаты: 48.590342, 44.484241).

Извлечения получали в соотношении 1:8 настаиванием при температуре 60°C в течении четырех часов.

Для обнаружения и идентификации флавоноидных соединений проводили следующие качественные реакции: с 1% спиртовым раствором железа хлорида (III) для обнаружения соединений, имеющих свободные фенольные ОН-группы; с 2% спиртовым раствором алюминия хлорида для обнаружения флавоноидов; с 10% раствором гидроксида натрия для обнаружения флавонов, флавонолов, халконов и ауранов [2, с. 32].

Количественное определение полифенольных соединений проводили методом Фолина–Чокальтеу модификации Синглетона и Росси. Метод основан на восстановлении реактива Фолина–Чокальтеу полифенолами в щелочной среде и спектрофотометрической оценке окрашенных в синий цвет комплексных соединений [21, р. 1]. Реактив Фолина–Чокальтеу разводили в 10 раз, щелочную среду создавали добавлением 7,5 % раствора натрия карбоната. Для построения калибровочного графика готовили растворы галловой кислоты в концентрации 25-200 мг/л [10, с. 72].

Количественное определение флавоноидов проводили методом дифференциальной спектрофотометрии после реакции с 2% раствором алюминия хлорида. Предварительно были построены графики зависимости оптической плотности от концентрации рутина и кверцетина. Растворы рутина готовили в концентрации 20-170 мкг/мл, добавляли раствор алюминия хлорида и доводили 70 % этанолом в мерной колбе на 5 мл до метки. Растворы кверцетина готовили в концентрации 50-500 мкг/мл, добавляли раствор алюминия хлорида и доводили 70 % этанолом в мерной колбе на 5 мл до метки. Растворы экстрактов готовили по той же схеме, как и растворы стандартных образцов [1, с. 156; 3, с. 68].

Тонкослойную хроматографию полученных экстрактов проводили на пластинах для ТСХ, 20*20 см, силикагель, на алюминиевой подложке, УФ 254, Merck в системах растворителей: 1– бутанол–уксусная кислота–хлороформ 4:1:5; 2– хлороформ–этанол 9:1 [20, р. 59].

Экстракты также анализировали методом ВЭЖХ на хроматографе Shimadzu, с диодно-матричным УФ-детектором при $\lambda_{\max}$ 350 нм для рутина и при $\lambda_{\max}$ 370 нм для лютеолина и кверцетина, колонка Supelcosil LC-18 25cm*4,6mm. Элюирование проводили в изократическом режиме, в качестве подвижной фазы использовали смесь 6% уксусной кислоты (pH 2,08) и ацетонитрила УФ-210 в соотношении 80:20. Объемная скорость потока элюента – 1,0 мл/мин, объем вводимой пробы 20 мкл, время элюирования 60 минут, $t = 20^\circ\text{C}$. Исходные растворы рутина, кверцетина и лютеолина готовили в 99% этаноле, затем методом последовательного разведения подвижной фазой доводили до концентрации 30 мкг/мл.

Результаты и обсуждение

При проведении качественного анализа 2%-м спиртовым раствором алюминия хлорида все извлечения окрашивались в желтый цвет, что свидетельствует о наличии в сырье флавоноидов. При добавлении к экстрактам 10% раствора NaOH наблюдалась ярко-желтая окраска, что свидетельству-

ет о наличии в сырье флавонов и флавонолов. Реакция с хлоридом железа продуцировала зеленое окрашивание у всех изученных экстрактов с возможной примесью коричневого цвета, что может свидетельствовать о наличии в извлечении флавоноидов с ОН- группой в положениях 3 и 5, возможно кверцетина, лютеолина или их гликозидов.

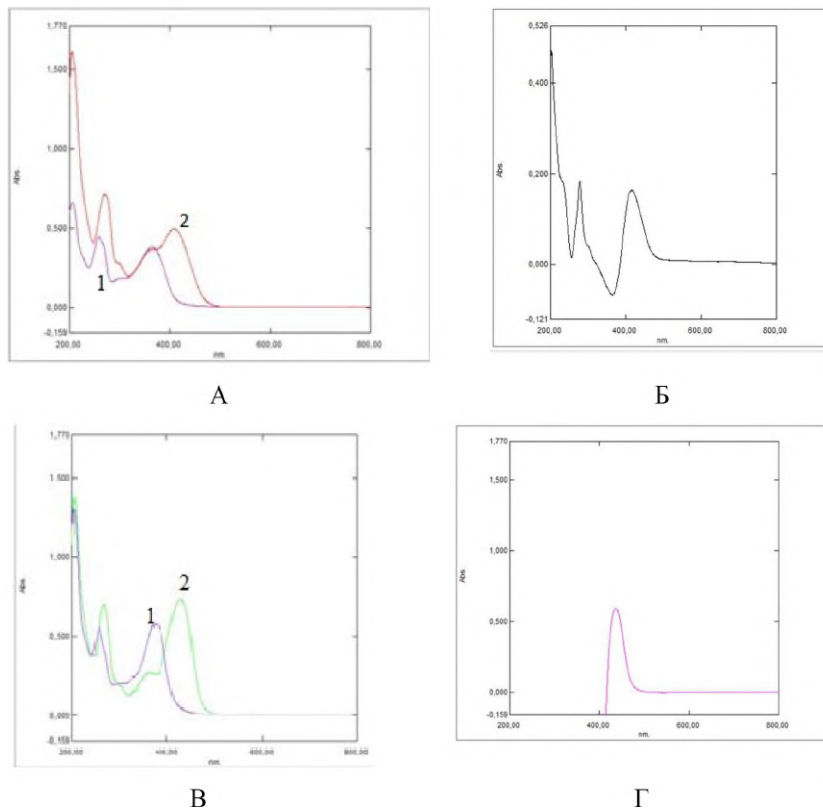
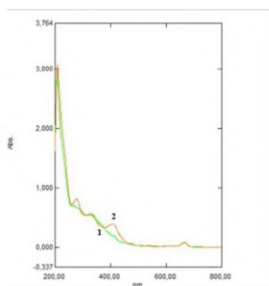


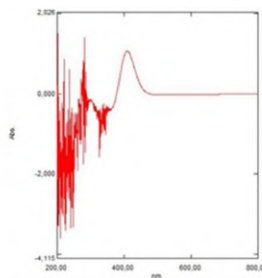
Рис. 1. А - электронный спектр рутина (1) и рутина с добавлением алюминия хлорида (2), Б - электронный дифференциальный спектр рутина после добавления алюминия хлорида, В - электронный спектр кверцетина и кверцетина с добавлением алюминия хлорида, Г - электронный дифференциальный спектр кверцетина после добавления алюминия хлорида.
Fig. 1. А – electron spectrum of rutin (1) and rutin with added aluminum chloride (2), Б – the differential electron spectrum of rutin after the addition of aluminum chloride; В – the electron spectrum of quercetin and quercetin with added aluminum chloride; Д – the differential electron spectrum of quercetin after the addition of aluminum chloride.

Предварительно были изучены спектральные характеристики растворов рутина и кверцетина, которые по данным литературы присутствуют в изучаемом сырье [12, с. 49]. Спектр раствора рутина (20 мкг/мл) – в 96 % этаноле (рис.1, А) и раствора рутина в 96 % этаноле с добавлением алюминия хлорида (рис.1, Б) и спектр растворов кверцетина в 96 % этаноле (рис.1,) и раствора рутина в 96 % этаноле с добавлением алюминия хлорида (рис.1, Б) и кверцетина с добавлением алюминия хлорида представлены на рис. 1.

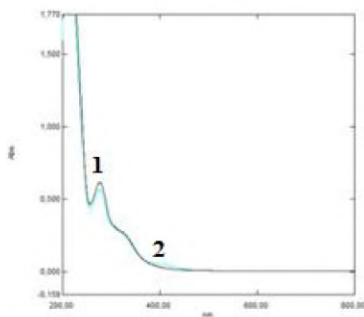
При изучении электронных спектров извлечения из листьев ивы были зарегистрированы характерные для флавоноидов две полосы поглощения с максимумами при 269 и 328 нм, при добавлении хлорида алюминия обнаруживается bathochromный сдвиг длинноволновой полосы на 70-80 нм. Экстракт из листьев тополя имел максимум поглощения при 267 нм, экстракт из коры ивы – 253 нм и 273 нм, экстракт из коры тополя- 264 нм и 284 нм (табл. 1).



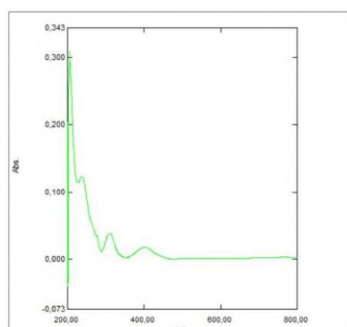
А(1,2)



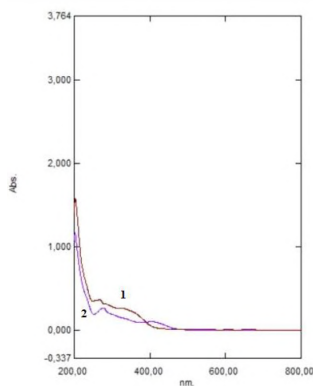
А(3)



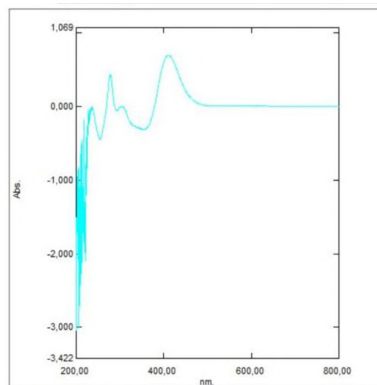
Б(1,2)



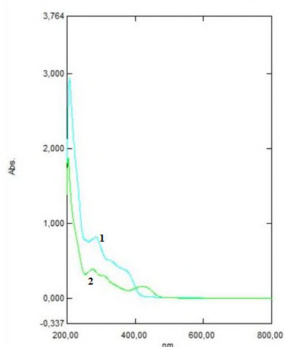
Б(3)



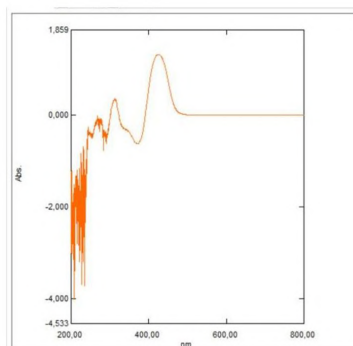
B (1,2)



B(3)



Г(1,2)



Г(3)

Рис. 2. А – настойка из листьев ивы. Б – настойка из коры ивы; В – настойка из листьев тополя; Г – настойка из коры тополя. На всех рисунках 1-спектр настойки без добавления алюминия хлорида, 2-спектр настойки с добавлением алюминия хлорида, 3-дифференциальный спектр настойки с алюминия хлоридом.

Fig. 2. A – willow leaf tincture. B – willow bark tincture; C – poplar leaf tincture; D – poplar bark tincture. In all figures: 1 – spectrum of the tincture without the addition of aluminum chloride; 2 – spectrum of the tincture with the addition of aluminum chloride; 3 – differential spectrum of the tincture with aluminum chloride.

Для устранения влияния примесей был применен метод дифференциальной спектрофотометрии, при этом максимум поглощения длинновол-

новой полосы сдвинулся на 409 нм (листья ивы), 402 нм (кора ивы), 410 нм (листья тополя), 425 нм (кора тополя) (табл. 1, рис. 2).

Методом дифференциальной спектрофотометрии после реакции с алюминия хлоридом для извлечений из листьев и коры ивы и листьев тополя установлен максимум поглощения в области 406–412 нм, что позволяет использовать для расчетов общего количества флавоноидов в сырье в качестве стандартного образца рутин, имеющий максимум поглощения дифференциального спектра при длине волны 412 ± 2 нм (рис. 1, 2, табл. 1).

Таблица 1.

Максимумы поглощения электронных спектров стандартных веществ и полученных извлечений

Table 1. Absorption maxima of the electronic spectra of standard substances and the resulting extracts

УФ-спектр поглощения	Максимум поглощения спиртового извлечения, нм	Максимум поглощения спиртового извлечения с добавлением алюминия хлорида, нм	Максимум поглощения дифференциальный спектр
Рутин	258, 365	270,408	412
Кверцетин	256, 376	268,428	430
Извлечение из листьев ивы	269,328	408	410
Извлечение из коры ивы	253, 273	273	402
Извлечение из листьев тополя	267	406	410
Извлечение из коры тополя	264,284	421	425

Извлечение из коры тополя после реакции с алюминия хлоридом имеет максимум поглощения при длине волны 425 нм (дифференциальный спектр), поэтому для расчетов общего количества флавоноидов в сырье целесообразно использовать стандартный образец кверцетин (максимум поглощения дифференциального спектра при длине волны 430 ± 2 нм (рис.1, 2, табл. 1).

Для предварительной оценки состава экстрактов был использован метод тонкослойной хроматографии (рис. 3). В системе растворителей бутанол-уксусная кислота-хлороформ 4:1:5 при 254 нм (проявление спиртовым раствором AlCl_3) в экстракте из листьев ивы с высокой долей вероятности присутствует рутин или близкие флавоноиды гликозидной природы,

в данной системе растворителей агликоны флавоноидов имеют слишком высокую подвижность и не определяются в изученных экстрактах (рис. 3А). В системе растворителей хлороформ-этанол 9:1 при 365 нм (проявление борно-салициловым реактивом) более полярные вещества (рутин) имеют слабую подвижность и не определяются в изучаемых экстрактах, в экстракте из листьев тополя присутствуют менее полярные агликоны флавоноидов, возможно производные кверцетина или лютеолина (рис. 3Б).

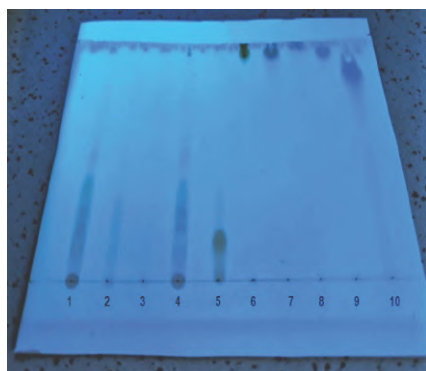


Рис. 3А. 1, 4 – экстракт листьев ивы, 2, 3 – экстракт коры ивы, 5 – рутин, 6 – кверцетин, 7 – лютеолин, 8 – апигенин, 9 – коричная кислота, 10 –галловая кислота

Fig. 3A. 1, 4 – willow leaf extract; 2, 3 – willow bark extract; 5 – rutin; 6 – quercetin; 7 – luteolin; 8 – apigenin; 9 – cinnamic acid; 10 – gallic acid



Рис. 3Б. 1, 4 – экстракт листьев ивы, 2, 3 – экстракт коры ивы, 5 – экстракт коры тополя, 6 – экстракт листьев тополя, 7 – рутин, 8 – кверцетин, 9 – лютеолин, 10 – апигенин

Fig. 3B. 1, 4 – willow leaf extract; 2, 3 – willow bark extract; 5 – poplar bark extract; 6 – poplar leaf extract; 7 – rutin; 8 – quercetin; 9 – luteolin; 10 – apigenin

Далее было рассчитано общее количество полифенольных веществ и флавоноидов в сырье по данным спектрофотометрии, результаты приведены в таблице 2.

Полученные данные свидетельствуют, что наибольшее количество полифенольных веществ содержится в листьях ивы и в коре тополя, наибольшее содержание флавоноидов также характерно для данных образцов (табл. 2).

Для наиболее точной идентификации полифенольных веществ применили метод высокоэффективной жидкостной хроматографии, в экстракте из листьев ивы удалось идентифицировать два флавоноида – рутин и кверцетин (рис. 4).

Таблица 2.

Содержание полифенольных веществ и флавоноидов в сырье –
листьях и коре ивы, листьях и коре тополя

Table 2. Polyphenol and flavonoid content in raw materials – willow leaves and bark, and poplar leaves and bark

Образец	Содержание суммы полифенольных веществ, мг-экв. галловой кислоты/г абсолютно сухого сырья(%)	Содержание суммы флавоноидов, мг-экв. рутина/г абсолютно сухого сырья(%)	Содержание суммы флавоноидов в абсолютно сухом сырье, мг-экв. кверцетина/г абсолютно сухого сырья, (%)
Листья ивы	28,55±0,49 (2,85±0,05)	17,71±0,45 (1,81±0,01)	-
Кора ивы	17,57±0,44 (1,76±0,04)	0,173±0,003 (0,28±0,005)	-
Листья тополя	17,52±0,401 (1,75±0,04)	2,99±0,34 (0,30±0,03)	-
Кора тополя	32,58±0,57 (3,26±0,06)		6,00±0,97 (0,60±0,10)

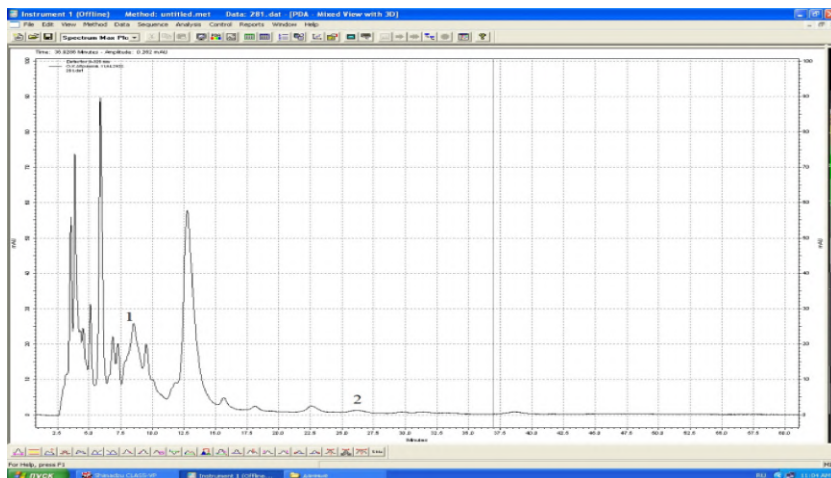


Рис. 4. Хроматограмма экстракта из листьев ивы, экстрагент – 70% этанол.

Обозначения: 1 – рутин, 2 – кверцетин

Fig. 4. Chromatogram of an extract from willow leaves; solvent: 70% ethanol.

Legends: 1 – rutin, 2 – quercetin

Как видно из представленной хроматограммы, в листьях тополя содержится гликозид кверцетина – рутин в достаточно высоких количествах и

кверцетин как минорный компонент. Проведенные ВЭЖХ-исследования экстрактов из тополя показали, что извлечения нуждаются в дополнительной очистке для точной идентификации флавоноидов и полифенольных веществ.

Заключение

1. Методом прямой и дифференциальной спектрофотометрии определено общее количество полифенольных веществ и флавоноидов в листьях и коре ивы белой, листьях и коре тополя черного, произрастающих в засушливых условиях Юга России.

2. Методом тонкослойной хроматографии установлено наличие рутина в листьях ивы и производных кверцетина в листьях тополя.

3. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии идентифицированы рутин и кверцетин в извлечении из листьев ивы.

4. Экстракты из тополя перед проведением качественного и количественного анализа методом ВЭЖХ нуждаются в дополнительной очистке для точной идентификации флавоноидов и полифенольных веществ.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20170, включающего региональное софинансирование от Комитета образования и науки Волгоградской области <https://rscf.ru/project/25-24-20170>.

Список литературы

1. Вагабова, Ф. А., Мамалиева, М. М., & Раджабов, Г. К. (2024). Оценка изменчивости содержания фенольных соединений в надземных органах природных образцов *Silybum marianum* (L.) Gaertn. *Юг России: экология, развитие*, 19(4), 154–163. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-4-13>. EDN: <https://elibrary.ru/FKIPJR>
2. Косенко, А. А., Куркина, А. В., & Куркин, В. А. (2023). Методика количественного определения суммы флавоноидов в листьях тополя белого. *Фармация*, 7(7), 30–36. <https://doi.org/10.29296/25419218-2023-07-04>. EDN: <https://elibrary.ru/XLRYYV>
3. Коруткин, Д. Ю., Абилов, Ж. А., Музычкина, Р. А., & Толстиков, Г. А. (2007). *Природные флавоноиды*. Новосибирск: Академическое издательство: Гео, 232 p. (in Russian).
4. Крючков, С. Н., Солонкин, А. В., & Соломенцева, А. С. (2024). *Селекционное семеноводство для защитного лесоразведения*. Волгоград: Федеральный на-

- учный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 364 p. ISBN: 978-5-605-19724-9. EDN: <https://elibrary.ru/XFQNZG>
5. Кулик, К. Н., Беляев, А. И., & Пугачева, А. М. (2023). Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов. *Аридные экосистемы*, 29(1), 4–14. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-4-14>. EDN: <https://elibrary.ru/CSZXWA>
 6. Кулик, К. Н. (2009). Защитное лесоразведение в РФ: проблемы и стратегия развития до 2020 г. *Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса*, (1), 10–16. EDN: <https://elibrary.ru/LLJNOL>
 7. Кузьмичева, Н. А. (2009). Влияние климатических факторов на содержание флавоноидов в листьях пойменных видов ив (*Salix* sp.). *Вестник фармации*, 4(46), 21–32. EDN: <https://elibrary.ru/KZTWIF>
 8. Мальцева, Е. М., Егорова, Н. О., & Егорова, И. Н. (2011). Количественное определение суммарного содержания флавоноидов в траве кровохлебки лекарственной. *Вестник Уральской медицинской академической науки*, 3(35), 68–69. EDN: <https://elibrary.ru/YSRWSJ>
 9. Поливанова, О. Б., & Чередниченко, М. Ю. (2023). Регуляция и метаболическая инженерия центрального фенилпропаноидного метаболического пути в ответ на воздействие стрессовых факторов у растений. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 26(5), 3–9. <https://doi.org/10.29296/25877313-2023-05-01>. EDN: <https://elibrary.ru/LKLGTE>
 10. Страх, Я. Л., & Игнатовец, О. С. (2020). Изучение содержания фенольных соединений и флавоноидов различных популяций морошки приземистой *Rubus chamaemorus* L. *Вестник фонда фундаментальных исследований*, 4(94), 69–78. EDN: <https://elibrary.ru/ORENNL>
 11. Федуреав, П. В., Скрыпник, Л. Н., & Масленников, П. В. (2017). Особенности накопления фенольных соединений в растениях некоторых видов рода *Rumex* L. *Химия растительного сырья*, (3), 123–130. <https://doi.org/10.14258/jcpm.201703755>. EDN: <https://elibrary.ru/ZFLNYL>
 12. Фролова, О. О., Компанцева, Е. В., & Дементьева, Т. М. (2016). Биологически активные вещества растений рода ива (*Salix* L.). *Фармация и фармакология*, 4(2), 41–59. [https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-2\(15\)-41-59](https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-2(15)-41-59). EDN: <https://elibrary.ru/WCNPDJ>
 13. Berreguioua, A., & Ziane, L. (2024). Ephedra alenda from the Algerian Sahara: Ethnobotanical Investigation, Evaluation of Total Polyphenols, Antioxidant Potential and Antibacterial Properties. *Indian Journal of Agricultural Research*, 59(3). <https://doi.org/10.18805/IJARE.AF-884>. EDN: <https://elibrary.ru/RMQTJJ>
 14. Christie, P. J., Alfenito, M. R., & Walbot, V. (1994). Impact of low-temperature stress on general phenylpropanoid and anthocyanin pathways: Enhancement of transcript

- abundance and anthocyanin pigmentation in maize seedlings. *Planta*, 194(4), 541–549. <https://doi.org/10.1007/bf00714468>. EDN: <https://elibrary.ru/BITSAD>
15. Fraser, C. M., & Chapple, C. (1999). The phenylpropanoid pathway in Arabidopsis. *The Arabidopsis Book*, 9, e0152.
 16. Golubkina, N., Plotnikova, U., Amagova, Z., & Sheshnitsan, S. S. (2023). Peculiarities of willow (*Salix alba*) bark mineral composition. *Trace Elements in Medicine (Moscow)*, 24(1), 47–52. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2023-24-1-47-52>. EDN: <https://elibrary.ru/QZZDLN>
 17. Lahrizi, L., Errachidi, F., & Ghadraoui, L. El. (2024). Impact of geographical conditions on phenolic and flavonoid contents and antioxidant activity of different extracts of ajuga iva. *Indian Journal of Agricultural Research*. <https://doi.org/10.18805/ijare.af-827>. EDN: <https://elibrary.ru/GBDLTU>
 18. Niinemets, Ü. (2015). Uncovering the hidden facets of drought stress: Secondary metabolites make the difference. *Tree Physiology*, 36(2), 129–132. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv128>. EDN: <https://elibrary.ru/WUAAXT>
 19. Qin, Y., Li, Q., & An, Q. (2022). A phenylalanine ammonia lyase from *Fritillaria unibracteata* promotes drought tolerance by regulating lignin biosynthesis and SA signaling pathway. *International Journal of Biological Macromolecules*, 213, 574–588. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.161>. EDN: <https://elibrary.ru/HBQHJZ>
 20. Sannikova, E. G., Popova, O. I., Frolova, O. O., & Airapetova, A. U. (2016). Determination of flavonoids of willow triandra (*Salix triandra* L.) growing in the north Caucasus. *Pharmacy & Pharmacology*, 4(3(16)), 56–67. <https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-3-56-67>. EDN: <https://elibrary.ru/WGCCMF>
 21. Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(99)99017-1)

References

1. Vagabova, F. A., Mamaliev, M. M., & Radzhabov, G. K. (2024). Assessment of variability of phenolic compound content in aboveground organs of natural samples of *Silybum marianum* (L.) Gaertn. *South of Russia: Ecology, Development*, 19(4), 154–163. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-4-13>. EDN: <https://elibrary.ru/FKIPJR>
2. Kosenko, A. A., Kurkina, A. V., & Kurkin, V. A. (2023). Method for quantitative determination of the total flavonoids in white poplar leaves. *Pharmacy*, 7(7), 30–36. <https://doi.org/10.29296/25419218-2023-07-04>. EDN: <https://elibrary.ru/XLRYVV>

3. Korulkin, D. Yu., Abilov, Zh. A., Muzychkina, R. A., & Tolstikov, G. A. (2007). *Natural flavonoids*. Novosibirsk: Academic Publishing House: Geo, 232 p. (in Russian).
4. Kryuchkov, S. N., Solonkin, A. V., & Solomentseva, A. S. (2024). *Selective seed production for protective afforestation*. Volgograd: Federal Scientific Center for Agroecology, Comprehensive Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 364 p. ISBN: 978-5-605-19724-9. EDN: <https://elibrary.ru/XFQNZG>
5. Kulik, K. N., Belyaev, A. I., & Pugacheva, A. M. (2023). The role of protective afforestation in combating drought and desertification of agricultural landscapes. *Arid Ecosystems*, 29(1), 4–14. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-4-14>. EDN: <https://elibrary.ru/CSZXWA>
6. Kulik, K. N. (2009). Protective afforestation in the Russian Federation: Problems and development strategy until 2020. *Theoretical and Applied Problems of the Agro-Industrial Complex*, (1), 10–16. EDN: <https://elibrary.ru/LLJNOL>
7. Kuzmicheva, N. A. (2009). Influence of climatic factors on the flavonoid content in leaves of floodplain willow species (*Salix* sp.). *Bulletin of Pharmacy*, 4(46), 21–32. EDN: <https://elibrary.ru/KZTWIF>
8. Maltseva, E. M., Egorova, N. O., & Egorova, I. N. (2011). Quantitative determination of the total flavonoid content in the herb of *Sanguisorba officinalis*. *Bulletin of the Ural Medical Academic Science*, 3(35), 68–69. EDN: <https://elibrary.ru/YSRWSJ>
9. Polivanova, O. B., & Cherednichenko, M. Yu. (2023). Regulation and metabolic engineering of the central phenylpropanoid metabolic pathway in response to stress factors in plants. *Issues of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 26(5), 3–9. <https://doi.org/10.29296/25877313-2023-05-01>. EDN: <https://elibrary.ru/LKLGTE>
10. Strakh, Ya. L., & Ignatovets, O. S. (2020). Study of the content of phenolic compounds and flavonoids in various populations of cloudberry *Rubus chamaemorus* L. *Bulletin of the Fund for Fundamental Research*, 4(94), 69–78. EDN: <https://elibrary.ru/ORENNL>
11. Feduraev, P. V., Skrypnik, L. N., & Maslennikov, P. V. (2017). Characteristics of phenolic compound accumulation in plants of some species of the genus *Rumex* L. *Chemistry of Plant Raw Material*, (3), 123–130. <https://doi.org/10.14258/jcprm.201703755>. EDN: <https://elibrary.ru/ZFLNYL>
12. Frolova, O. O., Kompantseva, E. V., & Dementeva, T. M. (2016). Biologically active substances of plants of the willow genus (*Salix* L.). *Pharmacy and Pharmacology*, 4(2), 41–59. [https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-2\(15\)-41-59](https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-2(15)-41-59). EDN: <https://elibrary.ru/WCNPDJ>

13. Berreguioua, A., & Ziane, L. (2024). Ephedra alenda from the Algerian Sahara: Ethnobotanical Investigation, Evaluation of Total Polyphenols, Antioxidant Potential and Antibacterial Properties. *Indian Journal of Agricultural Research*, 59(3). <https://doi.org/10.18805/IJAre.AF-884>. EDN: <https://elibrary.ru/RMQTJJ>
14. Christie, P. J., Alfenito, M. R., & Walbot, V. (1994). Impact of low-temperature stress on general phenylpropanoid and anthocyanin pathways: Enhancement of transcript abundance and anthocyanin pigmentation in maize seedlings. *Planta*, 194(4), 541–549. <https://doi.org/10.1007/bf00714468>. EDN: <https://elibrary.ru/BITSAD>
15. Fraser, C. M., & Chapple, C. (1999). The phenylpropanoid pathway in Arabidopsis. *The Arabidopsis Book*, 9, e0152.
16. Golubkina, N., Plotnikova, U., Amagova, Z., & Sheshnitsan, S. S. (2023). Peculiarities of willow (*Salix alba*) bark mineral composition. *Trace Elements in Medicine (Moscow)*, 24(1), 47–52. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2023-24-1-47-52>. EDN: <https://elibrary.ru/QZZDLN>
17. Lahrizi, L., Errachidi, F., & Ghadraoui, L. El. (2024). Impact of geographical conditions on phenolic and flavonoid contents and antioxidant activity of different extracts of *ajuga iva*. *Indian Journal of Agricultural Research*. <https://doi.org/10.18805/ijare.af-827>. EDN: <https://elibrary.ru/GBDLTU>
18. Niinemets, Ü. (2015). Uncovering the hidden facets of drought stress: Secondary metabolites make the difference. *Tree Physiology*, 36(2), 129–132. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv128>. EDN: <https://elibrary.ru/WUAAXT>
19. Qin, Y., Li, Q., & An, Q. (2022). A phenylalanine ammonia lyase from *Fritillaria unibracteata* promotes drought tolerance by regulating lignin biosynthesis and SA signaling pathway. *International Journal of Biological Macromolecules*, 213, 574–588. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.161>. EDN: <https://elibrary.ru/HBQHJZ>
20. Sannikova, E. G., Popova, O. I., Frolova, O. O., & Airapetova, A. U. (2016). Determination of flavonoids of willow triandra (*Salix triandra* L.) growing in the north Caucasus. *Pharmacy & Pharmacology*, 4(3(16)), 56–67. <https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-3-56-67>. EDN: <https://elibrary.ru/WGCCMF>
21. Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(99)99017-1)

ВКЛАД АВТОРОВ

Рябуха А.Ф., Плетнева И.В.: разработка концепции научной работы, анализ экспериментальных данных, оформление научной работы.

Гейсман А.Н., Корнеев М.М.: получение и обработка результатов исследования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anna F. Ryabukha, Irina V. Pletneva development of the research concept, analysis of experimental data, and preparation of the research paper.

Alexander N. Geisman, Mikhail M. Korneev: collection and processing of research results.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Рябуха Анна Федоровна, кандидат фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»

пр. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
ryabuha-af@vfanc.ru

Плетнева Ирина Владимировна, кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры организации фармацевтического дела, фармацевтической технологии и биотехнологии

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет»
пл. Павших Борцов, 1, г. Волгоград, 400066, Российская Федерация
i.v.pletneva@yandex.ru

Гейсман Александр Николаевич, кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры фармацевтической и токсикологической химии, фармакогнозии и ботаники

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет»
пл. Павших Борцов, 1, г. Волгоград, 400066, Российская Федерация
geisman-1@mail.ru

Корнеев Михаил Михайлович, студент 5 курса фармацевтического факультета

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет»
пл. Павших Борцов, 1, г. Волгоград, 400066, Российская Федерация
mikhailkorneev63@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna F. Ryabukha, PhD in Pharmacy, Leading Researcher

Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences"

97, Universitetskij Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation
ryabuha-af@vfanc.ru
SPIN-code: 8252-7295
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7659-0252>
Researcher ID: ABA-1436-2021
Scopus Author ID: 37034966800

Irina V. Pletneva, PhD in Pharmacy, Associate Professor of the Department of Organization of Pharmaceutical Business, Pharmaceutical Technology and Biotechnology
Volgograd State Medical University
1, Pavshikh Bortsov Sq., Volgograd, 400066, Russian Federation
i.v.pletneva@yandex.ru
SPIN-code: 8922-3469
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1014-7439>

Alexander N. Geisman, PhD in Pharmacy, Associate Professor of Department of Pharmaceutical and Toxicological Chemistry, Pharmacognosy and Botany
Volgograd State Medical University
1, Pavshikh Bortsov Sq., Volgograd, 400066, Russian Federation
geisman-1@mail.ru
SPIN-code: 4035-1746
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3086-7209>
ResearcherID: N-8277-2015
Scopus Author ID: 55910074800
Academia.edu: <https://independent.academia.edu/AGeisman>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Geisman-2>

Mikhail M. Korneev, 5th year Student of the Faculty of Pharmacy
Volgograd State Medical University
1, Pavshikh Bortsov Sq., Volgograd, 400066, Russian Federation
mikhailkorneev63@gmail.com

Поступила 10.01.2026
После рецензирования 26.02.2026
Принята 28.02.2026

Received 10.01.2026
Revised 26.02.2026
Accepted 28.02.2026

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

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1453](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1453)

EDN: [FQVYOC](https://www.edn.ru/FQVYOC)

УДК 645.2.022.21.054. 676.22/.28.03



Пробиотические свойства молочнокислых бактерий, выделенных из репродуктивной системы коров экоферм Северо-Запада России

Е.А. Йылдырым^{1,2}, В.А. Филиппова^{1,2}, И.А. Ключникова¹,
К.А. Соколова^{1,2}, Л.А. Ильина^{1,2}, А.А. Савичева², Е.А. Корочкина³

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

²ООО «БИОТРОФ»

³Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной
медицины, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Применение пробиотиков, способных восстанавливать нормальную микробиоту репродуктивной системы коров и повышать устойчивость к инфекциям является многообещающим направлением.

Целью исследования было выделение, идентификация и характеристика перспективных штаммов молочнокислых бактерий, выделенных из репродуктивного тракта здоровых коров, для разработки нового биопрепарата, направленного на профилактику эндометрита.

Материалы и методы. Биологический материал (соскобы со стенок влагалища) для выделения перспективных штаммов лактобактерий отбирался у 10 клинически здоровых дойных коров из трех экоферм (Северо-Западного региона РФ и республики Карелии). Выделение чистых культур осуществляли методом посева серийных разведений на селективную агаризованную среду, а идентификацию проводили стандартными микробиологическими методами, включая ПЦР-анализ. Антагонистическую активность против 10 патогенных и условно-патогенных микроорганизмов оценивали *in vitro* методом диффузии в агар.

Результаты. Выделено 95 изолятов лактобактерий. Скрининг 42 штаммов лактобактерий выявил 19 активных и умеренно активных вариантов с антимикробной активностью в отношении патогенов. Штамм Э-49 (*Lactobacillus* sp.) показал максимальную антагонистическую активность против *Clostridium perfringens*

($38 \pm 1,0$ мм) и *Enterococcus faecalis* ($32 \pm 1,9$ мм). Штамм Э-52 (*Lactobacillus* sp.) активно подавлял рост *Penicillium* sp. ($37 \pm 1,5$ мм) и *Streptococcus agalactiae* ($21 \pm 0,9$ мм). Все протестированные штаммы не проявляли гемолитической активности. Некоторые активные штаммы, такие как Э-49, Э-52 и Э-10, показали стабильные титры жизнеспособных клеток в течение 30 суток хранения ($2,4 \times 10^9 \pm 1,5 \times 10^8$ и $1,4 \times 10^9 \pm 7,0 \times 10^7$ КОЕ/мл для Э-52 через 10 и 30 суток, $7,3 \times 10^9 \pm 6,2 \times 10^8$ КОЕ/мл для Э-10 через 30 суток) и оптимальные значения pH (3,8–4,2).

Ключевые слова: дойные коровы; экоферма; эндометрит; пробиотики; микробиота репродуктивного тракта; молочнокислые бактерии; профилактика эндометрита

Для цитирования. Йылдырым, Е. А., Филиппова, В. А., Ключникова, И. А., Соколова, К. А., Ильина, Л. А., Савичева, А. А., & Корочкина, Е. А. (2026). Пробиотические свойства молочнокислых бактерий, выделенных из репродуктивной системы коров экоферм Северо-Запада России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 226–251. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1453>

Probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from the reproductive system of cows on eco-farms in the North-West of Russia

Е.А. Yildirim^{1,2}, В.А. Fillipova^{1,2}, I.A. Klyuchnikova¹,
K.A. Sokolova¹, L.A. Ilina^{1,2}, A.A. Savicheva², E.A. Korochkina³

¹Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russian Federation

²Biotrof LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

³Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

Background. The application of probiotics capable of restoring the normal microbiota of the cow's reproductive tract and enhancing resistance to infections represents a promising direction.

Purpose. The aim of this study was to isolate, identify, and characterize promising lactic acid bacteria strains from the reproductive tract of healthy cows for the development of a novel biopreparation aimed at the prevention of endometritis.

Materials and methods. Biological material (vaginal wall swabs) for the isolation of prospective *Lactobacilli* strains was collected from ten clinically healthy dairy cows on three eco-farms (located in the North-Western region of the Russian Federation and the Republic of Karelia). Isolation of pure cultures was performed by plating serial dilutions

onto a selective agar medium. Identification was carried out using standard microbiological methods, including PCR analysis. Antagonistic activity against ten pathogenic and opportunistic microorganisms was assessed in vitro using the agar diffusion method.

Results. A total of 95 *Lactobacilli* isolates were obtained. Screening of 42 *lactobacilli* strains revealed 19 active and moderately active variants exhibiting antimicrobial activity against pathogens. Strain E-49 (*Lactobacillus* sp.) demonstrated the highest antagonistic activity against *Clostridium perfringens* ($38 \pm 1,0$ mm) and *Enterococcus faecalis* ($32 \pm 1,9$ mm). Strain E-52 (*Lactobacillus* sp.) actively inhibited the growth of *Penicillium* sp. ($37 \pm 1,5$ mm) and *Streptococcus agalactiae* ($21 \pm 0,9$ mm). None of the tested strains exhibited hemolytic activity. Several active strains, such as E-49, E-52, and E-10, demonstrated stable titers of viable cells over 30 days of storage ($2,4 \times 10^9 \pm 1,5 \times 10^8$ and $1,4 \times 10^9 \pm 7,0 \times 10^7$ CFU/mL for E-52 at 10 and 30 days, and $7,3 \times 10^9 \pm 6,2 \times 10^8$ CFU/mL for E-10 at 30 days) and optimal pH values (3,8-4,2).

Keywords: dairy cattle; eco-farm; endometritis; probiotics; reproductive tract microbiota; lactic acid bacteria; prevention

For citation. Yildirim, E. A., Fillipova, V. A., Klyuchnikova, I. A., Sokolova, K. A., Plina, L. A., Savicheva, A. A., & Korochkina, E. A. (2026). Probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from the reproductive system of cows on eco-farms in the North-West of Russia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 226–251. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1453>

Введение

Воспалительные заболевания репродуктивной системы коров, в частности эндометрит, являются одной из наиболее распространенных и экономически значимых проблем в современном животноводстве [22]. Эндометриты приводят к снижению фертильности, увеличению сервис-периода, повышению затрат на ветеринарное обслуживание, а также к преждевременной выбраковке животных, что наносит значительный ущерб молочному скотоводству, особенно, высокопродуктивному. Традиционные методы лечения эндометрита, основанные на применении антибиотиков и гормональных препаратов, не удовлетворяют стратегии экологизации и нарушают состав естественного микробиома репродуктивной системы [19]. В связи с этим, разработка альтернативных методов профилактики и лечения эндометрита является актуальной задачей.

Одним из перспективных направлений в решении данной проблемы является применение пробиотических препаратов, содержащих полезные

микроорганизмы, способные оказывать положительное влияние на микробиоту репродуктивного тракта коров [23]. Пробиотики могут применяться для восстановления нормальной микробиоты после антибиотикотерапии, для профилактики развития патогенных микроорганизмов, а также для стимуляции иммунной системы животных, что способствует повышению естественной устойчивости к инфекциям. Известно, что микроорганизмы колонизируют практически во всех биотопы организма, существуя в симбиотических отношениях. Состав этих популяций зависит от множества факторов, включая окружающую среду, возраст хозяина, пол, рацион, общее физиологическое состояние и фазу эстрального цикла [14]. Нарушения в микробных сообществах могут репродуктивного тракта может спровоцировать каскад неблагоприятных последствий, варьирующихся от дисбактериоза до яловости и выбраковки.

Механизмы действия пробиотиков в репродуктивном тракте коров включают конкурентное исключение патогенных микроорганизмов, продукцию антимикробных веществ (бактериоцинов, органических кислот), модуляцию иммунного ответа и улучшение барьерной функции эпителия [8]. Конкурентное исключение достигается за счет конкуренции пробиотических микроорганизмов с патогенами за сайты адгезии на эпителиальных клетках, а также за питательные вещества [13]. Бактериоцины и органические кислоты, продуцируемые пробиотиками, способны ингибировать рост и размножение широкого спектра патогенных бактерий, таких, как *E. coli*, *Clostridium difficile*, *Vibrio cholera*, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* и других [17]. Кроме того, пробиотики могут стимулировать выработку антимикробных пептидов эпителиальными клетками, а также модулировать иммунный ответ, активируя дендритные клетки, макрофаги, В- и Т-лимфоциты и другие клетки иммунной системы, что способствует повышению устойчивости к инфекциям [10].

Важным аспектом разработки эффективных пробиотических препаратов является многоэтапный скрининг штаммов микроорганизмов, обладающих комплексом пробиотических свойств, включая высокую адгезивную способность, антагонистическую активность против патогенных бактерий, устойчивость к антибиотикам и способность к выживанию и колонизации в репродуктивном тракте коров [15]. Кроме того, необходимо учитывать безопасность применяемых штаммов, а также их способность к взаимодействию с другими микроорганизмами нормальной и условно-патогенной микробиоты [21].

В настоящее время на рынке представлен широкий ассортимент пробиотических препаратов для применения в животноводстве, однако большинство из них не разработаны специально для профилактики и лечения эндометрита у коров и не учитывают специфические особенности микробиоты репродуктивного тракта этих животных [2]. В связи с этим, актуальной задачей является разработка и создание новых пробиотических препаратов, предназначенных для целенаправленного применения в животноводстве с целью профилактики и лечения воспалительных заболеваний репродуктивной системы коров.

Целью исследования было выделение из репродуктивного тракта клинически здоровых коров, первичная идентификация и характеристика свойств перспективных штаммов молочнокислых бактерий, обладающих комплексом необходимых пробиотических свойств, для дальнейшего использования в разработке нового биопрепарата для профилактики эндометрита.

Материалы и методы исследования

Отбор биологического материала для выделения перспективных штаммов лактобактерий проводили с соблюдением строгих условий асептики для обеспечения индивидуальности и предупреждения перекрестного контаминирования проб. Сбор образцов осуществляли у 10 клинически здоровых коров из 2 экоферм Северо-Западного региона РФ, а также фермы Валаамского монастыря (Республика Карелия, Сортавальский район, остров Валаам) и другие, где содержание и кормление животных приближены к естественным условиям.

Подготовка животных к отбору образцов включала покрытие хвоста стерильной марлей, а промежность и вульву тщательно промывали водой с мылом до полного очищения, после чего обрабатывали антисептическим раствором. Сбор соскобов с поверхности влагалища проводили с использованием цитобруша из верхнебокового свода влагалища на уровне шейки матки. Образцы доставляли в лабораторию в условиях охлаждения в транспортных средах (рис. 1) не более чем за 2 часа после отбора.

Микроорганизмы (предположительно лактобактерии) из соскобов репродуктивной системы коров высевали методом предельных разведений на селективные агаризованные питательные среды (в частности, Lactobacillus Selection Agar Base с добавлением 0,15% Oxgall (HiMedia) для повышения селективности) (рис. 2).

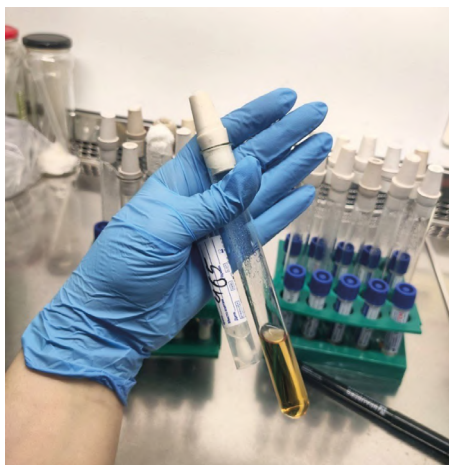


Рис. 1. Пересев изолятов с транспортных сред и культивирование изолятов молочнокислых бактерий, выделенных из репродуктивной системы коров, с целью подбора перспективных штаммов - перспективных компонентов суппозитория

Fig. 1. Subculturing isolates from transport media and culturing lactic acid bacteria isolates obtained from the reproductive system of cows to select promising strains - promising components for suppositories

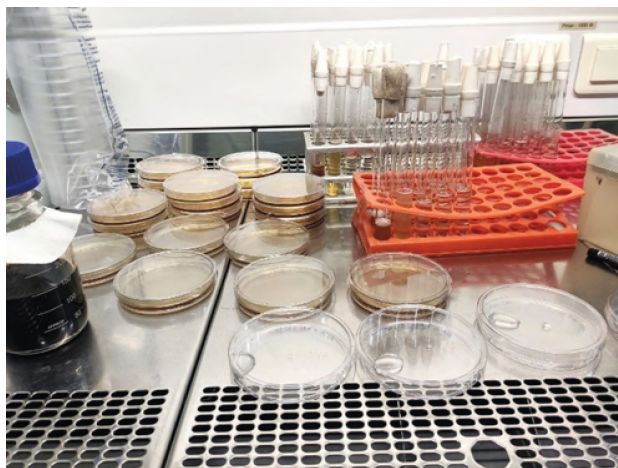


Рис. 2. Пересев колоний перспективных микроорганизмов со сред накопления на плотную питательную среду

Fig. 2. Transfer of colonies of promising microorganisms from accumulation media to a solid culture medium

После культивирования первичных посевов отбирались накопительные культуры, имеющие визуальные признаки лактобактерий. Общее количество отобранных изолятов составило 95. Затем проводился пересев колоний с накопительных сред на плотные селективные среды для получения изолированных колоний. Чистые культуры микроорганизмов выделялись классическими методами микробиологии [1]. Проверка чистоты культур проводилась визуальным контролем, микроскопией клеток и рассевом на селективные среды.

На следующем этапе проводилась идентификация выделенных чистых культур с использованием классических методов микробиологии, основанных на морфологических и биохимических характеристиках, с применением диагностических ключей, представленных в определителе бактерий Берджи.

С целью подтверждения таксономической принадлежности перспективных штаммов был проведен ПЦР-анализ с использованием родо- и видоспецифичных праймеров, разработанных на основе данных NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>) (табл. 1).

Таблица 1.

Праймеры, использованные при изучении таксономической принадлежности перспективных штаммов лактобактерий

Table 1. Primers used to determine the taxonomic classification of promising *Lactobacillus* strains

Род/вид лактобактерий	Последовательность праймеров (5'-3'), используемых для ПЦР
<i>Enterococcus</i> sp.	TCAACCGGGGAGGGT ATTACTAGCGATTCCGG
<i>Lactobacillus</i> sp.	AGA GTT TGA TCC TGG CTC AGG A ACG CTT GCC ACC TAC GTA TTA C
<i>L. acidophilus</i>	TGCAAAGTGGTAGCGTAAGC CCTTTCCCTCACGGTACTG
<i>L. crispatus</i>	AGGATATGGAGAGCAGGAAT CAACTATCTCTTACACTGCC
<i>L. gasseri</i>	AGCGACCGAGAAGAGAGAGA TGCTATCGCTTCAAGTGCTT
<i>L. fermentum</i>	ACTAACTTGACTGATCTACGA TTCAGTCTCAAGTAATCATC
<i>L. johnsonii</i>	GATGATTTTAGTTCTTGCACTAA TCTACGCATTCCACCGCTAC
<i>L. reuteri</i>	CAGACAATCTTTGATTGTTAG GCTTGTTGGTTTGGGCTCTTC
<i>L. salivarius</i>	AATCGCTAAACTCATAACCTT CACTCTCTTTGGCTAATCTT

После инкубации при 37 °С в течение 24-48 часов подсчитывали количество колониеобразующих единиц (КОЕ) на мл путем серийных разведений и посева на чашки. Через 10 и 30 суток хранения определяли стабильность при хранении путем оценки титра жизнеспособных клеток.

Гемолитическую активность штаммов оценивали путем посева на 5%-ный кровяной агар (агар с добавлением 5% дефибринированной крови). Чашки инкубировали при 37 °С в течение 24-48 ч.

Гемолитическую активность определяли визуально по наличию зон гемолиза вокруг колоний: α -гемолиз (зеленоватая зона), β -гемолиз (прозрачная зона) или γ -гемолиз (отсутствие гемолиза). Штаммы, не проявляющие гемолитической активности (γ -гемолиз), рассматривались как потенциально безопасные для использования в пробиотических препаратах.

Для определения pH культуры бактерий выращивали в течение 24 ч при 37 °С. Значение pH измеряли с помощью pH-метра, откалиброванного с использованием стандартных буферных растворов. Титруемую кислотность определяли путем титрования 10 мл культуральной жидкости 0,1 N раствором NaOH в присутствии фенолфталеина в качестве индикатора. Титруемую кислотность выражали в градусах Тернера (Т°).

Для выявления перспективных штаммов с высоким уровнем активности была произведена оценка антибактериальных и антифунгальных свойств 42 штаммов лактобактерий в отношении 10 патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, в том числе, играющих роль в патогенезе эндометритов крупного рогатого скота.

Для оценки антимикробной активности *in vitro* применялись методы агаровых блоков и перпендикулярных штрихов. В качестве тестовых микроорганизмов использовались: *Clostridium perfringens*, *Enterococcus faecalis*, *Enterobacter* sp., *Mycoplasma* sp., *Trueperella* sp., *Streptococcus agalactiae*, *Staphylococcus aureus*, *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., *Escherichia coli*. Культуры патогенных микроорганизмов были получены как путем выделения из проб, отобранных у коров с эндометритом, так и из существующих коллекций микроорганизмов. Диаметры зон подавления роста измеряли в миллиметрах.

Для анализа результатов были использованы методы математической статистики, включая многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Расчеты проводились с применением программного средства Microsoft Excel XP/2003.

Результаты исследования

В ходе массового скрининга из образцов репродуктивной системы клинически здоровых коров, содержащихся в условиях, приближенных к естественным, было выделено 95 изолятов микроорганизмов. После первичного выделения и культивирования на селективных средах были получены чистые культуры.

С целью выявления перспективных штаммов с высоким уровнем антагонистической активности *in vitro* была произведена оценка антибактериальных и антифунгальных свойств 42 штаммов лактобактерий в отношении 10 патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, играющих ключевую роль в патогенезе эндометритов крупного рогатого скота (рис. 3 – 5).



Рис. 3. Рост колоний микромицетов, выделенных из репродуктивной системы коров с диагнозом «эндометрит», предназначенных для дальнейшего исследования антагонистической активности перспективных штаммов бактерий

Fig. 3. Growth of micromycete colonies isolated from the reproductive tract of cows diagnosed with “endometritis,” intended for further study of the antagonistic activity of promising bacterial strains

Полученные данные показали широкий диапазон активности изучаемых штаммов. Некоторые штаммы демонстрировали высокую степень антимикробного эффекта, вызывая образование значительных зон задержки роста (до 38 мм), другие штаммы показывали менее выраженную активность или отсутствие признаков воздействия на рост патогенов (табл. 2). Среди протестированных штаммов лактобактерий было выявлено 19 активных и умеренно активных вариантов, показавших антимикробную

активность. Другие штаммы продемонстрировали несущественные или нулевые эффекты.

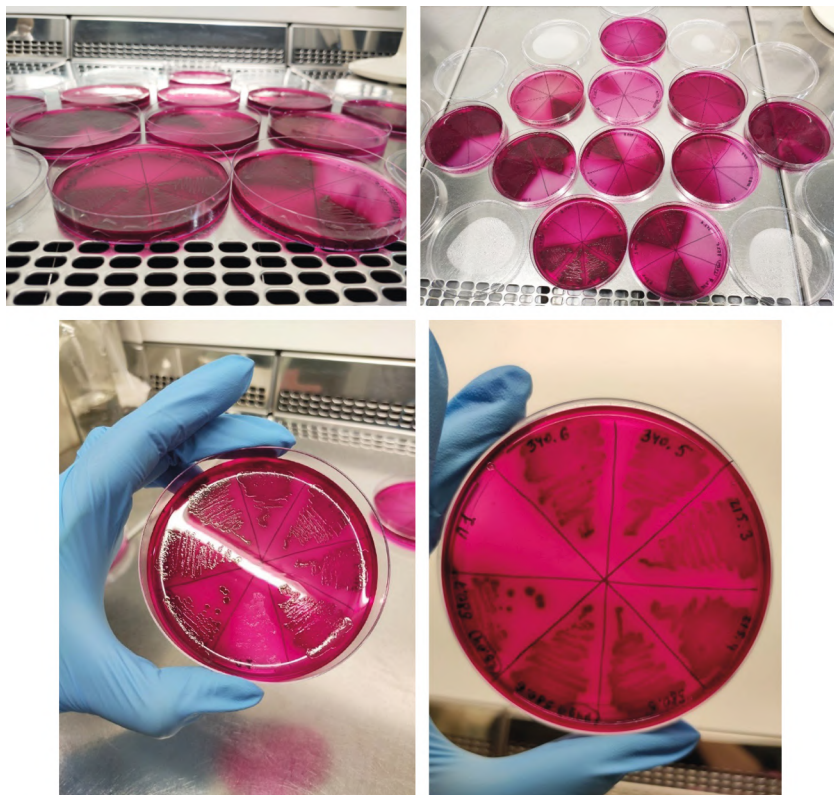


Рис. 4. Рост колоний энтеробактерий, выделенных из репродуктивной системы коров с диагнозом «эндометрит», на селективной среде Эндо, предназначенных для дальнейшего исследования антагонистической активности перспективных штаммов бактерий

Fig. 4. Growth of enterobacterial colonies isolated from the reproductive tract of cows diagnosed with “endometritis” on Endo selective medium, intended for further investigation of the antagonistic activity of promising bacterial strains

Среди активных штаммов наиболее выраженную антагонистическую активность продемонстрировали Э-49 (423.2) против *Clostridium perfringens* ($38 \pm 1,0$ мм), *Enterococcus faecalis* ($32 \pm 1,9$ мм) и других тест-штаммов, а также Э-52 (451.5) в отношении *Penicillium* sp. ($37 \pm 1,5$

мм) и *Streptococcus agalactiae* ($21 \pm 0,9$ мм). Штамм Э-10 (451.2) показал высокую активность против *Clostridium perfringens* ($29 \pm 1,5$ мм) и *Aspergillus* sp. ($26 \pm 1,0$ мм). Умеренно активные штаммы, хоть и с меньшими зонами задержки роста, также проявляли широкий спектр антагонизма (табл. 2).

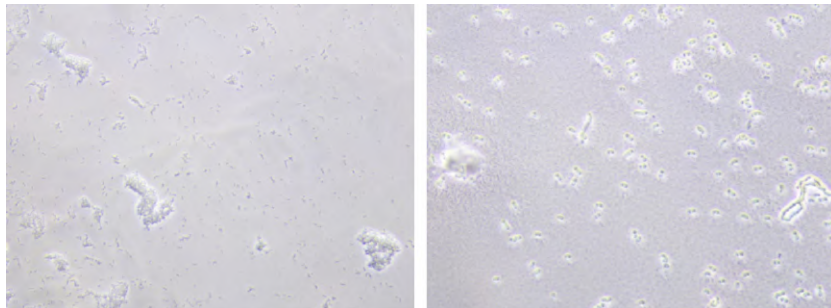


Рис. 5. Изучение морфологии условно-патогенных и патогенных штаммов энтеробактерий, выделенных из репродуктивной системой коров, предназначенных для дальнейшего исследования антагонистической активности перспективных штаммов бактерий (микроскопия, увеличение $\times 40$)

Fig. 5. Study of the morphology of opportunistic and pathogenic strains of enterobacteria isolated from the reproductive tract of cows, intended for further investigation of the antagonistic activity of promising bacterial strains (microscopy, $\times 40$ magnification)

Таблица 2.

Антимикробная активность бактерий-антагонистов: размер зон задержки роста патогенных и условно патогенных тест-штаммов, мм ($M \pm m$, $n=3$)

Table 2. Antimicrobial activity of antagonistic bacteria: size of growth inhibition zones for pathogenic and opportunistic test strains, mm ($M \pm m$, $n=3$)

Штамм лакто-бактерий	<i>Clostridium perfringens</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>Enterobacter</i> sp.	<i>Mycoplasma</i> sp.	<i>Trueperella</i> sp.	<i>Streptococcus agalactiae</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Aspergillus</i> sp.	<i>Penicillium</i> sp.	<i>Escherichia coli</i>
Активные штаммы										
Э-10 (451.2)	$29 \pm 1,5$	$31 \pm 1,4$	$11 \pm 0,6$	$5 \pm 0,6$	$3 \pm 0,7$	$14 \pm 0,8$	$4 \pm 0,2$	$26 \pm 1,0$	$15 \pm 0,4$	$5 \pm 0,8$
Э-44 (362.2)	$35 \pm 1,3$	$28 \pm 1,2$	$9 \pm 0,7$	н/о	$3 \pm 0,5$	$28 \pm 1,0$	$7 \pm 0,9$	$17 \pm 0,4$	$22 \pm 0,7$	$9 \pm 0,6$
Э-25 (451)	$32 \pm 1,1$	$5 \pm 0,5$	$10 \pm 0,9$	$3 \pm 0,2$	$9 \pm 0,6$	$16 \pm 0,7$	$4 \pm 0,6$	$22 \pm 0,6$	$18 \pm 0,5$	$4 \pm 0,4$
Э-49 (423.2)	$38 \pm 1,0$	$32 \pm 1,9$	н/о	н/о	$6 \pm 0,2$	$12 \pm 0,7$	$2 \pm 0,1$	$20 \pm 0,9$	$18 \pm 0,4$	$9 \pm 0,3$
Э-52 (451.5)	$26 \pm 0,9$	$24 \pm 1,2$	$3 \pm 0,1$	$5 \pm 0,3$	$11 \pm 0,7$	$21 \pm 0,9$	$9 \pm 0,5$	$24 \pm 0,8$	$37 \pm 1,5$	$3 \pm 0,2$
Умеренно активные штаммы										
Э-55 (451.3)	$7 \pm 0,3$	$13 \pm 0,6$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,1$	$6 \pm 0,2$	$10 \pm 0,4$	$8 \pm 0,4$	$12 \pm 0,7$	$14 \pm 0,8$	н/о

Э-20 (400.13)	13±0,6	11±0,5	11±0,6	н/о	н/о	4±0,1	н/о	6±0,4	10±0,6	н/о
Э-35 (580)	11±0,5	9±0,4	3±0,1	н/о	н/о	7±0,4	4±0,1	8±0,5	12±0,7	н/о
Э-42 (362)	14±0,4	17±0,7	5±0,2	н/о	4±0,1	8±0,3	н/о	10±0,6	8±0,5	н/о
Э-40 (20)	15±0,7	15±0,7	7±0,3	н/о	н/о	н/о	6±0,2	14±0,6	16±0,9	н/о
Э-3 (379)	7±0,4	6±0,5	н/о	н/о	2±0,1	н/о	3±0,1	10±0,6	1±0,1	н/о
Э-12 (451.8)	6±0,3	н/о	н/о	н/о	н/о	1±0,1	н/о	2±0,1	4±0,3	3±0,2
Э-17 (451.6)	5±0,3	2±0,2	2±0,1	н/о	н/о	н/о	н/о	1±0,1	2±0,1	н/о
Э-28 (215)	н/о	н/о	1±0,1	н/о	н/о	н/о	н/о	9±0,6	7±0,3	н/о
Э-33 (400)	6±0,3	н/о	2±0,1	н/о	н/о	н/о	н/о	11±0,7	12±0,5	н/о
Э-11 (395.4)	н/о	4±0,2	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	1±0,1	5±0,2	1±0,1
Э-73 (432.4)	4±0,2	н/о	2±0,2	н/о	н/о	2±0,2	н/о	4±0,3	2±0,2	н/о
Э-78 (432.1)	2±0,1	н/о	н/о	н/о	н/о	4±0,3	н/о	3±0,2	3±0,1	н/о
Э-9 (395.3)	4±0,2	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	1±0,1	6±0,4	1±0,1

Примечание: *н/о – отсутствие значимого результата

Note: *н/о – no significant result

Идентификация морфологических и биохимических свойств позволила отнести данные изоляты к порядку *Lactobacillales*. В результате ПЦР-анализа было установлено, что выделенные штаммы относятся к родам *Enterococcus* sp. и *Lactobacillus* sp. (табл. 3). Часть видов рода *Lactobacillus* была идентифицирована как *L. acidophilus*, *L. crispatus*, *L. fermentum* и *L. johnsonii*.

Таблица 3.

**Результаты идентификация перспективных штаммов методом
ПЦР-амплификации**

Table 3. Results of the identification of promising strains using PCR amplification

Штамм бактерии	Морфология (описание)	Таксономическое положение	
		Порядок (установлен методом идентификация морфологических и био- химических свойств)	Роды (установ- лено методом ПЦР)
Э-3 (379)	палочки, образуют цепочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-9 (395.3)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-10 (451.2)	кокки	Lactobacillales	<i>Enterococcus</i> sp.
Э-11 (395.4)	палочки, короткие, одиночные	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-12 (451.8)	кокки	Lactobacillales	<i>Enterococcus</i> sp.
Э-17 (451.6)	палочки, образуют скопления	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-20 (400.13)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-25 (451)	палочки, слегка изогнутые	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.

Штамм бактерии	Морфология (описание)	Таксономическое положение	
		Порядок (установлен методом идентификации морфологических и биохимических свойств)	Роды (установлено методом ПЦР)
Э-28 (215)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-33 (400)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-35 (580)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-40 (20)	кокки, крупные и выпуклые	Lactobacillales	<i>Enterococcus</i> sp.
Э-42 (362)	палочки, с заостренными концами	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-44 (362.2)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-49 (423.2)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-52 (451.5)	палочки, маленькие и тонкие	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-55 (451.3)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-73 (432.4)	палочки	Lactobacillales	<i>Lactobacillus</i> sp.
Э-78 (432.1)	кокки, в парах	Lactobacillales	<i>Enterococcus</i> sp.

Анализ данных показал, что все 19 протестированных штаммов *Lactobacillus* и штаммы *Enterococcus* не проявили гемолитической активности на 5%-ном кровяном агаре, что подтверждает их потенциальную безопасность для использования в составе пробиотических добавок (табл. 4).

Таблица 4.

Определение жизнеспособности и безопасности перспективных штаммов: анализ гемолиза, стабильности титра при хранении, pH и кислотности культуральной среды при культивировании ($M \pm m$, $n=3$)

Table 4. Assessment of the viability and safety of promising strains: analysis of hemolysis, titers stability during storage, pH, and acidity of the culture medium during cultivation ($M \pm m$, $n=3$)

Штамм бактерии	Таксономическое положение	Гемолитическая активность на 5%-ном кровяном агаре *	Изменение титра в процессе культивирования и хранения, КОЕ/мл			pH через 24 ч культивирования образцов	Уровень титруемой кислотности (T°) через 24 ч культивирования образцов
			24 ч	10 сут.	30 сут.		
Э-3 (379)	<i>Lactobacillus</i> sp.	..**	$2,3 \times 10^8 \pm 1,4 \times 10^8$	$1,8 \times 10^8 \pm 7,0 \times 10^7$	$9,1 \times 10^8 \pm 4,3 \times 10^7$	$4,3 \pm 0,41$	$92 \pm 7,9$
Э-9 (395.3)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$5,6 \times 10^8 \pm 7,4 \times 10^7$	$5,9 \times 10^8 \pm 2,5 \times 10^7$	$1,8 \times 10^8 \pm 1,8 \times 10^7$	$4,6 \pm 0,24$	$85 \pm 4,5$
Э-10 (451.2)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$1,9 \times 10^8 \pm 4,0 \times 10^7$	$9,5 \times 10^8 \pm 4,8 \times 10^8$	$7,3 \times 10^8 \pm 6,2 \times 10^8$	$3,8 \pm 0,36$	$93 \pm 7,5$
Э-11 (395.4)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$8,8 \times 10^8 \pm 3,9 \times 10^7$	$4,2 \times 10^8 \pm 3,1 \times 10^7$	$5,9 \times 10^8 \pm 2,0 \times 10^7$	$4,1 \pm 0,31$	$89 \pm 6,4$

Штамм бактерии	Таксономическое положение	Гемолитическая активность на 5%-ном кровяном агаре*	Изменение титра в процессе культивирования и хранения, КОЕ/мл			рН через 24 ч культивирования образцов	Уровень титруемой кислотности (Т°) через 24 ч культивирования образцов
			24 ч	10 сут.	30 сут.		
Э-12 (451.8)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$3,1 \times 10^8 \pm 1,9 \times 10^8$	$4,5 \times 10^8 \pm 1,3 \times 10^8$	$1,2 \times 10^8 \pm 7,0 \times 10^7$	$4,2 \pm 0,45$	$89 \pm 6,1$
Э-17 (451.6)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$8,5 \times 10^7 \pm 5,8 \times 10^6$	$7,6 \times 10^7 \pm 3,8 \times 10^6$	$4,8 \times 10^7 \pm 2,4 \times 10^6$	$4,8 \pm 0,48$	$75 \pm 8,1$
Э-20 (400.13)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$4,2 \times 10^8 \pm 2,1 \times 10^7$	$3,4 \times 10^8 \pm 1,7 \times 10^7$	$5,7 \times 10^8 \pm 9,0 \times 10^7$	$4,2 \pm 0,31$	$89 \pm 5,1$
Э-25 (451)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$6,9 \times 10^8 \pm 3,5 \times 10^8$	$7,2 \times 10^8 \pm 2,1 \times 10^8$	$2,7 \times 10^8 \pm 5,7 \times 10^8$	$4,0 \pm 0,34$	$92 \pm 5,9$
Э-28 (215)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$1,8 \times 10^8 \pm 9,0 \times 10^6$	$1,1 \times 10^8 \pm 7,0 \times 10^6$	$7,9 \times 10^7 \pm 5,0 \times 10^6$	$4,5 \pm 0,44$	$90 \pm 7,1$
Э-33 (400)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$5,0 \times 10^8 \pm 3,5 \times 10^8$	$2,0 \times 10^8 \pm 2,0 \times 10^8$	$2,0 \times 10^8 \pm 5,4 \times 10^8$	$3,9 \pm 0,52$	$89 \pm 8,5$
Э-35 (580)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$8,5 \times 10^7 \pm 4,9 \times 10^6$	$7,8 \times 10^7 \pm 3,4 \times 10^6$	$6,2 \times 10^7 \pm 5,1 \times 10^6$	$4,7 \pm 0,3$	$70 \pm 6,8$
Э-40 (20)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$2,9 \times 10^8 \pm 1,5 \times 10^8$	$2,8 \times 10^8 \pm 2,2 \times 10^8$	$4,5 \times 10^8 \pm 2,5 \times 10^7$	$3,8 \pm 0,31$	$89 \pm 7,1$
Э-42 (362)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$7,2 \times 10^8 \pm 3,6 \times 10^7$	$5,7 \times 10^8 \pm 4,9 \times 10^7$	$4,7 \times 10^8 \pm 9,4 \times 10^7$	$4,2 \pm 0,3$	$91 \pm 8,2$
Э-44 (362.2)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$4,9 \times 10^8 \pm 3,5 \times 10^8$	$3,9 \times 10^8 \pm 9,0 \times 10^8$	$5,7 \times 10^8 \pm 1,5 \times 10^7$	$3,9 \pm 0,24$	$89 \pm 6,1$
Э-49 (423.2)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$1,5 \times 10^8 \pm 8,0 \times 10^6$	$1,4 \times 10^8 \pm 8,0 \times 10^6$	$6,8 \times 10^7 \pm 2,4 \times 10^6$	$4,1 \pm 0,3$	$87 \pm 7,1$
Э-52 (451.5)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$3,6 \times 10^8 \pm 1,8 \times 10^8$	$2,4 \times 10^8 \pm 1,5 \times 10^8$	$1,4 \times 10^8 \pm 7,0 \times 10^7$	$4,2 \pm 0,27$	$89 \pm 6,8$
Э-55 (451.3)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$7,3 \times 10^8 \pm 2,7 \times 10^7$	$4,2 \times 10^8 \pm 1,1 \times 10^7$	$6,3 \times 10^8 \pm 1,9 \times 10^7$	$4,0 \pm 0,35$	$85 \pm 7,1$
Э-73 (432.4)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$9,1 \times 10^8 \pm 4,6 \times 10^8$	$7,3 \times 10^8 \pm 8,7 \times 10^8$	$2,6 \times 10^8 \pm 4,3 \times 10^8$	$4,8 \pm 0,29$	$74 \pm 8,8$
Э-78 (432.1)	<i>Lactobacillus</i> sp.	-	$6,5 \times 10^8 \pm 3,3 \times 10^4$	$5,2 \times 10^8 \pm 1,6 \times 10^4$	$1,3 \times 10^8 \pm 6,7 \times 10^4$	$4,6 \pm 0,32$	$68 \pm 9,4$

*Гемолитическую активность определяли визуально по наличию зон гемолиза вокруг колоний: α-гемолиз (зеленоватая зона), β-гемолиз (прозрачная зона) или γ-гемолиз (отсутствие гемолиза),

** - γ-гемолиз, т.е. штаммы, не проявляющие гемолитической активности (γ-гемолиз), рассматривались как потенциально безопасные для использования

*Hemolytic activity was determined visually based on the presence of hemolysis zones around the colonies: α-hemolysis (greenish zone), β-hemolysis (clear zone), or γ-hemolysis (absence of hemolysis),

** - γ-hemolysis; that is, strains that did not exhibit hemolytic activity (γ-hemolysis) were considered potentially safe for use

Большинство штаммов, показавших наибольшую антимикробную активность, например, таких, как Э-49 (*Lactobacillus* sp.), Э-52 (*Lactobacillus* sp.), и Э-10 (*Enterococcus* sp.), продемонстрировали также стабильные титры жизнеспособных клеток в течение длительного периода хранения ($2,4 \times 10^9 \pm 1,5 \times 10^8$ и $1,4 \times 10^9 \pm 7,0 \times 10^7$ КОЕ/мл для Э-52 через 10 и 30 суток хранения соответственно и $7,3 \times 10^9 \pm 6,2 \times 10^8$ КОЕ/мл для Э-10 через 30 суток хранения), что свидетельствует об их высокой выживаемости и потенциальной стабильности в составе биопрепаратов. Оптимальные значения рН (3,8–4,2) и высокая титруемая кислотность (89–93 Т°) через

24 ч культивирования у многих активных штаммов указывают на их выраженную метаболическую деятельность и потенциальную способность создавать неблагоприятную среду для роста патогенов (табл. 4).

Обсуждение

Использование молочнокислых бактерий в качестве основы для пробиотических биопрепаратов обусловлено их безопасностью для животных и человека, а также наличием у многих штаммов выраженных пробиотических свойств [12]. Актуальность применения биопрепаратов на их основе обусловлена высокой частотой дисбиотических нарушений микробиома репродуктивной системы коров в условиях промышленного животноводства [23]. Выбор места отбора биологического материала – репродуктивная система клинически здоровых коров, содержащихся в условиях, приближенных к естественным (экофермы), – являлся важным для поиска штаммов, адаптированных к специфическим условиям и обладающих высоким пробиотическим потенциалом. Такой подход позволил выделить штаммы, естественным образом колонизирующие репродуктивный тракт здоровых животных, что повышает вероятность их успешной приживаемости и функциональной активности в составе пробиотика. Это отличает их от аллохтонных штаммов, которые могут быть менее адаптированы к местным условиям [11].

На наш взгляд, поэтапный скрининг, включающий выделение, идентификацию, а затем оценку антагонистической активности, а также кислотообразующей способности и стабильности титра, является эффективной стратегией для отбора наиболее перспективных штаммов.

Одним из ключевых критериев отбора перспективных штаммов лактобактерий является их антагонистическая активность в отношении патогенных и условно-патогенных бактерий [16], в частности, часто вызывающих эндометрит у коров, таких как *Escherichia coli*, *Streptococcus* spp., *Trueperella* spp. и *Staphylococcus* spp. [22]. Кроме того, исследована активность против микромицетов *Aspergillus* sp. и *Penicillium* sp., которые вызывают грибковый эндометрит у коров: *Aspergillus* sp. (60,0% случаев эндометрита грибкового происхождения), *Penicillium* sp. (выделяется в 26,0% случаях) [17]. Выявление нами 19 штаммов лактобактерий с антимикробной активностью против широкого спектра патогенов, включая *Clostridium perfringens*, *Enterococcus faecalis*, *S. aureus* и микромицетов родов *Aspergillus* и *Penicillium*, подтверждает их потенциал как пробиотических агентов. Выявленная антагонистическая активность у ряда пер-

спективных штаммов может быть связана с различными механизмами, включая продукцию антимикробных веществ (бактериоцинов, органических кислот и др.) [4]. Результаты показали значительные зоны задержки роста, вплоть до 38 мм для *Clostridium perfringens* (штамм Э-49) и 37 мм для *Penicillium* sp. (штамм Э-52). Это свидетельствует о мощном ингибирующем действии выделенных штаммов на широкий круг патогенов, актуальных и для репродуктивной системы коров. Так, ранее было показано, что многие штаммы лактобактерий продуцируют молочную кислоту и другие короткоцепочечные жирные кислоты, понижающие pH среды и создающие неблагоприятные условия для роста патогенов [9]. Кроме того, известно о синтезе бактериоцинов, таких как низин, лактицин, энтероцин, педиоцин, лейкоцин и других пептидов, обладающих широким спектром антимикробной активности [5]. Подтверждение этих механизмов для конкретных выделенных штаммов потребует дальнейших исследований (например, анализ генома на наличие генов, кодирующих бактериоцины, или изучение метаболического профиля).

Полученные результаты ПЦР-идентификации подтверждают, что активные штаммы относились к родам *Lactobacillus* и *Enterococcus*. В частности, были идентифицированы такие виды как *L. acidophilus*, *L. crispatus*, *L. fermentum* и *L. johnsonii*, которые широко известны своими пробиотическими свойствами и часто используются в составе коммерческих пробиотиков [6].

Отсутствие гемолитической активности у всех 19 отобранных штаммов является очень важным критерием безопасности [7]. Гемолитическая активность может быть связана с патогенностью и является одним из основных критериев для исключения штаммов из пробиотического применения, особенно для ветеринарных препаратов, где безопасность продукта в приоритете [3]. Это подтверждает потенциальную пригодность выделенных перспективных штаммов для использования в составе пробиотических добавок без риска негативного влияния на организм животных.

Дополнительным важным аспектом, демонстрирующим перспективность штаммов, является их стабильность и метаболическая активность. Большинство штаммов, показавших наибольшую антимикробную активность продемонстрировали также стабильные титры в течение длительного периода хранения. Это соответствует требованиям к коммерческим пробиотическим препаратам [18] и свидетельствуют об их высокой выживаемости и потенциальной стабильности в составе биопрепаратов. Это определяет срок годности, эффективность и окупаемость продукта. Оптимальные зна-

чения pH (3,8–4,2) и высокая титруемая кислотность (89–93 T°) уже через 24 ч культивирования у многих активных штаммов указывают на их выраженную метаболическую деятельность и способность создавать неблагоприятную, кислую среду для роста конкурирующих патогенов.

Заключение

В результате проведенного многоэтапного скрининга и комплексной характеристики пробиотической активности из образцов репродуктивной системы клинически здоровых коров эоферм Северо-Западного региона и республики Карелии были отобраны и идентифицированы перспективные штаммы молочнокислых бактерий. Создана коллекция из 19 штаммов лактобактерий, которые не обладают гемолитической активностью, и демонстрируют антагонистическую активность против широкого спектра патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, в частности, вызывающих эндометрит у крупного рогатого скота. Высокая кислотообразовательная способность и стабильные титры жизнеспособных клеток в процессе хранения, продемонстрированные отобранными штаммами, дополнительно подчеркивают их пригодность для включения в состав пробиотика для восстановления микробиома влагалища и матки. Этот биопрепарат может быть эффективным инструментом для профилактики воспалительных заболеваний репродуктивной системы коров, способствуя улучшению репродуктивного здоровья животных и снижению зависимости от антибиотиков.

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

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ №24-16-00131 «Разработка нового биотехнологического подхода к профилактике и лечению эндометрита у коров».

Список литературы

1. Нетруцов, А. И., Егорова, М. А., & Захарчук, Л. М. (2005). *Практикум по микробиологии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений*. Академия.
2. Adnane, M., Whiston, R., Tasara, T., Bleul, U., & Chapwanya, A. (2024). Harnessing Vaginal Probiotics for Enhanced Management of Uterine Disease and Reproductive Performance in Dairy Cows: A Conceptual Review. *Animals*, 14(7), 1073. <https://doi.org/10.3390/ani14071073>. EDN: <https://elibrary.ru/LBWKBG>

3. Baek, J., Kim, B. S., Kim, Y., & Bai, J. (2024). Safety, Antagonistic Activity, and Probiotic Properties of Lactic Acid Bacteria Isolated from Jeotgal, Korean Fermented Seafoods. *Journal of microbiology and biotechnology*, 35, e2411055. <https://doi.org/10.4014/jmb.2411.11055>. EDN: <https://elibrary.ru/DSWEOC>
4. Chen, X., Bai, H., Mo, W., Zheng, X., Chen, H., Yin, Y., Liao, Y., Chen, Z., Shi, Q., Zuo, Z., Liang, Z., & Peng, H. (2025). Lactic Acid Bacteria Bacteriocins: Safe and Effective Antimicrobial Agents. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(9), 4124. <https://doi.org/10.3390/ijms26094124>. EDN: <https://elibrary.ru/LQEOUR>
5. Darbandi, A., Asadi, A., Mahdizadeh Ari, M., Ohadi, E., Talebi, M., Halaj Zadeh, M., Darb Emamie, A., Ghanavati, R., & Kakanj, M. (2022). Bacteriocins: Properties and potential use as antimicrobials. *Journal of clinical laboratory analysis*, 36(1), e24093. <https://doi.org/10.1002/jcla.24093>. EDN: <https://elibrary.ru/WVQQDT>
6. ElFeky, D. S., Awad, A. R., Shamseldeen, A. M., Mowafy, H. L., & Hosny, S. A. (2023). Comparing the therapeutic potentials of *Lactobacillus johnsonii* vs. *Lactobacillus acidophilus* against vulvovaginal candidiasis in female rats: an in vivo study. *Frontiers in microbiology*, 14, 1222503. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1222503>. EDN: <https://elibrary.ru/NCFPJW>
7. Greco, I., Molchanova, N., Holmedal, E., Jenssen, H., Hummel, B. D., Watts, J. L., Håkansson, J., Hansen, P. R., & Svenson, J. (2020). Correlation between hemolytic activity, cytotoxicity and systemic in vivo toxicity of synthetic antimicrobial peptides. *Scientific reports*, 10(1), 13206. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69995-9>. EDN: <https://elibrary.ru/WRGPMT>
8. Latif, A., Shehzad, A., Niazi, S., Zahid, A., Ashraf, W., Iqbal, M. W., Rehman, A., Riaz, T., Aadil, R. M., Khan, I. M., Özogul, F., Rocha, J. M., Esatbeyoglu, T., & Korma, S. A. (2023). Probiotics: mechanism of action, health benefits and their application in food industries. *Frontiers in microbiology*, 14, 1216674. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1216674>. EDN: <https://elibrary.ru/VOSWCB>
9. Markowiak-Kopeć, P., & Ślizewska, K. (2020). The Effect of Probiotics on the Production of Short-Chain Fatty Acids by Human Intestinal Microbiome. *Nutrients*, 12(4), 1107. <https://doi.org/10.3390/nu12041107>. EDN: <https://elibrary.ru/DFSSQL>
10. Mazziotta, C., Tognon, M., Martini, F., Torreggiani, E., & Rotondo, J. C. (2023). Probiotics Mechanism of Action on Immune Cells and Beneficial Effects on Human Health. *Cells*, 12(1), 184. <https://doi.org/10.3390/cells12010184>. EDN: <https://elibrary.ru/BATNTQ>
11. Meziti, A., Tsementzi, D., Rodriguez-R, L. M., Hatt, J. K., Karayanni, H., Kormas, K. A., & Konstantinidis, K. T. (2019). Quantifying the changes in genetic diversity within sequence-discrete bacterial populations across a spatial and temporal riverine gradient. *The ISME journal*, 13(3), 767–779. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0307-6>. EDN: <https://elibrary.ru/ARKMLC>

12. Miranda, C., Contente, D., Igrejas, G., Câmara, S. P. A., Dapkevicius, M. L. E., & Poeta, P. (2021). Role of Exposure to Lactic Acid Bacteria from Foods of Animal Origin in Human Health. *Foods*, 10(9), 2092. <https://doi.org/10.3390/foods10092092>. EDN: <https://elibrary.ru/VIIFBK>
13. Monteagudo-Mera, A., Rastall, R. A., Gibson, G. R., Charalampopoulos, D., & Chatzifragkou, A. (2019). Adhesion mechanisms mediated by probiotics and prebiotics and their potential impact on human health. *Applied microbiology and biotechnology*, 103(16), 6463–6472. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09978-7>. EDN: <https://elibrary.ru/VMEXGW>
14. Mor, A., Driggers, P. H., & Segars, J. H. (2015). Molecular characterization of the human microbiome from a reproductive perspective. *Fertility and sterility*, 104(6), 1344–1350. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2015.10.008>. EDN: <https://elibrary.ru/WVKXWB>
15. Papadimitriou, K., Zoumpoulou, G., Foligné, B., Alexandraki, V., Kazou, M., Pot, B., & Tsakalidou, E. (2015). Discovering probiotic microorganisms: in vitro, in vivo, genetic and omics approaches. *Frontiers in microbiology*, 6, 58. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00058>. EDN: <https://elibrary.ru/XONSIX>
16. Prabhurajeshwar, C., & Chandrakanth, R. K. (2017). Probiotic potential of Lactobacilli with antagonistic activity against pathogenic strains: An in vitro validation for the production of inhibitory substances. *Biomedical journal*, 40(5), 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2017.06.008>
17. Saini, P., Singh, M., & Kumar, P. (2019). Fungal endometritis in bovines. *Open veterinary journal*, 9(1), 94–98. <https://doi.org/10.4314/ovj.v9i1.16>
18. Shokryazdan, P., Sieo, C. C., Kalavathy, R., Liang, J. B., Alitheen, N. B., Faseleh Jahromi, M., & Ho, Y. W. (2014). Probiotic potential of Lactobacillus strains with antimicrobial activity against some human pathogenic strains. *BioMed research international*, 2014, 927268. <https://doi.org/10.1155/2014/927268>
19. Singh, N., & Sethi, A. (2022). Endometritis – Diagnosis, Treatment and its impact on fertility – A Scoping Review. *JBRA assisted reproduction*, 26(3), 538–546. <https://doi.org/10.5935/1518-0557.20220015>. EDN: <https://elibrary.ru/FLRPCJ>
20. Singh, R. P., Shadan, A., & Ma, Y. (2022). Biotechnological Applications of Probiotics: A Multifarious Weapon to Disease and Metabolic Abnormality. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 14(6), 1184–1210. <https://doi.org/10.1007/s12602-022-09992-8>. EDN: <https://elibrary.ru/MGSNWT>
21. Van Hul, M., Cani, P. D., Petitfils, C., De Vos, W. M., Tilg, H., & El-Omar, E. M. (2024). What defines a healthy gut microbiome?. *Gut*, 73(11), 1893–1908. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2024-333378>. EDN: <https://elibrary.ru/GIQFKH>
22. Várhidi, Z., Csikó, G., Bajcsy, Á. C., & Jurkovich, V. (2024). Uterine Disease in Dairy Cows: A Comprehensive Review Highlighting New Research Areas. *Veteri-*

- nary sciences, 11(2), 66. <https://doi.org/10.3390/vetsci11020066>. EDN: <https://elibrary.ru/HEABXN>
23. Zangirolamo, A. F., Souza, A. K., Yokomizo, D. N., Miguel, A. K. A., Costa, M. C. D., Alfieri, A. A., & Seneda, M. M. (2024). Updates and Current Challenges in Reproductive Microbiome: A Comparative Analysis between Cows and Women. *Animals*, 14(13), 1971. <https://doi.org/10.3390/ani14131971>. EDN: <https://elibrary.ru/QLHPJU>

References

1. Netrutsov, A. I., Egorova, M. A., & Zakharchuk, L. M. (2005). *Laboratory manual on microbiology: A textbook for students of higher educational institutions*. Akademia.
2. Adnane, M., Whiston, R., Tasara, T., Bleul, U., & Chapwanya, A. (2024). Harnessing Vaginal Probiotics for Enhanced Management of Uterine Disease and Reproductive Performance in Dairy Cows: A Conceptual Review. *Animals*, 14(7), 1073. <https://doi.org/10.3390/ani14071073>. EDN: <https://elibrary.ru/LBWKBG>
3. Baek, J., Kim, B. S., Kim, Y., & Bai, J. (2024). Safety, Antagonistic Activity, and Probiotic Properties of Lactic Acid Bacteria Isolated from Jeotgal, Korean Fermented Seafoods. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35, e2411055. <https://doi.org/10.4014/jmb.2411.11055>. EDN: <https://elibrary.ru/DSWEOC>
4. Chen, X., Bai, H., Mo, W., Zheng, X., Chen, H., Yin, Y., Liao, Y., Chen, Z., Shi, Q., Zuo, Z., Liang, Z., & Peng, H. (2025). Lactic Acid Bacteria Bacteriocins: Safe and Effective Antimicrobial Agents. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(9), 4124. <https://doi.org/10.3390/ijms26094124>. EDN: <https://elibrary.ru/LQEOUR>
5. Darbandi, A., Asadi, A., Mahdizade Ari, M., Ohadi, E., Talebi, M., Halaj Zadeh, M., Darb Emamie, A., Ghanavati, R., & Kakanj, M. (2022). Bacteriocins: Properties and potential use as antimicrobials. *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, 36(1), e24093. <https://doi.org/10.1002/jcla.24093>. EDN: <https://elibrary.ru/WVQQDT>
6. Elfeky, D. S., Awad, A. R., Shamseldeen, A. M., Mowafy, H. L., & Hosny, S. A. (2023). Comparing the therapeutic potentials of *Lactobacillus johnsonii* vs. *Lactobacillus acidophilus* against vulvovaginal candidiasis in female rats: An in vivo study. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1222503. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1222503>. EDN: <https://elibrary.ru/NCFPJW>
7. Greco, I., Molchanova, N., Holmedal, E., Jenssen, H., Hummel, B. D., Watts, J. L., Håkansson, J., Hansen, P. R., & Svenson, J. (2020). Correlation between hemolytic activity, cytotoxicity and systemic in vivo toxicity of synthetic antimicrobial peptides. *Scientific Reports*, 10(1), 13206. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69995-9>. EDN: <https://elibrary.ru/WRGPMT>
8. Latif, A., Shehzad, A., Niazi, S., Zahid, A., Ashraf, W., Iqbal, M. W., Rehman, A., Riaz, T., Aadil, R. M., Khan, I. M., Özogul, F., Rocha, J. M., Esatbeyoglu, T., &

- Korma, S. A. (2023). Probiotics: Mechanism of action, health benefits and their application in food industries. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1216674. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1216674>. EDN: <https://elibrary.ru/VOSWCB>
9. Markowiak-Kopeć, P., & Śliżewska, K. (2020). The Effect of Probiotics on the Production of Short-Chain Fatty Acids by Human Intestinal Microbiome. *Nutrients*, 12(4), 1107. <https://doi.org/10.3390/nu12041107>. EDN: <https://elibrary.ru/DFSSQL>
 10. Mazziotta, C., Tognon, M., Martini, F., Torreggiani, E., & Rotondo, J. C. (2023). Probiotics Mechanism of Action on Immune Cells and Beneficial Effects on Human Health. *Cells*, 12(1), 184. <https://doi.org/10.3390/cells12010184>. EDN: <https://elibrary.ru/BATNTQ>
 11. Meziti, A., Tsementzi, D., Rodriguez-R, L. M., Hatt, J. K., Karayanni, H., Kormas, K. A., & Konstantinidis, K. T. (2019). Quantifying the changes in genetic diversity within sequence-discrete bacterial populations across a spatial and temporal riverine gradient. *The ISME Journal*, 13(3), 767–779. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0307-6>. EDN: <https://elibrary.ru/ARKMLC>
 12. Miranda, C., Contente, D., Igrejas, G., Câmara, S. P. A., Dapkevicius, M. L. E., & Poeta, P. (2021). Role of Exposure to Lactic Acid Bacteria from Foods of Animal Origin in Human Health. *Foods*, 10(9), 2092. <https://doi.org/10.3390/foods10092092>. EDN: <https://elibrary.ru/VIIFBK>
 13. Monteagudo-Mera, A., Rastall, R. A., Gibson, G. R., Charalampopoulos, D., & Chatzifragkou, A. (2019). Adhesion mechanisms mediated by probiotics and prebiotics and their potential impact on human health. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(16), 6463–6472. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09978-7>. EDN: <https://elibrary.ru/VMEXGW>
 14. Mor, A., Driggers, P. H., & Segars, J. H. (2015). Molecular characterization of the human microbiome from a reproductive perspective. *Fertility and Sterility*, 104(6), 1344–1350. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2015.10.008>. EDN: <https://elibrary.ru/WVKXWB>
 15. Papadimitriou, K., Zoumpoulou, G., Foligné, B., Alexandraki, V., Kazou, M., Pot, B., & Tsakalidou, E. (2015). Discovering probiotic microorganisms: In vitro, in vivo, genetic and omics approaches. *Frontiers in Microbiology*, 6, 58. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00058>. EDN: <https://elibrary.ru/XONSIX>
 16. Prabhurajeshwar, C., & Chandrakanth, R. K. (2017). Probiotic potential of Lactobacilli with antagonistic activity against pathogenic strains: An in vitro validation for the production of inhibitory substances. *Biomedical Journal*, 40(5), 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2017.06.008>
 17. Saini, P., Singh, M., & Kumar, P. (2019). Fungal endometritis in bovines. *Open Veterinary Journal*, 9(1), 94–98. <https://doi.org/10.4314/ovj.v9i1.16>

18. Shokryazdan, P., Sieo, C. C., Kalavathy, R., Liang, J. B., Alitheen, N. B., Faseleh Jahromi, M., & Ho, Y. W. (2014). Probiotic potential of *Lactobacillus* strains with antimicrobial activity against some human pathogenic strains. *BioMed Research International*, 2014, 927268. <https://doi.org/10.1155/2014/927268>
19. Singh, N., & Sethi, A. (2022). Endometritis — Diagnosis, treatment and its impact on fertility — A scoping review. *JBRA Assisted Reproduction*, 26(3), 538–546. <https://doi.org/10.5935/1518-0557.20220015>. EDN: <https://elibrary.ru/FLRPCJ>
20. Singh, R. P., Shadan, A., & Ma, Y. (2022). Biotechnological Applications of Probiotics: A Multifarious Weapon to Disease and Metabolic Abnormality. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 14(6), 1184–1210. <https://doi.org/10.1007/s12602-022-09992-8>. EDN: <https://elibrary.ru/MGSNWT>
21. Van Hul, M., Cani, P. D., Petitfils, C., De Vos, W. M., Tilg, H., & El-Omar, E. M. (2024). What defines a healthy gut microbiome? *Gut*, 73(11), 1893–1908. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2024-333378>. EDN: <https://elibrary.ru/GIQFKH>
22. Várhidi, Z., Csikó, G., Bajcsy, Á. C., & Jurkovich, V. (2024). Uterine Disease in Dairy Cows: A Comprehensive Review Highlighting New Research Areas. *Veterinary Sciences*, 11(2), 66. <https://doi.org/10.3390/vetsci11020066>. EDN: <https://elibrary.ru/HEABXN>
23. Zangirolamo, A. F., Souza, A. K., Yokomizo, D. N., Miguel, A. K. A., Costa, M. C. D., Alfieri, A. A., & Seneda, M. M. (2024). Updates and Current Challenges in Reproductive Microbiome: A Comparative Analysis between Cows and Women. *Animals*, 14(13), 1971. <https://doi.org/10.3390/ani14131971>. EDN: <https://elibrary.ru/QLHPJU>

ВКЛАД АВТОРОВ

Йылдырым Е.А.: руководитель научного проекта, координация работы, формулировка научных гипотез, планирование и постановка эксперимента, статистическая обработка данных, подготовка публикации.

Филиппова В.А.: статистическая обработка данных, интерпретация результатов, структурирование и аналитическая обработка данных для публикации.

Ключникова И.А.: проведение молекулярно-генетического анализа, интерпретация данных для публикации.

Соколова К.А.: проведение молекулярно-генетического анализа, интерпретация данных для публикации.

Ильина Л.А.: координация проекта, систематизация методологии исследования.

Савичева А.А.: проведение микробиологического исследование, подготовка материала для публикации.

Корочкина Е.А.: сбор материала, определение методологии настоящего исследования, анализ микробных сообществ.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Elena A. Yildirim: project leader; coordination of the research work; formulation of scientific hypotheses; planning and design of the experiment; statistical data analysis; preparation of the manuscript for publication.

Valentina A. Filippova: statistical data processing, interpretation of results, structuring and analytical processing of data for publication.

Irina A. Klyuchnikova: molecular-genetic analysis and interpreting the data for publication.

Ksenia A. Sokolova: molecular-genetic analysis and interpreting the data for publication.

Larisa A. Ilina: project coordination and systematization of research methodology.

Alesya A. Savicheva: microbiological research and preparing material for publication.

Elena A. Korochkina: collection of material, determination of the methodology for the present study, and analysis of microbial communities.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Йылдырым Елена Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства; главный биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ» Петербургское шоссе 2с2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8А, г. Пушкин г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
deniz@biotrof.ru*

Филиппова Валентина Анатольевна, заведующая лабораторией кормления; старший биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ» Петербургское шоссе 2с2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8А, г. Пушкин г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
filippova@biotrof.ru*

Ключникова Ирина Александровна, аспирант кафедры крупного животноводства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Петербургское шоссе 2с2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация
klyuchnikova.irinaa@yandex.ru

Соколова Ксения Андреевна, ассистент кафедры крупного животноводства; биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2с2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8А, г. Пушкин г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
kalitkina.xeniya@gmail.com

Ильина Лариса Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства; начальник молекулярно-генетической лаборатории

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2с2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8А, г. Пушкин г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
ilina@biotrof.ru

Савичева Алеся Анисовна, технолог микробиологической лаборатории

Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
ул. Малиновская, 8А, г. Пушкин г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
sava@biotrof.ru

Корочкина Елена Александровна, доктор ветеринарных наук, доцент, заведующая кафедрой генетических и репродуктивных биотехнологий

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины»
ул. Черниговская, 5, г. Санкт-Петербург, 196084, Российская Федерация
e.kora@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena A. Yildirim, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large Animal Husbandry; Chief Biotechnologist of the Molecular Genetics Laboratory
Saint Petersburg State Agrarian University; Biotrof LLC
2, build. 2, Peterburgskoe Shosse, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; 8A, Malinovskaya Str., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation
deniz@biotrof.ru
SPIN-code: 4479-7509
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5846-5105>
ResearcherID: C-3770-2014
Scopus Author ID: 57059948100

Valentina A. Filippova, Head of the Feeding Laboratory; Senior Biotechnologist of the Molecular Genetics Laboratory
Saint Petersburg State Agrarian University; Biotrof LLC
2, build. 2, Peterburgskoe Shosse, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; 8A, Malinovskaya Str., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation
filippova@biotrof.ru
SPIN-code: 4771-2990
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8789-9837>
ResearcherID: AAE-2402-2022
Scopus Author ID: 57060101800

Irina A. Klyuchnikova, PhD student of the Department of Large Animal Husbandry
Saint Petersburg State Agrarian University
2, build. 2, Peterburgskoe Shosse, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation
klyuchnikova.irinaa@yandex.ru
SPIN-code: 8822-5738
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6484-1235>
ResearcherID: JTT-8301-2023
Scopus Author ID: 58618912000

Ksenia A. Sokolova, Assistant of the Department of Large Animal Husbandry; Biotechnologist of the Molecular Genetics Laboratory
Saint Petersburg State Agrarian University; Biotrof LLC

*2, build. 2, Peterburgskoe Shosse, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; 8A, Malinovskaya Str., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation
kalitkina.xeniya@gmail.com*

SPIN-code: 7893-2670

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9541-6839>

ResearcherID: ADD-4706-2022

Scopus Author ID: 57280455100

Larisa A. Ilina, Doctor of Biological Sciences, Professor of the department of large animal husbandry; Head of the Molecular Genetics Laboratory

Saint Petersburg State Agrarian University; Biotrof LLC

*2, build. 2, Peterburgskoe Shosse, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; 8A, Malinovskaya Str., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation
ilina@biotrof.ru*

SPIN-code: 5826-7525

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2789-4844>

ResearcherID: C-3772-2014

Scopus Author ID: 57060452100

Alesya A. Savicheva, Technologist of the Microbiological Laboratory

Biotrof LLC

*8A, Malinovskaya Str., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation
sava@biotrof.ru*

SPIN-code: 3833-3227

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9125-8005>

Elena A. Korochkina, Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Genetic and Reproductive Biotechnologies

Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine

*5, Chernigovskaya Str., Saint Petersburg, 196084, Russian Federation
e.kora@mail.ru*

SPIN-code: 8620-0458

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7011-4594>

ResearcherID: AFP-5737-2022

Scopus Author ID: 57719882500

Поступила 20.10.2025

После рецензирования 21.11.2025

Принята 30.11.2025

Received 20.10.2025

Revised 21.11.2025

Accepted 30.11.2025

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

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447)

EDN: FSISXS

УДК 579.6+579.66+622.276



Липопептидные биосурфактанты для повышения нефтеотдачи: характеристика и эффективность

А.С. Гордеев, А.А. Кириченко, Л.Р. Бикташева,
Х. Абдалджалил, П.А. Курынцева

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Нефть сохраняет статус ключевого ресурса мировой энергетики, обеспечивая приблизительно 30% глобального энергопотребления. Однако традиционные методы первичной и вторичной добычи извлекают лишь 20-40% запасов нефти, что стимулирует развитие методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Среди них биологические (микробные) методы увеличения нефтеотдачи (БМУН), основанные на применении биосурфактантов, синтезируемых микроорганизмами, – «зеленых» аналогов синтетических поверхностно-активных веществ – демонстрируют высокий потенциал для зрелых месторождений с высоким содержанием остаточной нефти.

Цель – оценить эффективность применения биосурфактантов, продуцируемых штаммами-продуцентами *Bacillus sp. 2a* и *Peribacillus sp. 2b* для увеличения нефтеотдачи при добыче трудноизвлекаемой нефти.

Материалы и методы. Исследования проводили в условиях лабораторного эксперимента. Использовали липопептидные биосурфактанты, экстрагированные из культур штаммов *Bacillus sp. 2a* и *Peribacillus sp. 2b*. Их липопептидную природу подтверждали методом ИК-спектроскопии, а поверхностную активность (величину поверхностного натяжения) оценивали методом кольца Дю Нюи. Эффективность применения для МУН определяли в модельных экспериментах по вытеснению нефти Ромашкинского месторождения из песчаных колонок.

Результаты. Данные ИК-спектроскопии выявили липопептидную природу биосурфактантов. Биосурфактант штамма *Bacillus sp. 2a* снижал поверхностное натяжение до 29,6 мН/м (пик активности на 24–48 ч), обеспечивая прирост нефтеотдачи 31.2% в модельном эксперименте. Для штамма *Peribacillus sp. 2b* ми-

нимальное поверхностное натяжение составило 52,8 мН/м (достигнуто к 48 ч), с увеличением нефтеотдачи 23,2%. Эффективность дополнительной нефтеотдачи, обеспеченной биосурфактантами, продуцированным штаммом *Bacillus sp. 2a* сопоставима с результатами синтетического ПАВ (31,2% и 29,3%, соответственно).

Ключевые слова: биосурфактанты; биологические (микробные) методы увеличения нефтеотдачи; липопептиды; поверхностное натяжение; песчаные колонки

Для цитирования. Гордеев, А. С., Кириченко, А. А., Бикташева, Л. Р., Абдалджалил, Х., & Курынцева, П. А. (2026). Липопептидные биосурфактанты для повышения нефтеотдачи: характеристика и эффективность. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 252–266. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447>

Lipopeptide biosurfactants for enhanced oil recovery: characterization and efficiency

A.S. Gordeev, A.A. Kirichenko, L.R. Biktasheva,
H. Abdaljalil, P.A. Kuryntseva

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

Abstract

Background. Oil remains a critical resource in the global energy sector, accounting for approximately 30% of worldwide energy consumption. However, conventional primary and secondary recovery methods extract only 20-40% of oil reserves, which stimulates the development of Enhanced Oil Recovery (EOR) techniques. Among them, biological (microbial) EOR methods (MEOR), based on the application of biosurfactants synthesized by microorganisms as “green” analogs of synthetic surfactants, show high potential for mature fields with high residual oil content.

Purpose. To evaluate the effectiveness of biosurfactants produced by *Bacillus sp. 2a* and *Peribacillus sp. 2b* strains for enhancing production of hard-to-recover oil reserves.

Materials and methods. The study was conducted under laboratory conditions. Lipopeptide biosurfactants extracted from cultures of *Bacillus sp. 2a* and *Peribacillus sp. 2b* strains were used. The lipopeptide nature of these biosurfactants was confirmed by infrared (IR) spectroscopy. Surface activity was evaluated by measuring surface tension using the Du Noüy ring method. The efficiency for MEOR was determined in model experiments on oil displacement from sand-packed columns using crude oil from the Romashkino field.

Results. IR spectroscopy confirmed the lipopeptide composition of the biosurfactants. The biosurfactant from the *Bacillus sp. 2a* strain reduced the surface tension to 29.6 - mN m⁻¹ (peak activity at 24–48 hours), providing an additional oil recovery factor of 31.2% in a model experiment. For the *Peribacillus sp. 2b* strain, the minimum sur-

face tension was 52.8 mN m⁻¹ (achieved by 48 hours), with an increase in oil recovery of 23.2%. The efficiency of additional oil recovery provided by the biosurfactant from the *Bacillus* sp. 2a strain is comparable to the results obtained with a synthetic surfactant (31.2% and 29.3%, respectively).

Keywords: biosurfactants; microbial enhanced oil recovery; lipopeptides; surface tension; sand pack model

For citation. Gordeev, A. S., Kirichenko, A. A., Biktasheva, L. R., Abdaljalil, H., & Kuryntseva, P. A. (2026). Lipopeptide biosurfactants for enhanced oil recovery: characterization and efficiency. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 252–266. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447>

Введение

В мировой практике доминирующими продуцентами биосурфактантов для БМУН выступают грамположительные бактерии родов *Bacillus* и *Peribacillus*, синтезирующие липопептиды (сурфактин, итурин, фенгигин), а также грамотрицательные *Pseudomonas* spp. продуцирующие преимущественно гликолипиды (рамнолипиды), которые обладают ограниченной устойчивостью к условиям нефтяных пластов (повышенная температура и солёность) [2; 7].

Критерии эффективности штаммов в отношении продукции биосурфактантов включают снижение поверхностного натяжения культуральной жидкости ниже 40 мН/м, эмульгирующую активность (индекс E24 > 50%), а также испытание полученного продукта для повышения нефтеизвлечения в модельных системах – песчаных колонках и представительных ядрах, характеризующих породу-коллектор углеводородов, где доля дополнительно извлеченной нефти варьирует в диапазоне 5–40% и зависит от штамма-продуцента, наличия примесных метаболитов в продукте и физическим параметрам модельной колонки или ядра и самой нефти [26; 32].

Важным технологическим аспектом получения биосурфактантов является не только их биосинтез при культивировании штаммов-продуцентов, но и экстракция: для липопептидов наиболее эффективно кислотное осаждение (при pH 2.0) с последующей экстракцией органическими растворителями (хлороформ и метанол), тогда как для гликолипидов также применяют ультрафильтрацию и пенное фракционирование [5; 11].

Учитывая ограниченный пул промышленных штаммов-продуцентов, вариативность структуры биосурфактантов и однозначную зависимость их свойств от химического строения, поиск новых высокоэффективных продуцентов остаётся актуальной задачей.

Материалы и методы

1.1. Штаммы микроорганизмов и условия культивирования. В исследовании использовались два штамма *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b из коллекции кафедры биотехнологии Института экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, ранее выделенные из образцов пластовых вод Ромашкинского месторождения (Республика Татарстан).

Культивирование штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b проводили в жидкой минеральной среде (г/л): глюкоза - 10, пептон - 5, дрожжевой экстракт - 3, NaCl - 5, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ - 0.2, K_2HPO_4 - 1. Инокуляцию - 5% (об/об) культурой в экспоненциальной фазе. Инкубация - $28 \pm 0,5$, 120 об/мин, 168 ч. Биосурфактанты экстрагировали из бесклеточного супернатанта: подкисление до pH 2.0 HCl (4°C, 12 ч), осаждённый продукт перерастворяли в хлороформ-метанольной смеси (2:1 об/об), органическую фазу выпаривали при 40. Выход биосурфактантов по сухой массе определяли гравиметрически после лиофилизации.

1.2. Методы аналитического контроля. Рост штаммов оценивали на основании изменения оптической плотности культуральной среды. Оптическую плотность (OD600) измеряли на спектрофотометре LOIP (Россия) против стерильной среды в качестве контроля.

Поверхностное натяжение (ST) бесклеточного супернатанта определяли методом кольца Дю Нуи на тензиометре Krüss K6 (Германия) при 25°C.

ИК-спектры экстрагированных биосурфактантов регистрировали на Фурье-спектрометре Bruker Lumos (Германия) с приставкой НПВО в диапазоне 4000-400 см⁻¹ с накоплением 256 сканов при спектральном разрешении 4 см⁻¹ при влажности 50% и T=298K.

1.3. Эксперименты по моделированию БМУН. Модельные песчаные колонки из ПВХ (30×5 см) заполняли прокалённым (550°C, 4 ч) речным песком (фракции 0.2-1.0 мм). После дегазации аргоном колонки насыщали модельным рассолом (50 г/л NaCl + 5 г/л CaCl₂) для определения объёма пор (ОП). Затем осуществляли вытеснение рассола нефтью Ромашкинского месторождения (плотность 0,95 г/см³, содержание серы 1,5%, парафинов 3,7%, смол и асфальтенов до 21%) до достижения прекращения выхода прозрачной жидкости и появления капель нефти. Объём первоначальных запасов нефти (ОПЗН) определяли как объём рассола, вытесненного нефтью при насыщении колонки. Далее проводили вторичное заводнение рассолом (0,5 PV/ч) до прекращения выхода нефти с фиксацией объёмов извлекаемой нефти. Для моделирования третичного метода добычи нефти вводили растворы: а) биосурфактантов *Bacillus sp.* 2a и

Peribacillus sp. 2b (0,1%, 0,2%, 0,5%), б) синтетического ПАВ (0,1%, 0,2%, 0,5%), а также был заложен контрольный вариант, не подвергавшийся обработке растворами ПАВ. Водно-нефтяные эмульсии, полученные после обработки, центрифугировали (10 000 g, 15 мин), нефтяную фазу отделяли и измеряли волнометрически. Эффективность выражали через дополнительное нефтеизвлечение (AOR, %): $AOR = [V_t / (OOIP - V_s)] \times 100\%$, где V_t – объем нефти после третичной обработки, V_s – объем нефти после вторичного заводнения и OOIP – первоначальные запасы нефти.

1.4. Статистическая обработка данных. Все эксперименты выполнены в трёх повторностях. Данные обрабатывали с использованием Python 3.10 (пакеты SciPy, statsmodels). Для сравнения групп применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с тестом Тьюки. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение.

Результаты и обсуждение

2.1. Динамика роста культуры и биосинтеза биосурфактантов. Характер роста штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b и изменения поверхностного натяжения (ST) представлены на рис. 1. Для штамма *Bacillus sp.* 2a минимальное значение ST ($29,6 \pm 0,5$ мН/м) достигнуто на 24 ч культивирования. Этот период соответствует концу логарифмической фазы роста, когда биосинтез липопептидов наиболее активен. Однако в стационарной фазе (48–120 ч) наблюдали увеличение ST до $39,0 \pm 0,7$ мН/м, что согласуется с данными по *B.subtilis* KLP2015, где показано, что вследствие протеазной активности происходит деградация сурфактина [24].

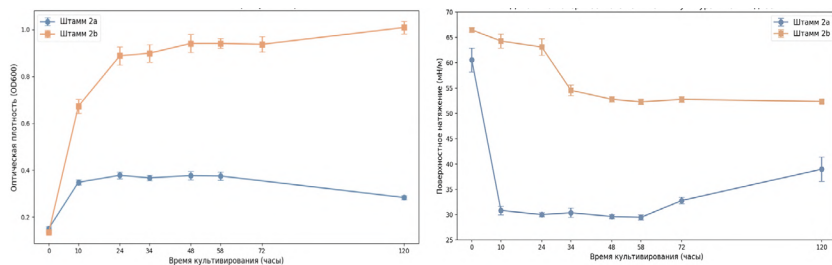


Рис. 1. Динамика роста (OD_{600}) (а) и поверхностного натяжения культуральной жидкости штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b (б).

Fig. 1. Growth dynamics (OD_{600}) (a) and surface tension of the culture medium for strains *Bacillus sp.* 2a and *Peribacillus sp.* 2b (b).

В отличие от предыдущего штамма, штамм *Peribacillus sp.* 2b демонстрировал минимальное значение ST ($52,77 \pm 1,2$ мН/м) к 48 ч при росте биомассы ($OD_{600} = 0,968$). Такая задержка характерна для продуцентов высокомолекулярных липопептидов [29]. Стабилизация ST на уровне 52–54 мН/м в течение 120 ч указывает на отсутствие разложения вторичных метаболитов при стабилизации культуры, аналогично штаммам *B. licheniformis* [15].

Различия в динамике объясняются структурными особенностями, так, для штамма *Bacillus sp.* 2a может происходить синтез низкомолекулярных фенгигцинов с быстрым снижением ST, но низкой стабильностью [10; 25], тогда как для штамма *Peribacillus sp.* 2b происходит продукция липопептидов преимущественно в виде сурфактина – с длинными алифатическими цепями [20].

Полученная масса биосурфактантов после экстракции составила $1,0 \pm 0,1$ г/л (*Bacillus sp.* 2a) и $1,3 \pm 0,15$ г/л (*Peribacillus sp.* 2b), что сопоставимо с известными данными для подобных штаммов-продуцентов [18].

2.2. Структурная характеристика биосурфактантов. На Рис. 2 представлены характерные спектральные профили биосурфактантов штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b.

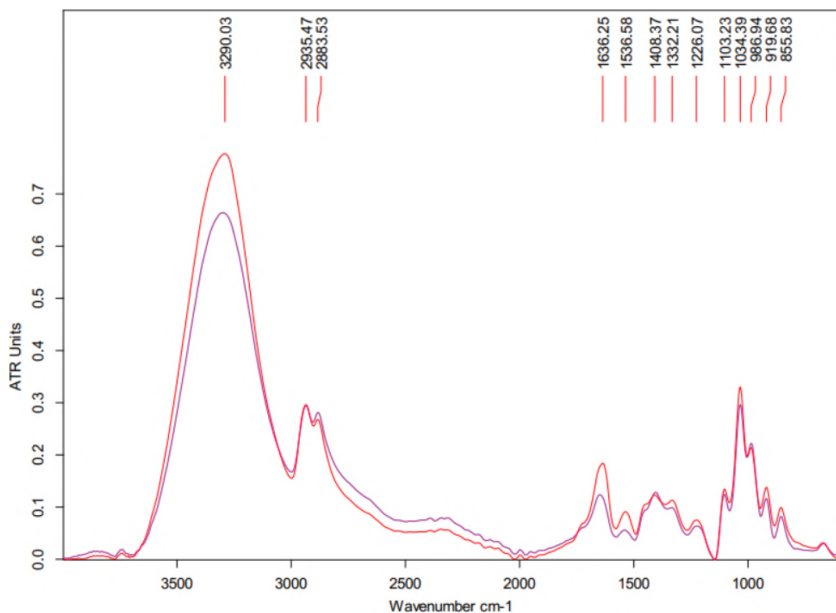


Рис. 2. ИК-спектры биосурфактантов штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b
Fig. 2. IR spectra of biosurfactants from strains *Bacillus sp.* 2a and *Peribacillus sp.* 2b

Спектральный анализ методом ИК-спектроскопии позволил отметить особенности молекулярной структуры продуктов культивирования штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b. Наблюдаемые характеристические пики подтверждают липопептидную природу экстрагированных из культуральной жидкости соединений: сигнал при 3290 см^{-1} соответствует колебаниям N-H (амид A) и O-H групп [13], пики в области 2935 см^{-1} и 2883 см^{-1} обусловлены валентными колебаниями C-H в метиленовых ($-\text{CH}_2-$) и метильных ($-\text{CH}_3$) группах алкильных цепей [22], тогда как пик при 1636 см^{-1} отражает валентные колебания C=O (амид I) [19]. Дополнительные сигналы при 1536 см^{-1} (деформационные колебания N-H в сочетании с C-N, амид II) и в диапазоне $1226-1103\text{ см}^{-1}$ (валентные колебания C-O сложноэфирных связей) [13] показывают спектральную картину, типичную для липопептидов класса сурфактина

Совпадение наблюдаемых спектральных паттернов с референсными данными для сурфактина и биосурфактанта *B. licheniformis* W16 [4] подтверждает структурную схожесть. Особенно показательна повышенная интенсивность сигналов в области $2935-2883\text{ см}^{-1}$ у штамма *Peribacillus sp.* 2b, что свидетельствует о более протяжённых алкильных цепях в его липопептидах [8]. Эта структурная особенность объясняет повышенную стабильность биосурфактанта *Peribacillus sp.* 2b в стационарной фазе роста, наблюдаемую в динамике поверхностного натяжения

2.3. Эффективность биосурфактантов в БМУН. Результаты экспериментов в песчаных колонках представлены в Табл. 1. Наблюдается проявление дозозависимого эффекта – так, увеличение концентрации биосурфактанта штамма *Bacillus sp.* 2a с 0,1% до 0,5% привело к значительному росту дополнительного нефтеизвлечения (AOR) с 21,9% до 31,2%. Эта тенденция согласуется с данными Pornsunthorntawe et al., наблюдавших рост нефтеизвлечения на 15–20% для *Pseudomonas* spp. при аналогичном увеличении концентрации биосурфактантов [21]. Для штамма *Peribacillus sp.* 2b рост AOR был менее выражен (с 20,7% до 23,2%), что требует дополнительного исследования [12].

Наряду с этим, отмечается значительное превосходство штамма *Bacillus sp.* 2a в показателях нефтеизвлечения, так, при оптимальной концентрации 0,5% биосурфактант этого штамма показал наивысшую эффективность – $31,2 \pm 0,2\%$ AOR. Это значение не только превосходит показатели штамма *Peribacillus sp.* 2b (23,2%) и синтетического ПАВ (29,3%), но и превышает литературные данные для родственных штаммов *B. subtilis* (4–28% AOR) [3]. Например, Bo Wu et al. (2022) сообщали о дополнительном извлечении нефти в 25,6% для *B. subtilis* SL [30]. Мы предполагаем, что такие показатели могут быть обусловлены несколькими факторами. Так, липопептиды

штамма *Bacillus sp.* 2a могут обладать повышенной способностью специфически взаимодействовать с высокомолекулярными компонентами нефти Ромашкинского месторождения (смолы и асфальтены ~22%), эффективно солюбилизируя их. Это согласуется с работой Tavassoli et al. (2012), показавших, что биосурфактанты могут избирательно взаимодействовать с неполярными компонентами нефти [28]. При этом, для биосурфактанта штамма *Bacillus sp.* 2a могут быть характерны меньшие адсорбционные потери на минеральной фазе (поверхности частиц песка) по сравнению с анионными синтетическими ПАВ [6], что позволяет большему количеству активного вещества достигать остаточной нефти. Кроме того, липопептиды, продуцируемые этим штаммом, потенциально способны формировать обратные мицеллы в тяжёлых фракциях нефти, облегчая их мобилизацию, как это описано для некоторых липопептидов [17].

В тоже время, относительно низкая эффективность штамма *Peribacillus sp.* 2b, несмотря на высокий выход биомассы ($OD_{600} = 0.968$) и биосурфактанта (1,3 г/л), может быть связана с несколькими факторами. Вероятно, полученный экстракт мог содержать значительное количество внеклеточных полимерных веществ (EPS) или других метаболитов, не обладающих поверхностной активностью, но влияющих на общие свойства раствора [23, 16].

Также возможно, что оптимум pH для поверхностной активности биосурфактанта штамма находится в щелочном диапазоне (pH 8,5-9,0) [27], тогда как модельный эксперимент проводился при нейтральном pH. Кроме того, известно, что некоторые липопептидные биосурфактанты (итурин, фенгигин) часто проявляют себя как более эффективные эмульгаторы, чем агенты, снижающие межфазное натяжение, что может быть менее оптимально для мобилизации нефти из поровых каналов [23].

Согласно полученным данным, максимальная эффективность в увеличении нефтеотдачи достигнута для биосурфактанта, продуцируемого штаммом *Bacillus sp.* 2a в концентрации 0,5%, что обеспечило дополнительное извлечение нефти в размере 31,2% от остаточного объёма. При той же концентрации (0,5%) продукт штамма *Bacillus sp.* 2a сопоставим по значению с синтетическим ПАВ (разница значений составляет менее 2%), кроме того, превосходит значения для биосурфактанта, продуцируемого штамма *Peribacillus sp.* 2b, для которого дополнительное извлечение нефти составило 23,2% при высоком выходе биомассы. С учётом литературных данных [14; 31], механизм действия биосурфактантов в БМУН может иметь комплексный характер и составлять как снижение межфазного натяжения нефть-вода (до 5×10^{-3} мН/м), так и эмульгирование остаточной нефти наряду с влиянием на смачиваемость пород-коллекторов.

Таблица 1.

Эффективность биосурфактантов в моделях БМУН

Table 1. Efficacy of biosurfactants in BMUN models

Образец	PV (мл)	ООПР (мл)	Нефть после вторичной добычи (мл)	Нефть после третичной добычи (мл)	AOR (%)
Биосурфактант <i>Bacillus</i> sp. 2a (0.1%)	45 ± 2,7	25 ± 1,0	17,0 ± 0,21	1,75 ± 0,15	21,88 ± 0,5
Биосурфактант <i>Bacillus</i> sp. 2a (0.2%)	40 ± 2,4	25 ± 1,5	17,0 ± 0,12	2,25 ± 0,18	28,1 ± 1,0
Биосурфактант <i>Bacillus</i> sp. 2a (0.5%)	50 ± 3,0	25 ± 1,5	17,0 ± 0,135	2,50 ± 0,225	31,2 ± 0,6
Биосурфактант <i>Peribacillus</i> sp. 2b (0.1%)	40 ± 2,4	20 ± 1,6	13,0 ± 0,15	1,45 ± 0,21	20,7 ± 0,3
Биосурфактант <i>Peribacillus</i> sp. 2b (0.2%)	45 ± 2,7	28 ± 1,3	18,0 ± 0,09	2,15 ± 0,27	21,5 ± 0,4
Биосурфактант <i>Peribacillus</i> sp. 2b (0.5%)	43 ± 2,6	30 ± 1,4	19,0 ± 0,015	2,55 ± 0,345	23,2 ± 0,6
Синтетический сурфактант (0.1%)	50 ± 3,0	26 ± 1,3	15,0 ± 0,15	2,50 ± 0,21	22,7 ± 0,8
Синтетический сурфактант (0.2%)	50 ± 3,0	21 ± 1,1	14,0 ± 0,105	1,95 ± 0,255	27,9 ± 0,6
Синтетический сурфактант (0.5%)	45 ± 2,7	23 ± 1,0	16,0 ± 0,045	2,05 ± 0,315	29,3 ± 0,5
Контроль	45 ± 2,7	24 ± 1,1	12,0 ± 0,0	0 ± 0,0	0,0

Закключение

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность биосурфактантов, продуцируемых штаммами *Bacillus* sp. 2a и *Peribacillus* sp. 2b, для технологий повышения нефтеизвлечения (БМУН). Штамм *Bacillus* sp. 2a проявил максимальную поверхностную активность в период 24-48 ч культивирования, снижая поверхностное натяжение культуральной жидкости до 29,6 мН/м при оптической плотности 0,378, тогда как значения для штамм *Peribacillus* sp. 2b достигали высоких значений к 48 ч (52,8 мН/м,

OD600 0.968). В модельных экспериментах с песчаными колонками биосурфактант штамма *Bacillus* sp. 2a в концентрации 0,5% обеспечил дополнительное нефтеизвлечение нефти со значением 31,2%, что сопоставимо с эффективностью синтетического ПАВ (29,3%) и превзошло результат штамма *Peribacillus* sp. 2b, значение которого составило 23,18. Высокая эффективность штамма *Bacillus* sp. 2a может быть связана со способностью его липопептидов взаимодействовать с высокомолекулярными компонентами нефти (смолы, асфальтены, парафины). Полученные данные демонстрируют целесообразность пилотных испытаний штамма *Bacillus* sp. 2a на кернах, характеризующих породы пласта-коллектора с высоким содержанием тяжёлых фракций нефти и приближённых к горным условиям.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность коллективу кафедры биотехнологии Казанского федерального университета за консультации и техническую поддержку. Отдельная благодарность директору Института экологии, биотехнологии и природопользования, профессору С.Ю. Селивановской, за предоставление исследовательской инфраструктуры и научное руководство.

Список литературы / References

1. Al-Sulaimani, H., Joshi, S., Al-Wahaibi, Y., Al-Bahry, S., Elshafie, A., & Al-Bemani, A. (2011). Microbial biotechnology for enhancing oil recovery: current developments and future prospects. *Biotechnol Bioinf Bioeng*, 1(2), 147–158.
2. Al-Wahaibi, Y., Joshi, S., Al-Bahry, S., Elshafie, A., Al-Bemani, A., & Shibulal, B. (2014). Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* B30 and its application in enhancing oil recovery. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 114, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.09.022>.
3. Alvarez, V. M., Guimarães, C. R., Jurelevicius, D., de Castilho, L. V. A., de Sousa, J. S., da Mota, F. F., & Seldin, L. (2020). Microbial enhanced oil recovery potential of surfactin-producing *Bacillus subtilis* AB2.0. *Fuel*, 272, 117730. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117730>. EDN: <https://elibrary.ru/SSHQZ>.

4. Caccamo, M. T., Gugliandolo, C., Zammuto, V., & Magazù, S. (2020). Thermal properties of an exopolysaccharide produced by a marine thermotolerant *Bacillus licheniformis* by ATR-FTIR spectroscopy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.163>. EDN: <https://elibrary.ru/WLTTAZ>.
5. Cooper, D. G., & Goldenberg, B. G. (1987). Surface-active agents from two *Bacillus* species. *Applied and Environmental Microbiology*, 53(2), 224–229. <https://doi.org/10.1128/aem.53.2.224-229.1987>.
6. Daoshan, L., Shouliang, L., Yi, L., & Demin, W. (2004). The effect of biosurfactant on the interfacial tension and adsorption loss of surfactant in ASP flooding. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 244(1-3), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.06.017>. EDN: <https://elibrary.ru/KMMQMR>.
7. Das, K., & Mukherjee, A. K. (2007). Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India. *Bioresource Technology*, 98(7), 1339–1345. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.032>.
8. Das, P., Mukherjee, S., & Sen, R. (2008). Antimicrobial potential of a lipopeptide biosurfactant derived from a marine *Bacillus circulans*. *Journal of Applied Microbiology*, 104(6), 1675–1684. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03701.x>.
9. Geetha, S. J., Banat, I. M., & Joshi, S. J. (2018). Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 14, 23–32.
10. Gimenez, D., et al. (2021). Fengycin A analogues with enhanced chemical stability and antifungal properties. *Organic Letters*, 23(12), 4672–4676. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.1c01387>. EDN: <https://elibrary.ru/DBRJMG>.
11. Heyd, M., Kohnert, A., Tan, T. H., Nusser, M., Kirschhöfer, F., Brenner-Weiss, G., & Berensmeier, S. (2008). Development and trends of biosurfactant analysis and purification using rhamnolipids as an example. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391(5), 1579–1590. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1828-4>. EDN: <https://elibrary.ru/MDHNYZ>.
12. Jahanbani Veshareh, M., Ganji Azad, E., Deihimi, T., Niazi, A., & Ayatollahi, S. (2019). Isolation and screening of *Bacillus subtilis* MJ01 for MEOR application: biosurfactant characterization, production optimization and wetting effect on carbonate surfaces. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9(1), 233–245. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0457-0>. EDN: <https://elibrary.ru/DNQPKK>.
13. Jacques, P. (2010). Surfactin and other lipopeptides from *Bacillus* spp. In *Biosurfactants: from genes to applications* (pp. 57–91). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14490-5_3.
14. Kaur, A., Madhu, Sharma, A., Singh, K., & Upadhyay, S. (2024). Investigation of two-pore K⁺ (TPK) channels in *Triticum aestivum* L. suggests their role in stress

- response. *Heliyon*, 10, e27814. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27814>. EDN: <https://elibrary.ru/BILSKN>.
15. Lin, S. C., Lin, K. G., Lo, C. C., & Lin, Y. M. (1998). Enhanced biosurfactant production by a *Bacillus licheniformis* mutant. *Enzyme and Microbial Technology*, 23(3-4), 267–273. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(98\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(98)00049-0). EDN: <https://elibrary.ru/ABCHBD>.
 16. Liu, C., Lu, J., Lu, L., Liu, Y., Wang, F., & Xiao, M. (2010). Isolation, structural characterization and immunological activity of an exopolysaccharide produced by *Bacillus licheniformis* 8-37-0-1. *Bioresource Technology*, 101(14), 5528–5533. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.151>.
 17. Mnif, I., & Ghribi, D. (2015). Review lipopeptides biosurfactants: main classes and new insights for industrial, biomedical, and environmental applications. *Peptide Science*, 104(3), 129–147. <https://doi.org/10.1002/bip.22630>.
 18. Mnif, I., Segovia, R., Bouallegue, A., Ghribi, D., & Rabanal, F. (2023). Identification of different lipopeptides isoforms produced by *Bacillus mojavensis* BI2 and evaluation of their surface activities for potential environmental application. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(6), 2668–2685. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02752-3>. EDN: <https://elibrary.ru/TZQCHJ>.
 19. Nanjundan, J., Ramasamy, R., Uthandi, S., & Ponnusamy, M. (2019). Antimicrobial activity and spectroscopic characterization of surfactin class of lipopeptides from *Bacillus amyloliquefaciens* SR1. *Microbial Pathogenesis*, 128, 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.01.037>. EDN: <https://elibrary.ru/RAAZVG>.
 20. Peypoux, F., Bonmatin, J. M., & Wallach, J. (1999). Recent trends in the biochemistry of surfactin. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 51(5), 553–563. <https://doi.org/10.1007/s002530051432>. EDN: <https://elibrary.ru/ATUYDY>.
 21. Pornsunthorntawe, O., Artaweeporn, N., Paisanjit, S., Somboonthanate, P., Abe, M., Rujiravanit, R., & Chavadej, S. (2008). Isolation and comparison of biosurfactants produced by *Bacillus subtilis* PT2 and *Pseudomonas aeruginosa* SP4 for microbial surfactant-enhanced oil recovery. *Biochemical Engineering Journal*, 42(2), 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.06.016>.
 22. Prithiviraj, A., & Parthasarathi, R. (2023). Biocontrol potential of lipopeptide bio surfactant produced by *Bacillus* sp. from mangrove ecosystem at Vellar-Coleroon estuarine complex against early blight of tomato. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8037888>.
 23. Rani, R. P., Anandharaj, M., Sabhapathy, P., & Ravindran, A. D. (2017). Physico-chemical and biological characterization of novel exopolysaccharide produced by *Bacillus tequilensis* FR9 isolated from chicken. *International Journal of Biological Macromolecules*, 96, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.122>.
 24. Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R. G., & Prest, B. C. (2024). *Global energy outlook 2024: Peaks or plateaus*. Resources for the Future: Washington, DC, USA.

25. Sang-Cheol, L., Kim, S. H., Park, I. H., Chung, S. Y., Chandra, M. S., & Yong-Lark, C. (2010). Isolation, purification, and characterization of novel fengycin S from *Bacillus amyloliquefaciens* LSC04 degrading crude oil. *Biotechnology and Bio-process Engineering*, 15(2), 246–253. <https://doi.org/10.1007/s12257-009-0037-8>. EDN: <https://elibrary.ru/YBMLZV>.
26. Satpute, S. K., Bhawsar, B. D., Dhakephalkar, P. K., & Chopade, B. A. (2008). Assessment of different screening methods for selecting biosurfactant producing marine bacteria. *Indian Journal of Marine Sciences*, 37(3), 243.
27. Sayem, S. A., Alam, M. J., & Hoq, M. M. (2006). Effect of temperature, pH and metal ions on the activity and stability of alkaline protease from novel *Bacillus licheniformis* MZK03. *Proceedings-Pakistan Academy of Sciences*, 43(4), 257.
28. Tavassoli, T., Mousavi, S. M., Shojaosadati, S. A., & Salehizadeh, H. (2012). Asphaltene biodegradation using microorganisms isolated from oil samples. *Fuel*, 93, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.021>.
29. Van Hamme, J. D., Singh, A., & Ward, O. P. (2006). Physiological aspects: Part 1 in a series of papers devoted to surfactants in microbiology and biotechnology. *Biotechnology Advances*, 24(6), 604–620. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.08.001>.
30. Xia, W. J., Dong, H. P., Yu, L., & Yu, D. F. (2011). Comparative study of biosurfactant produced by microorganisms isolated from formation water of petroleum reservoir. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 392(1), 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.09.044>.
31. Youssef, N. H., Duncan, K. E., Nagle, D. P., Savage, K. N., Knapp, R. M., & McInerney, M. J. (2004). Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms. *Journal of Microbiological Methods*, 56(3), 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2003.11.001>.

ВКЛАД АВТОРОВ

Кириченко А.А.: визуализация, написание – подготовка оригинального проекта.

Бикташева Л.Р.: концептуализация, методология, написание – подготовка оригинального проекта.

Гордеев А.С.: проверка достоверности, обработка данных.

Курынцева П.А.: формальный анализ, написание – обзор и редактирование, авторский надзор, финансирование.

Абдалджалил Х.: исследование.

Все авторы прочитали опубликованную версию рукописи и согласились с ней.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anastasia A. Kirichenko: visualization, writing – original draft preparation.

Liliia R. Biktasheva: conceptualization, methodology, writing – original draft preparation.

Alexander S. Gordeev: data validation, data processing.

Polina A. Kuryntseva: formal analysis, writing – review and editing, author supervision, funding.

Hasan Abdaljalil: investigation.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Гордеев Александр Сергеевич, научный сотрудник

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
Drgor@mail.ru*

Кириченко Анастасия Алексеевна, студент

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
A.Kirichenko696@yandex.ru*

Бикташева Лилия Рамилевна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологий

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
biktasheval@mail.ru*

Абдалджалил Хасан, аспирант

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
hasanabdaljalil23@gmail.com*

Курынцева Полина Александровна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологий

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
polinazwerewa@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. Gordeev, Research Associate

*Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
Drgor@mail.ru
SPIN-code: 6961-0144*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1918-305X>

ResearcherID: AAI-8761-2020

Scopus Author ID: 57207854487

Anastasiia A. Kirichenko, Student

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

A.Kirichenko696@yandex.ru

SPIN-code: 5485-9014

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2799-4863>

ResearcherID: LLM-0739-2024

Scopus Author ID: 58754395500

Liliia R. Biktasheva, PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Biotechnology Department

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

biktasheval@mail.ru

SPIN-code: 2867-4922

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-444X>

ResearcherID: N-3675-2016

Scopus Author ID: 56358635400

Hassan Abdaljalil, Graduate Student

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

hasanabdaljalil23@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3038-1796>

Polina A. Kuryntseva, PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Biotechnology Department

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

polinazwerewa@yandex.ru

SPIN-code: 3916-9347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9274-7077>

ResearcherID: M-3407-2016

Scopus Author ID: 56069925000

Поступила 18.09.2025

После рецензирования 21.11.2025

Принята 30.12.2025

Received 18.09.2025

Revised 21.11.2025

Accepted 30.12.2025

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

Научный обзор

Scientific review

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1519](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1519)EDN: [GNEQWJ](https://www.edn.ru/GNEQWJ)

УДК 577.19



Полиамины – как факторы старения и долголетия у птиц в сравнении с млекопитающими: обзор

Д.А. Устьянцев, М.Г. Маклецова, Г.А. Зеленкова,
Н.А. Кочеткова, Е.В. Плеханова, А.П. Зеленков

*Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Старение – запрограммированный на генетическом и эпигенетическом уровнях патофизиологический процесс, скорость которого определяется соотношением между факторами повреждения, с одной стороны, и факторами репарации организма – с другой. Отсутствие на сегодняшний день универсальной теории старения является поводом для новых научных изысканий, направленных на изучение фундаментальных механизмов старения у различных видов животных. Продолжительность жизни у птиц значительно выше, чем у млекопитающих при нормализации по размеру тела и стандартизации по константе Рубнера. Свой вклад в долгожительство птиц вносят полиамины в силу особенностей обмена последних и более высокому их уровню в организме птиц по сравнению с млекопитающими.

Полиамины, такие как спермидин и спермин, представляют собой уникальный класс поликатионных молекул, характеризующихся плеiotропной генетической, биохимической и физиологической активностью, проявляющейся во всех тканях организма животных. В настоящее время, исследование роли полиаминов в процессах старения приобретает особую актуальность.

Цель представленного научного обзора заключается в разработке гипотезы о ведущем влиянии полиаминов (в первую очередь спермидина и спермина) на феномен долгожительства птиц по сравнению с млекопитающими. В основе данного исследования лежит гипотеза о том, что именно метаболические особенности полиаминов, отчетливо различающиеся у птиц и млекопитающих, являются ключевым фактором, определяющим расхождение в темпах старения и видовом пределе продолжительности жизни, наблюдаемом у представителей этих двух классов позвоночных.

Материалы и методы. Проанализированы литературные источники, представленные в базе научной литературы Elibrary (<https://elibrary.ru/>), PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>), Google Academy (<https://scholar.google.ru/schhp?hl=ru>). Для анализа были отобраны полнотекстовые научные и краткие сообщения, опубликованные на русском и английском языках.

Результаты. Полиамины являются не только маркерами старения, но могут рассматриваться в качестве предикторов долголетия, о чем свидетельствует эффективность влияния полиаминов на все системы организма. Предложенная гипотеза о продолжительности жизни у птиц предоставляет перспективное направление для дальнейших исследований. Проверка этой гипотезы с использованием обширных наборов данных, включающих различные виды птиц и учитывающих множество переменных, позволит значительно углубить наше понимание механизмов старения и факторов, определяющих продолжительность жизни.

Ключевые слова: полиамины; спермидин; спермин; путресцин; старение; стресс; птицы; синдром темпа жизни; возраст-зависимые патологии

Для цитирования. Устьянцев, Д. А., Маклецова, М. Г., Зеленкова, Г. А., Кочеткова, Н. А., Плеханова, Е. В., & Зеленков, А. П. (2026). Полиамины – как факторы старения и долголетия у птиц в сравнении с млекопитающими: обзор. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 267–299. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1519>

Polyamines as factors of aging and longevity in birds compared to mammals: review

**D.A. Ustyantsev, M.G. Makletsova, G.A. Zelenkova,
N.A. Kochetkova, E.V. Plekhanova, A.P. Zelenkov**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Background. Aging is a pathophysiological process programmed at the genetic and epigenetic levels, the speed of which is determined by the ratio between damage factors, on the one hand, and body repair factors, on the other. The current lack of a universal theory of aging is the reason for new scientific research aimed at studying the fundamental mechanisms of aging in various animal species. Life expectancy in birds is significantly higher than in mammals when normalized by body size and standardized by the Rubner constant. Polyamines contribute to the longevity of birds due to the peculiarities of their metabolism and their higher levels in the body of birds compared to mammals.

Polyamines, such as spermidine and spermine, are a unique class of polycationic molecules characterized by pleiotropic genetic, biochemical and physiological activity, manifested in all tissues of the animal body. Currently, the study of the role of polyamines in the aging process is becoming particularly relevant.

The **purpose** of this scientific review is to develop a hypothesis about the leading influence of polyamines (primarily spermidine and spermine) on the phenomenon of longevity in birds compared with mammals. This study is based on the hypothesis that it is the metabolic features of polyamines, which are clearly different in birds and mammals, that are the key factor determining the discrepancy in the rate of aging and the species limit of life expectancy observed in representatives of these two classes of vertebrates.

Materials and methods. We analyzed scholarly sources available in the Elibrary (<https://elibrary.ru/>), PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), and Google Scholar (<https://scholar.google.ru/schhp?hl=ru>) databases. Full-text scientific and short reports published in Russian and English.

Results. Polyamines are not only markers of aging, but can be considered as predictors of longevity, as evidenced by the effectiveness of the effect of polyamines on all body systems. The proposed hypothesis about life expectancy in birds provides a promising direction for further research. Testing this hypothesis using extensive datasets that include various bird species and take into account many variables will significantly deepen our understanding of the mechanisms of aging and the factors that determine life expectancy.

Keywords: polyamines; spermidine; spermine; putrescine; aging; stress; birds; pace of life syndrome; age-related pathologies

For citation. Ustyantsev, D. A., Makletsova, M. G., Zelenkova, G. A., Kochetkova, N. A., Plekhanova, E. V., & Zelenkov, A. P. (2026). Polyamines as factors of aging and longevity in birds compared to mammals: review. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 267–299. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1519>

Введение

Полиамины – путресцин, спермидин и спермин – представлены во всех живых организмах: от бактерий и растений до животных и человека. Несмотря на все многообразие функциональной активности в различных тканях и органах и на различия в пути метаболических путей у растений, птиц и млекопитающих, можно отметить общность их участия в реализации стресс-реакции и регуляции старения [27; 35; 40; 59]. Антистрессорный эффект (препятствие развития стресса в организме) показан для всех 3-х основных полиаминов [35; 57; 60]. Особенно важно изучение спермидина, метаболизм которого связан с долголетием [18; 36; 73]. Доказано, что спермидин замед-

ляет процесс старения, снижает частоту возникновения и тяжесть возрастных патологий и продлевает жизнь [9; 36; 73]. Эффекты спермидина отличаются от эффектов спермина и путресцина несмотря на то, что полиамины могут легко метаболизировать друг в друга. Благодаря своему положительному заряду полиамины могут взаимодействовать с отрицательно заряженными высокомолекулярными соединениями, такими как ДНК, РНК, аденозинтрифосфат и белки. Эти молекулы выполняют множество функций во многих физиологических и патофизиологических процессах, включая клеточную пролиферацию, дифференцировку, рост, регенерацию тканей и регуляцию генов [30; 48; 54]. Благодаря своим антиоксидантным функциям, противовоспалительным свойствам, способности улучшать протеостазу и метаболическим функциям митохондрий, спермидин участвует в ряде биологических событий, включая индукцию аутофагии, апоптоз, транскрипцию и поддержание стабильности ДНК [18; 35; 36; 57; 59; 60; 73]. Уровень спермидина и спермина в клетках снижается с возрастом, а прием экзогенных добавок со спермидином предотвращает негативные возрастные изменения, и увеличивает продолжительность жизни [21; 22]. В настоящее время предлагается использовать полиамины в птицеводстве и животноводстве в качестве средства, повышающих адаптивные возможности организма [42].

В данной статье представлен обобщённый и актуализированный обзор современных данных, касающихся взаимосвязи метаболизма полиаминов и процессов старения у птиц.

Содержание полиаминов у птиц и млекопитающих в тканях

Полиамины представляют собой обширную группу биогенных аминов, включающую в себя такие ключевые соединения, как путресцин, спермидин и спермин. Помимо указанных, в состав данной группы также входят кадаверин и агматин, синтез которых осуществляется посредством декарбоксилирования лизина и аргинина, соответственно.

В данной работе рассматривается роль и метаболизм полиаминов, в частности, спермидина и спермина, биосинтез которых катализируется ферментом орнитиндекарбоксилазой (ОДК), и для которых установлена их способность модулировать продолжительность жизни [48]. Поддержание физиологических концентраций указанных полиаминов является необходимым условием для обеспечения процессов роста и развития, выживания и адаптации у различных видов животных. В связи с этим, на протяжении последних пяти десятилетий проводятся интенсивные исследования, направленные на изучение механизмов синтеза, катаболизма, транспорта и других аспектов метаболизма полиаминов [7; 27; 35; 40; 59].

Видовое распределение полиаминов

Распределение полиаминов в тканях организма птиц, млекопитающих и человека было исследовано в различных научных лабораториях [28; 34], так, к примеру, в статье Ibarra Gonzalez (2015) были получены результаты, где уровень спермидина был выше спермина [29].

Установлено, что спермидин и спермин в свободной форме составляют лишь 8-10% от их общего содержания в клетке. Важно отметить, что переход полиаминов из связанного состояния в свободное происходит динамически, в зависимости от изменений заряда молекул, с которыми они взаимодействуют, включая нуклеиновые кислоты, АТФ, белки и фосфолипиды [29]. Именно свободная форма полиаминов представляет собой метаболически активный пул, доступный для дальнейших биохимических трансформаций. Поставлено, что в тканях птиц более высокое содержание полиаминов по сравнению с млекопитающими [34; 62]. Сравнительный анализ продолжительности жизни и размеров тела птиц и млекопитающих позволил сделать вывод, что птицы живут значительно дольше, чем млекопитающие [28; 49]. Сравнивая содержание полиаминов в почках, можно отметить, что в почках млекопитающих уровень спермидина и спермина более низкий (9,4–12,7 и 38,4–82,8 мг/кг соответственно) [56], а в почках домашней птицы (кур и уток) выше (12,95–18,36 мг/кг и 238,56–261,08 мг/кг соответственно) [23]. Причем основные различия отмечаются в содержании спермина. В отличие от млекопитающих, у птиц синтез полиаминов в тканях происходит не только из аргинина, а также из пролина (рисунок 1).

Количественный анализ содержания полиаминов в тканях различных пород домашней птицы продемонстрировал наличие видовых особенностей в распределении данных биогенных аминов [23]. Несмотря на это, были выявлены и общие тенденции: во всех исследованных тканях трех видов домашней птицы концентрация спермина превосходила концентрации спермидина и путресцина. Данное наблюдение служит дополнительным аргументом в пользу гипотезы о том, что спермин является преобладающим компонентом общего пула полиаминов в тканях домашней птицы [23]. К общим закономерностям можно отнести распределение по тканям - наиболее высокое содержание полиаминов было показано в иммунокомпетентных тканях: селезенке, тимусе и фабрицевой сумке птиц и составило для путресцина 3,24 - 29, для спермидина - 0,46 - 164 и для спермина 64- 489 мг / кг массы ткани, ниже содержание полиаминов в скелетных мышечных тканях и в сердце. Широкое распространение печени птиц,

как продукта питания человека, определяет интерес к содержанию полиаминов в печени разных видов сельскохозяйственных птиц. Уровень путресцина, спермидина и спермина в печени курицы составлял 2,0, 56,9 и 119,6 мг/кг, а в печени утки - 21,1, 106,3 и 132,1 мг/кг соответственно [23]. Содержание спермина *в 2 раза* выше в печени гусей, чем у кур и уток [34].

У человека наблюдается выраженная гетерогенность в распределении полиаминов по различным тканям, включая мышцы, почки, предстательную железу и головной мозг. Наиболее высокие концентрации спермина обнаружены в предстательной железе (24 нмоль/мг белка), в то время как в почках содержание спермидина и спермина составляет 2,18 и 6,85 нмоль/мг белка, соответственно [7]. В головном мозге также отмечается неравномерное распределение полиаминов: высокие уровни спермидина зафиксированы в белом веществе (20 нмоль/мг белка) и таламусе (9,3 нмоль/мг белка), а спермина – в коре мозжечка (3,4 нмоль/мг белка) [7]. Согласно имеющимся данным, полиамины синтезируются преимущественно в нейронах и аккумулируются в глиальных клетках, что объясняет их повышенное содержание в белом веществе коры больших полушарий головного мозга [7].

Общей закономерностью является:

1. Более высокое содержание полиаминов в тканях птиц по сравнению с млекопитающими; Содержание спермидина и спермина в 10-20 раз выше в тканях птиц по сравнению с млекопитающими. 2. Содержание полиаминов различаются в тканях. Наиболее высокое в иммунокомпетентных тканях. 3. В крови содержание полиаминов выше в эритроцитарной массе, чем в сыворотке крови. 4. Содержание спермидина в крови наиболее высокое по сравнению со спермином и путресцином, а также значительно выше ацетилированных производных полиаминов. 5. В тканях молодых животных и птиц содержание полиаминов выше, чем в тех же тканях взрослых животных [62].

Синтез полиаминов у птиц

Образование полиаминов происходит при декарбоксилировании орнитина. Внутриклеточный биосинтез спермидина и спермина начинается с диамина - путресцина, который в свою очередь синтезируется из орнитина (рисунок 1).

Лимитирующим образование полиаминов является фермент ОДК [55]. Образование орнитина возможно несколькими путями - из незаменимой аминокислоты аргинина под действием аргиназы и из пролина с участием ферментов пролиноксидазы и орнитинаминотрансферазы (рисунок 1).

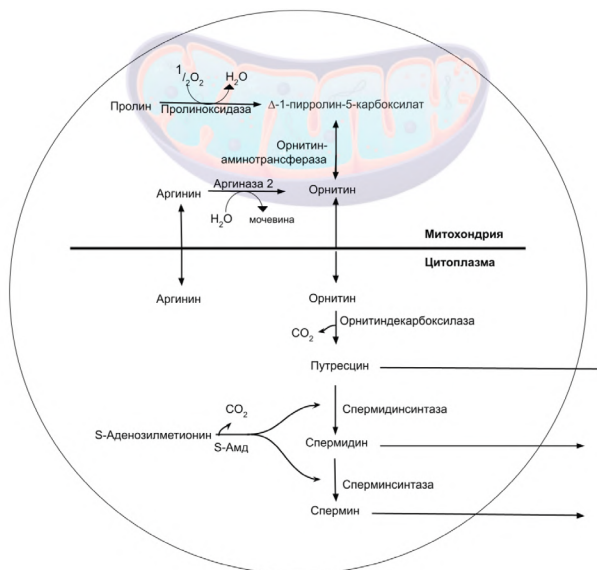


Рис. 1. Синтез полиаминов в клетках птиц. Синтез орнитина из пролина в митохондриях происходит в несколько этапов: 1) реакция дегидрогенации пролина НАД-дегидрогеназой (скорость лимитирующая) фермент приводит к образованию 5-пролин-2-карбоновой кислоты; 2) Разрушение цикла по месту двойной связи; 3) Формирование γ -полуальдегида; 4) Реакция трансминирования γ -полуальдегида с образованием орнитина. Так как реакция дегидрогенации пролина происходит с отщеплением H^+ , в ходе окислительно-восстановительной реакции, фермент автор называет – пролиноксидаза [23].

Сокращения: S-Амд – S-аденозилметиониндекарбоксилаза.

Fig. 1. Polyamine synthesis in avian cells. The synthesis of ornithine from proline in the mitochondria occurs in several stages: 1) the dehydrogenation of proline by NAD-dehydrogenase (the rate-limiting step), which leads to the formation of 5-proline-2-carboxylic acid; 2) Breakage of the cycle at the double bond; 3) Formation of γ -half-aldehyde; 4) Transamination of γ -half-aldehyde to form ornithine. Since the dehydrogenation of proline occurs with the release of H^+ during a redox reaction, the author refers to the enzyme as proline oxidase [23].

Abbreviations: S-Amd – S-adenosylmethionine decarboxylase.

У млекопитающих синтез орнитина происходит в цитозоле из аргинина. В ходе эмбриогенеза в плаценте млекопитающих наблюдается синтез орнитина из пролина (заменимой аминокислоты) в митохондриях, что связано с необходимостью поддержания высокого уровня полиаминов для биосинтеза белков и нуклеиновых кислот в ходе роста и развития эмбриона [36]. Furukawa с соавторами [23] установили, что при [C-14]-введе-

нии аргинина и [C-14]-пролина в почках кур данные аминокислоты легко превращались в полиамины. В ходе проведенных исследований было установлено наличие активности ряда ферментов, участвующих в метаболизме аминокислот и полиаминов, в тканях кур. В частности, выявлена активность орнитинаминотрансферазы (ОАТ, митохондриальная локализация) и орнитиндекарбоксилазы (ОДК, цитозольная локализация). При этом аргиназа и пролиноксидаза (ПО) были идентифицированы в митохондриальной фракции клеток почек кур. Примечательно, что концентрация полиаминов плазме крови птиц значительно превышает (в 20-100 раз) аналогичные показатели, характерные для млекопитающих. Данный факт может свидетельствовать об интенсивном транспорте полиаминов в различные ткани, что, в свою очередь, потенциально обеспечивает ускоренные темпы роста и развития организма [23].

На основании полученных данных, авторами были выявлены два принципиальных отличия между метаболизмом полиаминов у птиц и млекопитающих. Во-первых, установлены различия в механизмах эндогенного синтеза полиаминов, а во-вторых, обнаружены значительные различия в концентрациях полиаминов в плазме крови. Высокий уровень полиаминов в крови птиц, вероятно, обеспечивает интенсификацию процесса роста и развития, а также, возможно, является одним из факторов, определяющих относительно высокую продолжительность жизни, характерную для представителей класса птиц. В метаболическом каскаде полиаминов, следующим за путресцином ключевым соединением является триамин – спермидин. Его биосинтез катализируется ферментом спермидинсинтазой (СПДСи), которая осуществляет перенос аминопропильной группы $[\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3-]$ от декарбоксилированного S-аденозилметионина к аминогруппе молекулы путресцина, что и приводит к образованию спермидина. Последующая трансформация спермидина в спермин происходит посредством аналогичного переноса аминопропильной группы, катализируемого ферментом сперминсинтазой (СПМСи), что обеспечивает наращивание полиаминной цепи.

Одним из значимых аспектов, определяющих *динамику метаболизма полиаминов*, является оценка их экзогенного поступления из кишечника. В настоящее время известно о существовании трех основных путей пополнения пула полиаминов в организме птиц и млекопитающих: абсорбция из продуктов питания, синтез энтеробактериями кишечника и эндогенный биосинтез в тканях организма. Значительное количество исследований посвящено изучению содержания полиаминов в различных продуктах

питания, а также оценке влияния пробиотических препаратов на уровень полиаминов в организме птиц, млекопитающих и человека [8; 11; 13; 37; 39; 41; 50; 51].

Следовательно, внутриклеточная концентрация полиаминов, включающих путресцин, спермидин и спермин, находится под строгим многоуровневым контролем, осуществляемым посредством сбалансированного функционирования основных регуляторных систем, таких как: *de novo* биосинтеза, ацетилирования с последующим экспортом, транспортных механизмов, а также модуляции поступления полиаминов из кишечника.

Полиамины и старение

Для всех живых организмов характерно снижение уровня полиаминов с возрастом, однако, следует отметить значительные различия между видами животных, исследуемыми тканями и сравниваемыми возрастными группами [30; 31; 65]. Первое резкое снижение (на 35%) содержания полиаминов в тканях у млекопитающих наблюдается в период между рождением и отлучением от груди, затем уровни полиаминов фактически остаются стабильными на протяжении всей взрослой жизни грызунов [31].

Изучение обмена полиаминов в мозге у мышей линии SAMP/ SAMR показало, что уже на ранних стадиях постнатального развития у стареющих животных содержание полиаминов ниже по сравнению с контролем [4].

Снижение уровня спермина и спермидина у людей и приматов начинается после 40 лет [70]. В человеческом мозге обнаружена отрицательная корреляция между уровнями спермина/спермидина и возрастом в коре головного мозга, базальных ганглиях и коре мозжечка [68]. Показано, что у людей в возрасте 90 и 100 лет уровень спермидина в цельной крови в три раза выше, чем у 40-летних [69].

Влияние введения полиаминов на продолжительность жизни показана в опытах in vitro и in vivo

Введение экзогенных полиаминов, таких как спермидин и спермин, продемонстрировало способность увеличивать продолжительность жизни культивируемых иммунных клеток [46]. Исследования *in vivo* подтверждают геронтологический эффект экзогенного спермидина, проявляющийся в увеличении продолжительности жизни у различных модельных организмов, включая дрожжи (на 40%), *Drosophila melanogaster* (на 30%), нематод (*Caenorhabditis elegans*, на 15%) и грызунов (на 10%) [7; 48; 65; 73]. У людей была зарегистрирована положительная корреляция между повышен-

ным потреблением спермидина с пищей и долголетием [38]. Полиамины также предотвращают снижение когнитивных функций, стимулируя аутофагию и митофагию, улучшая митохондриальное дыхание, уменьшая нейровоспаление и модулируя медиаторный обмен [5; 21].

Механизмы геропротекторного действия полиаминов

Одним из первых доказанных положительных защитных механизмов действия полиаминов для всех видов животных является их антиоксидантный эффект [14; 15; 72]. В модельных опытах на микроорганизмах, птицах и грызунах показано, что введение экзогенного путресцина, спермидина и спермина оказывает защитное действие от токсических высоко реакционноспособных свободных радикалов в условиях окислительного стресса, индуцированного гипоксией, ишемией, гипероксией, воспалением и др. [14; 15; 32; 47; 72].

Полиамины стимулируют экспрессию различных факторов антиоксидантной ферментативной защитной системы, таких как супероксиддисмутаза (СОД), каталаза и ферменты обмена глутатиона [50], но они также сами по себе действуют как антиоксиданты, выступая в роли ловушки для активных форм кислорода [72].

Чем больше аминокрупп, тем выше антиоксидантная способность, а спермин является наиболее мощным из них [19; 26]. Спермин функционирует как поглотитель свободных радикалов, который окисляется во время этого процесса. Важно отметить, что полиамины способны защищать от токсичности тяжелых металлов, подавляя образовавшиеся продукты окислительного стресса, которые были вызваны прямым хелатированием тяжелых металлов [43].

Стоит подчеркнуть, что спермидин ингибирует ацетилирование гистонов, тем самым оказывая эффект «регенерации» в отношении генома [22]. Показано в опытах *in vivo* и *in vitro*, что спермидин регулирует уровень ацетилирования гистонов, активируя P/CAF, фермент обладающий гистонацетилтрансферазной активностью, а также спермидин подавляет активность гистонацетилтрансфераз (ГАТ), одновременно стимулирует активность гистондеацетилтрансфераз (ГДАТ) [52].

Полиамины действуют как шапероны

Полиамины усиливают активность шаперонов, а также функционируют как шапероны сами по себе [16, 64]. Полиамины способствуют образованию α -спиральных структур в первичных гиперкислотных белках, что может представлять консервативный механизм для регуляции белков, опосредованной полиаминами [16], а также, кроме улучшения

сворачивания и стабильности белковых молекул, полиамины связывают ДНК [64], тем самым способствуя стабильности и репарации ДНК посредством стимуляции активности рекомбиназы RAD51 [16; 26; 64]. Полиамины также взаимодействуют с липидами, тем самым защищая мембраны от осмотического шока [61] и предотвращая разрыв мембран эритроцитов, которые в определенных условиях подвергаются высокому напряжению [10].

Существенным аспектом антивозрастного воздействия спермидина на метаболизм является его способность регулировать *липидный обмен* [3; 12]. Минуа *и др.* обнаружили, что повышенный уровень триглицеридов, а также изменённый профиль фосфолипидов и жирных кислот, были связаны с увеличением продолжительности жизни мух, которых кормили спермидином. Гао *и др.* доказали, что спермидин регулирует липидный обмен путем подавления экспрессии липогенных генов через сигнальный путь АМР-активируемой протеинкиназы (АМПК) [7].

Важно подчеркнуть, что спермидин может замедлять старение оказывая влияние на определённые сигнальные пути, таких как SIRT1/PGC-1 α , инсулин/IGF, AMPK-FOXO3a и сигнальные пути CK2/MAPK [7]. Спермидин может регулировать апоптоз и некроз клеток [61], а также полиамины способны предотвращать развитие апоптоза [65]. Сообщалось о роли спермидина в механизмах регуляции процесса некроза клеток [67].

В опытах на дрожжах было показано, что повышение уровня спермидина подавляет некроз клеток, тем самым продлевая срок жизни и улучшая метаболизм у стареющих дрожжей [67]. Важно отметить, что механизм, с помощью которого полиамины способны эффективно регулировать процесс старения у позвоночных животных, связан с модуляторной активностью нейромедиаторных систем и рецепторных комплексов (ионотропных глутаматных рецепторов, NMDA, ацетилхолиновых, ГАМК и др.) [5].

Полиамины – ключевые регуляторные молекулы активности всех систем в организме позвоночных животных

Возраст-ассоциированное снижение функциональной компетентности органов и тканей является характерным признаком старения.

Современные исследования указывают на полиамины, в частности путресцин, спермидин и спермин, как на ключевые регуляторные молекулы, оказывающие плеiotропное воздействие на различные типы тканей, включая мышечную, скелетную, соединительную, нервную, эндокринную и жировую [20; 33] (рисунок 2).

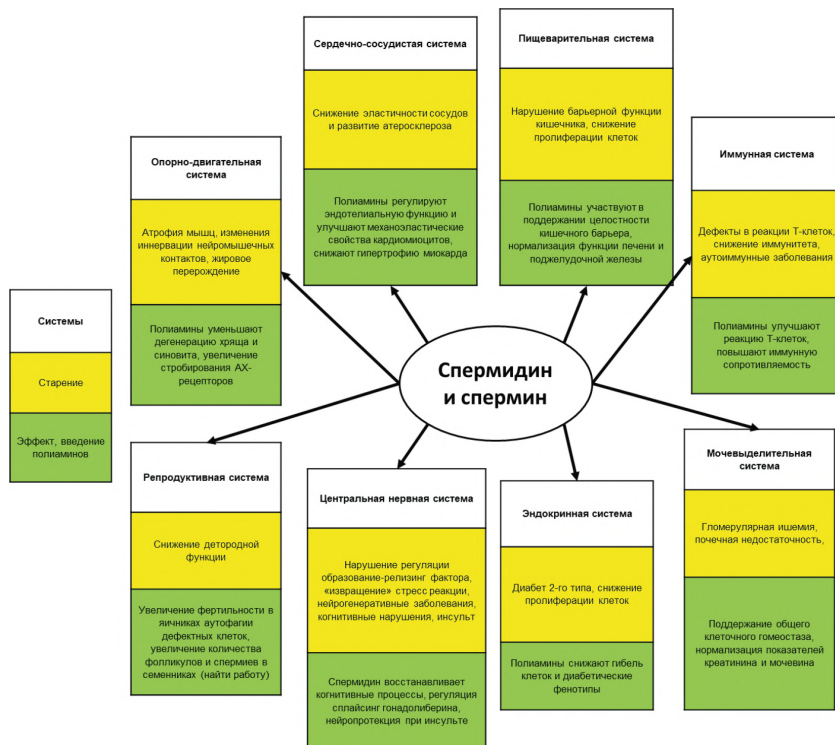


Рис. 2. Роль полиаминов в организме животных

Fig. 2. The Role of Polyamines in the Animal Body

Возраст-зависимое снижение фертильности, проявляющееся в ослаблении репродуктивной функции, является одним из ключевых признаков старения. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что добавление путресцина в рацион птиц приводит к значительному увеличению количества фолликулов в яичниках [63], что указывает на потенциальную роль путресцина в поддержании репродуктивного здоровья. Примечательно, что полиамины способны модулировать эндокринную систему посредством регуляции высвобождающих факторов. В частности, путресцин выступает в качестве регулятора альтернативного сплайсинга пре-мРНК гонадолиберина, оказывая, таким образом, влияние на экспрессию гонадотропин-рилизинг гормона (ГнРГ). ГнРГ, являясь ключевым регулятором репродуктивной оси, контролирует секрецию лютеинизирующего гормо-

на (ЛГ) и фолликулостимулирующего гормона (ФСГ), необходимых для поддержания фертильности [25].

Учитывая значительное снижение качества жизни, связанное с возрастными изменениями в *опорно-двигательной системе*, изучение молекулярных механизмов, модулирующих ее состояние и функционирование, представляет собой особенно актуальное направление исследований. В скелетных мышцах содержится значительное количество полиаминов и при старении их содержание снижается. Полиамины регулируют мышечную массу скелетных мышц, запуская активацию процессов аутофагии и митофагии [24,53]. Недавние экспериментальные исследования *in vitro* и *in vivo* показывали, что экзогенное введение спермидина обращает вспять дисфункциональную аутофагию и стимулирует митофагию в скелетных и мышцах сердца, предотвращая атрофию этих тканей [53]. Получены убедительные доказательства эффективности полиаминов и физических упражнений в качестве индукторов аутофагии, отдельно или в сочетании, что может способствовать лечению саркопении и заболеваний опорно-двигательного аппарата, патогенез которых связан со старением [24]. Ои с соавторами показали, что введение экзогенного спермидина улучшает состояние костно-суставной системы при остеоартрите, изменяя поляризацию макрофагов [53]. Сунг Х.К. с соавторами предлагают рассматривать уровень спермидина в сыворотке крови в роли предиктора переломов в опорно-двигательной системе человека [66]. Высокая геронпротекторная активность установлена в отношении эффектов спермидина на сердечно-сосудистую систему. Установлено, что спермидин снижает гипертрофию миокарда, нормализует кровяное давление, улучшает механоэластичные свойства кардиомиоцитов благодаря активации аутофагии [58].

Особенно важно в настоящее время изучение роли полиаминов в функциональной активности центральной нервной системы. Получены убедительные доказательства участия полиаминов в процессе нейропротекции при старении, что особенно важно в регуляции когнитивных нарушений, которые наблюдаются при нейродегенеративных заболеваниях. Полиамины имеют относительно высокие концентрации в головном мозге и обладают плеiotропной биохимической активностью, включая регуляцию ионных медиаторных каналов, экспрессии генов, транспорта Ca^{2+} в митохондриях и многое другое. Также описан неспецифический механизм ответной реакции на стресс со стороны полиаминов, получивший название ПСО (полиаминная стресс-реакция). В данных работах подчеркивают и ведущую роль полиаминов в регуляции синаптической пластичности в

процессе адаптации животных к экстремальным условиям окружающей среды [5; 7].

Желудочно-кишечный тракт особенно чувствителен к нарушениям обмена полиаминов

Эпителиальная ткань кишечника содержит высокие концентрации полиаминов, что связано с высокой пролиферативной активностью этих клеток. Хорошо известно, что нарушения функциональной активности кишечника являются возраст-зависимой патологией. Дополнительное введение в рацион питания животных путресцина позволяет не только увеличить уровень полиаминов, непосредственно, в клетках кишечника, но и повлиять на накопление спермидина в тканях печени и мышц [18; 73]. Эндокринная система особенно чувствительна к метаболическим изменениям уровня полиаминов [17]. Полиамины оказывают модулирующее влияние на эндокринную систему, что подтверждают работы, направленные на изучение механизмов влияния спермидина на функциональную активность последней. Показано, что полиамины влияют непосредственно на метаболизм клеток эндокринной системы, например, поджелудочной железы, где спермидин модифицирует RIPK1, подавляя развитие и прогрессирование диабета [3]. Важно отметить, что полиамины способны регулировать состояние эндокринной системы через рилизинг-факторы (как описано выше). Полиамины принимают участие в регуляции обменных процессов в жировой ткани, определяя количественный и качественный состав клеток белой жировой ткани, а также, определяя соотношение белых и бежевых адипоцитов. Обмен липидов в адипоцитах контролируется полиаминами: активация спермидин/спермин-N1- ацетилтрансферазы (ускорение метаболизма полиаминов) приводит к уменьшению энергетических запасов жиров в клетке, а замедление – наоборот, к увеличению внутриклеточных концентраций нейтральных жиров. Метаболизм полиаминов обеспечивает регуляцию массы жировой ткани благодаря изменению баланса между процессами окисления и биосинтеза жирных кислот [1; 71].

Полиамины играют важную и разнообразную роль в иммунной системе и могут влиять как на врождённый, так и на адаптивный иммунный ответ, включая модуляцию, пролиферации и дифференцировки иммунных клеток, поляризации макрофагов, иммунного старения и аутофагии, иммуносупрессии при раке [22]. Хотя изначально считалось, что полиамины оказывают иммуносупрессивное действие, теперь стало очевидно, что их иммунобиологические свойства многогранны и зависят от контекста, типов клеток и патологических состояний. Ранние исследования выявили

потенциальную роль полиаминов в развитии аутоиммунных заболеваний [46]. Недавние исследования подчёркивают ключевую роль полиаминов в регуляции иммунитета. Они усиливают активацию и пролиферацию Т-клеток, а также влияют на функции макрофагов и дендритных клеток [46]. Снижение уровня спермина в плазме крови связано с нарушением функции мочевыделительной системы [44]. Клетки почек реагируют на различные формы повреждения снижением синтеза полиаминов и активацией пути распада полиаминов. Показано, что при фиброзной патологии почек у млекопитающих наблюдается индукция сперминоксидазы в эпителии почечных канальцев с фиброзом почек, а также при этом снижается содержание спермина в почках. Более того, экспрессия SMOX в почках положительно коррелирует с фиброзом почек и снижением их функции у пациентов с хронической почечной недостаточностью. Важно отметить, что введение экзогенного спермина значительно улучшает аутофагию, замедляет старение и ослабляет фиброз в почках мышей. Кроме того, снижение уровня ATG5, важнейшего компонента аутофагии, в эпителиальных клетках канальцев усиливает экспрессию SMOX и снижает уровень спермина при фиброгенезе, вызванном TGF- β 1, *in vitro* и фиброзе почек *in vivo*. Механически ATG5 легко взаимодействует с SMOX в физиологических условиях и при фиброгенных реакциях, вызванных TGF- β 1, сохраняя уровень спермина в клетках. Авторы делают вывод, что полученные результаты позволяют предположить, что применение спермина является перспективной терапией против фиброза почек, возможно, за счёт координации аутофагии и подавления механизмов патологического старения [44].

Изменения в синаптической передаче, называемые синаптической пластичностью, являются одним из механизмов, с помощью которого нейронная активность отражает изменения в окружающей среде и влияет на функцию мозга в целом. Спермидин защищает от возрастных изменений в межнейронных связях, которые вызывают возрастные проблемы с памятью. Спермидин может предотвратить потерю нейронных митохондрий, восстановить синаптическую функцию у пожилых животных и способствовать долгосрочному потенцированию, что имеет решающее значение для обучения и памяти. Кроме того, сообщалось, что активные зоны старения в нервной системе дрозофилы достигают своей максимальной емкости, что может ограничивать синаптическую пластичность и вызывать проблемы с формированием памяти [7]. Подавляющее большинство исследований эффектов полиаминов, особенно спермидина, на синаптическую пластичность подчеркивают их важную роль в поддержании и увеличении нейронной функции.

По мере того, как мы узнаем больше о сложной связи между метаболизмом полиаминов и синаптической пластичностью, использование этих знаний для разработки методов лечения неврологических заболеваний животных и человека, разработки способов адаптации животных к стрессорным воздействиям окружающей среды становится все более актуальным.

Гипотеза синдрома темпа жизни (pace of life syndrome, POLS) и полиамины

Гипотеза синдрома темпа жизни предполагает, что в ходе эволюции живых организмов их физиологические, генетические, биохимические и поведенческие особенности должны эволюционировать совместно [2]. Данная гипотеза предполагала, что гликемия (т. е. уровень глюкозы в крови) и продукты взаимодействия с белками и другими высокомолекулярными соединениями (т. е. процесс гликирования) изменяются параллельно в ходе эволюции. Несмотря на последствия увеличения содержания глюкозы и гликирования белков в процессе старения и, следовательно, потенциально как фактора эволюции, исследования птиц особенно актуальны, так как у них самые высокие уровни глюкозы в крови среди позвоночных и еще более высокая скорректированная по массе продолжительность жизни по сравнению с организмами с похожей физиологией, как у млекопитающих. Moreno-Borralló A. с соавторами провели сравнительный анализ показателей гликирования глюкозы и альбумина у 88 видов птиц из 22 отрядов в зависимости от особенностей жизненного цикла (масса тела, масса кладки, максимальная продолжительность жизни и время развития) и рациона [49]. Уровни глюкозы положительно коррелировал со скоростью гликирования альбумина нелинейным образом, что указывает на устойчивость к гликированию у видов с более высокими уровнями глюкозы. Уровни глюкозы в плазме крови снижались с увеличением массы тела, но, вопреки тому, что предсказывает гипотеза POLS, содержание глюкозы в крови увеличивалось с максимальной продолжительностью жизни, прежде чем достичь максимального плато. Эти результаты расширяют наши знания о разнообразии гликемии и гликировании у птиц, указывая на существование механизмов устойчивости к гликированию у птиц со сравнительно высоким гликемическим индексом.

Известно, что полиамины являются соединениями, способными регулировать уровень глюкозы в крови и процесс гликирования [74]. В связи с этим можно предложить гипотезу, что в ходе эволюции содержание спермидина и спермина явились тем фактором, который определял скорость старения у птиц и млекопитающих, и являлся предиктор долголетия.

Заключение

Из приведённых выше литературных данных очевидно, что полиамины являются не только маркерами старения, но могут рассматриваться в качестве предикторов долголетия, о чем свидетельствует эффективность влияния полиаминов на все системы организма. Предложенная гипотеза о продолжительности жизни у птиц предоставляет перспективное направление для дальнейших исследований. Проверка этой гипотезы с использованием обширных наборов данных, включающих различные виды птиц и учитывающих множество переменных, позволит значительно углубить наше понимание механизмов старения и факторов, определяющих продолжительность жизни. Будущие исследования, направленные на подтверждение или опровержение этой гипотезы, могут внести значительный вклад в сравнительную биологию, геронтологию и экологию, а также способствовать разработке новых подходов к пониманию процессов старения в целом. Необходимы дальнейшие исследования для выявления конкретных причинно-следственных связей и количественной оценки влияния этих факторов, что в конечном итоге позволит построить более полную и точную модель, объясняющую продолжительность жизни птиц, в силу особенностей обмена полиаминов и их более высокого уровня в организме у птиц в сравнении с млекопитающими.

Информация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Тематика поддержана Российским научным фондом, проект № 24-26-00225 (<https://rscf.ru/project/24-26-00225/>).

Список литературы

1. Березов, Т. Т., Маклецова, М. Г., & Федорова, Т. Н. (2012). Полиамины: их роль в норме и при патологии центральной нервной системы. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*, 6(2), 38–42. EDN: <https://elibrary.ru/OZHGNJ>
2. Васильева, Н. А. (2021). Синдром темпа жизни (pace-of-life syndrome, POLS): эволюция концепции. *Зоологический журнал*, 100(9), 969–983. <https://doi.org/10.31857/S0044513421090117>. EDN: <https://elibrary.ru/IXGKTP>
3. Корзун, И. А., Неборак, Е. В., Сяткин, С. П., Сунграпова, К. Ю., Хиляль, А., & Ибрагимова, А. М. (2000). Роль полиаминов в поддержании гомеостаза белой жировой ткани. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*, 22(1), 47–54. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-1-47-54>. EDN: <https://elibrary.ru/VXOQAP>

4. Маклецова, М. Г., Куликова, О. И., Сволинский, С. Л., & Федорова, Т. Н. (2013). Содержание полиаминов в мозге 10-дневных и взрослых мышей линий SAMP1 и SAMR1, характеризующихся разным темпом старения. *Нейрохимия*, 30(3), 229–232. <https://doi.org/10.7868/S1027813313030096>. EDN: <https://elibrary.ru/QMGHIF>
5. Маклецова, М. Г., Рихирева, Г. Т., Кириченко, Е. Ю., Тринитатский, И. Ю., Вакуленко, М. Ю., и др. (2022). Роль полиаминов в механизмах когнитивных нарушений. *Нейрохимия*, 39(3), 265–278. <https://doi.org/10.31857/S1027813322030050>. EDN: <https://elibrary.ru/IGICJR>
6. Травин, Д. Ю., & Фенюк, Б. А. (2017). Старение птиц (мини-обзор). *Биохимия*, 82(1), 35–42. EDN: <https://elibrary.ru/XWTTTH>
7. Arthur, R., Jamwal, S., & Kumar, P. (2024). A review on polyamines as promising next-generation neuroprotective and anti-aging therapy. *European Journal of Pharmacology*, 978, 176804. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2024.176804>. EDN: <https://elibrary.ru/NUYIBG>
8. Atiya Ali, M., Poortvliet, E., Strömberg, R., & Yngve, A. (2011). Polyamines in foods: Development of a food database. *Food Nutr. Res.*, 55, 5572. <https://doi.org/10.3402/fnr.v55i0.5572>.
9. Bae, D. H., Lane, D. J. R., Jansson, P. J., & Richardson, D. R. (2018). The old and new biochemistry of polyamines. *Biochim. Biophys. Acta Gen. Subj.*, 1862(9), 2053–2068. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.06.004>. EDN: <https://elibrary.ru/VGHYPM>
10. Ballas, S. K., Mohandas, N., Marton, L. J., & Shohet, S. B. (1983). Stabilization of erythrocyte membranes by polyamines. *P.N.A.S.*, 80(7), 1942–1946. <https://doi.org/10.1073/pnas.80.7.1942>.
11. Bardóc, S., Duguid, T. J., Brown, D. S., Grant, G., Pusztai, A., et al. (1995). The importance of dietary polyamines in cell regeneration and growth. *Br. J. Nutr.*, 73(6), 819–828. <https://doi.org/10.1079/bjn19950087>.
12. Brenner, S., Bercovich, Z., Feiler, Y., Keshet, R., & Kahana, C. (2015). Dual Regulatory Role of Polyamines in Adipogenesis. *J. Biol. Chem.*, 290(45), 27384–27392. <https://doi.org/10.1074/jbc.M115.686980>. EDN: <https://elibrary.ru/VFSOSD>
13. Cantabrana, B., Peña-Iglesias, P., Castro-Estrada, P., Suárez, L., Bordallo, J., et al. (2025). Dietary intake of polyamines in a Spanish adult population: Age-dependent correlation with Healthy Eating Index and Dietary Inflammatory Index scores. *Nutrition*, 130, 112608. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2024.112608>. EDN: <https://elibrary.ru/MIUZSY>
14. Chai, N., Zhang, H., Li, L., et al. (2019). Spermidine Prevents Heart Injury in Neonatal Rats Exposed to Intrauterine Hypoxia by Inhibiting Oxidative Stress and Mi-

- tochondrial Fragmentation. *Oxid. Med. Cell. Longev.*, 2019, 5406468. <https://doi.org/10.1155/2019/5406468>. EDN: <https://elibrary.ru/NPNUJX>
15. Clarkson, A. N., Liu, H., Pearson, L., Kapoor, M., Harrison, J. C., et al. (2004). Neuroprotective effects of spermine following hypoxic-ischemic-induced brain damage: a mechanistic study. *F.A.S.E.B. J.*, 18(10), 1114–1116. <https://doi.org/10.1096/fj.03-1203fje>.
 16. Despotovic, D., Longo, L. M., Aharon, E., Kahana, A., Scherf, T., et al. (2020). Polyamines mediate folding of primordial hyperacidic helical proteins. *Biochemistry*, 59(46), 4456–4462. <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.0c00800>. EDN: <https://elibrary.ru/AUSAXG>
 17. Dever, T. E., & Ivanov, I. P. (2018). Roles of polyamines in translation. *J. Biol. Chem.*, 293(48), 18719–18729. <https://doi.org/10.1074/jbc.TM118.003338>. EDN: <https://elibrary.ru/XBCYBL>
 18. Díaz-Osorio, Y., Gimeno-Agud, H., Mari-Vico, R., Illescas, S., Ramos, J. M., et al. (2025). Spermidine Recovers the Autophagy Defects Underlying the Pathophysiology of Cell Trafficking Disorders. *J. Inherit. Metab. Dis.*, 48(1), e12841. <https://doi.org/10.1002/jimd.12841>. EDN: <https://elibrary.ru/KCLFNr>
 19. Drolet, G., Dumbroff, E. B., Legge, R. L., & Thompson, J. E. (1986). Radical scavenging properties of polyamines. *Phytochemistry*, 25(2), 367–371. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)85482-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)85482-5).
 20. Duan, H., Yu, Q., Ni, Y., Li, J., Yu, L., et al. (2024). Synergistic anti-aging effect of *Dendrobium officinale* polysaccharide and spermidine: A metabolomics analysis focusing on the regulation of lipid, nucleotide and energy metabolism. *Int. J. Biol. Macromol.*, 278(4), 135098. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135098>. EDN: <https://elibrary.ru/LULEGG>
 21. Eisenberg, T., Abdellatif, M., Schroeder, S., Primesnig, U., Stekovic, S., et al. (2016). Cardioprotection and lifespan extension by the natural polyamine spermidine. *Nat. Med.*, 22(12), 1428–1438. <https://doi.org/10.1038/nm.4222>.
 22. Eisenberg, T., Knauer, H., Schauer, A., Buttner, S., Ruckenstein, C., et al. (2009). Induction of autophagy by spermidine promotes longevity. *Nat. Cell Biol.*, 11(11), 1305–1314. <https://doi.org/10.1038/ncb1975>.
 23. Furukawa, K., He, W., Bailey, C. A., Bazer, F. W., Toyomizu, M., & Wu, G. (2021). Polyamine synthesis from arginine and proline in tissues of developing chickens. *Amino Acids*, 53(11), 1739–1748. <https://doi.org/10.1007/s00726-021-03084-7>.
 24. Galasso, L., Cappella, A., Mulè, A., Castelli, L., Ciorciari, A., et al. (2023). Polyamines and Physical Activity in Musculoskeletal Diseases: A Potential Therapeutic Challenge. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(12), 9798. <https://doi.org/10.3390/ijms24129798>. EDN: <https://elibrary.ru/IPEEYF>

25. Gautam, P., Srivastava, V., Bammidi, S., Ghosh, S., Babu, V. S., & Banerjee, A. (2025). Putrescine modulates alternative splicing of gonadotropin hormone-releasing hormone (GnRH) through differential regulation of splicing factors. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 763, 151795. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2025.151795>.
26. Ha, H. C., Sirisoma, N. S., Kuppusamy, P., Zweier, J. L., Woster, P. M., & Caseiro, R. A., Jr. (1998). The natural polyamine spermine functions directly as a free radical scavenger. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95(19), 11140–11145. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.19.11140>.
27. Handa, A. K., Fatima, T., & Mattoo, A. K. (2018). Polyamines: Bio-Molecules with Diverse Functions in Plant and Human Health and Disease. *Frontiers in Chemistry*, 6, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00010>.
28. He, W., Li, P., & Wu, G. (2021). Amino acid nutrition and metabolism in chickens. *Adv. Exp. Med. Biol.*, 1285, 109–131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54462-1_7. EDN: <https://elibrary.ru/EIOPAD>
29. Ibarra, A. A., Wrobel, K., Escobosa, A. R., Elguera, J. C., Garay-Sevilla, M. E., et al. (2015). Determination of putrescine, cadaverine, spermidine and spermine in different chemical matrices by high performance liquid chromatography-electrospray ionization-ion trap tandem mass spectrometry (HPLC-ESI-ITMS/MS). *J. Chromatogr. B. Analyt. Technol. Biomed. Life Sci.*, 1002, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2015.08.036>.
30. Jaenne, J., Raina, A., & Siimes, M. (1964). Spermidine and spermine in rat tissues at different ages. *Acta Physiol. Scand.*, 62, 352–358. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1964.tb10433.x>.
31. Jaenne, J., Raina, A., & Siimes, M. (1964). Spermidine and spermine in rat tissues at different ages. *Acta Physiol. Scand.*, 62, 352–358. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1964.tb10433.x>.
32. Jeong, J. W., Cha, H. J., Han, M. H., Hwang, S. J., Lee, D. S., et al. (2018). Spermidine protects against oxidative stress in inflammation models using macrophages and zebrafish. *Biomol. Ther.*, 26, 146–156. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2016.272>. EDN: <https://elibrary.ru/YFXRJJ>
33. Jiang, D., Guo, Y., Niu, C., Long, S., & Jiang, Y. (2023). Exploration of the Antioxidant Effect of Spermidine on the Ovary and Screening and Identification of Differentially Expressed Proteins. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(6), 5793. <https://doi.org/10.3390/ijms24065793>. EDN: <https://elibrary.ru/WPPUKS>
34. Jiang, D., Weikang, L., Zhixin, Y., Yilong, J., Zelong, W., et al. (2024). High-performance liquid chromatography determination of polyamine contents in poultry based on precolumn benzoyl chloride derivatization. *Microchemical Journal*, 203, 110821. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110821>. EDN: <https://elibrary.ru/URKVXU>

35. Jimenez, G. E., Borbolla, F. V., Muñoz, L. G., et al. (2023). The Molecular Role of Polyamines in Age-Related Diseases: An Update. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(22), 16469. <https://doi.org/10.3390/ijms242216469>. EDN: <https://elibrary.ru/FDPQHO>
36. Jing, Y., Zhang, C. R., Li, Z. X., Gao, Y. H., Jiang, L., et al. (2025). Spermine alleviates myocardial cell aging by inhibiting mitochondrial oxidative stress damage. *Eur. J. Pharmacol.*, 997, 177477. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2025.177477>. EDN: <https://elibrary.ru/HKWZMM>
37. Kalac, P., & Krausová, P. (2005). A review of dietary polyamines: Formation, implications for growth and health and occurrence in foods. *Food Chemistry*, 90, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.044>. EDN: <https://elibrary.ru/MDYPDR>
38. Kiechl, S., Pechlaner, R., Willeit, P., Notdurfter, M., Paulweber, B., et al. (2018). Higher spermidine intake is linked to lower mortality: a prospective population-based study. *Am. J. Clin. Nutr.*, 108(2), 371–380. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqy102>.
39. Knut, A. E., Risøen, U., Rønning, H. F., & Reistad, R. (2002). Dietary polyamines. *Food Chem.*, 78, 273–280. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00405-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00405-8).
40. Kolesnikov, Y., Kretynin, S. V., Filepova, R., Dobrev, P. I., Martinec, J., et al. (2024). Polyamines metabolism and their biological role in plant cells: what do we really know? *Phytochemistry Reviews*, 23, 997–1026. <https://doi.org/10.1007/s11101-024-09913-3>. EDN: <https://elibrary.ru/JBWJVL>
41. Krausová, P., Kalač, P., Křížek, M., & Pelikánová, T. (2006). Content of biologically active polyamines in livers of cattle, pigs and chickens after animal slaughter. *Meat Sci.*, 73(4), 640–644. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.03.005>.
42. Li, Y., Cheng, A., & He, F. (2025). Metabolism of polyamine in vascular diseases: a prospective therapeutic target. *Bratisl. Med. J.*, 126, 845–863. <https://doi.org/10.1007/s44411-025-00147-z>. EDN: <https://elibrary.ru/MSJGOB>
43. Lovaas, E. (1997). Antioxidative and metal-chelating effects of polyamines. *Adv. Pharmacol.*, 38, 119–149. [https://doi.org/10.1016/s1054-3589\(08\)60982-5](https://doi.org/10.1016/s1054-3589(08)60982-5). EDN: <https://elibrary.ru/XYPYEL>
44. Luo, D., Lu, X., Li, H., Li, Y., Wang, Y., et al. (2024). The Spermine Oxidase/Spermine Axis Coordinates ATG5-Mediated Autophagy to Orchestrate Renal Senescence and Fibrosis. *Adv. Sci. (Weinh)*, 11(29), e2306912. <https://doi.org/10.1002/advs.202306912>. EDN: <https://elibrary.ru/WEMIXS>
45. Luo, D., Lu, X., Li, Y., Xu, Y., Zhou, Y., et al. (2023). Metabolism of polyamines and kidney disease: a promising therapeutic target. *Kidney Dis.*, 9(6), 469–484. <https://doi.org/10.1159/000533290>. EDN: <https://elibrary.ru/GRVJCN>
46. Mahalingam, S. S., & Pandiyan, P. (2024). Polyamines: Key Players in Immunometabolism and Immune Regulation. *J. Cell. Immunol.*, 6(5), 196–208. <https://doi.org/10.33696/immunology.6.206>. EDN: <https://elibrary.ru/ZCNLKN>

47. Makletsova, M. G., Fedorova, T. N., Maksimova, M. J., & Boldyrev, A. A. (2012). Effects of Carnosine on Polyamine Levels in Red Blood Cells of Patients with Hypertonic Discirculatory Encephalopathy. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 154(2), 210–212. <https://doi.org/10.1007/s10517-012-1914-2>. EDN: <https://elibrary.ru/RGFETX>
48. Minois, N., Carmona-Gutierrez, D., & Madeo, F. (2011). Polyamines in aging and disease. *Aging*, 3(8), 716–732. <https://doi.org/10.18632/aging.100361>. EDN: <https://elibrary.ru/RJYPKT>
49. Moreno Borralló, A., Jaramillo, S., Schaeffer-Reiss, C., Rey, B., Quintard, B., et al. (2024). Understanding glycaemia and glycation levels in birds: diet and life history traits associations. <https://doi.org/10.1101/2024.07.02.600014>.
50. Muñoz-Esparza, N. C., Costa-Catala, J., Comas-Basté, O., Toro-Funes, N., Latorre-Moratalla, M. L., et al. (2021). Occurrence of Polyamines in Foods and the Influence of Cooking Processes. *Foods*, 10(8), 1752. <https://doi.org/10.3390/foods10081752>. EDN: <https://elibrary.ru/OQXVUP>
51. Naoyoshi, N., Akihiro, Y., & Toshiko, A. (2007). Amounts of polyamines in foods in Japan and intake by Japanese. *Food Chemistry*, 100, 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.070>.
52. Ni, Y. Q., & Liu, Y. S. (2021). New insights into the roles and mechanisms of spermidine in aging and age-related diseases. *Aging Dis.*, 12(8), 1948–1963. <https://doi.org/10.14336/AD.2021.0603>. EDN: <https://elibrary.ru/TOGXOU>
53. Ou, Q., Tang, S., Zhu, J., Xue, S., Huang, H., et al. (2024). Spermidine ameliorates osteoarthritis via altering macrophage polarization. *Biochim. Biophys. Acta Mol. Basis Dis.*, 1870(4), 167083. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2024.167083>. EDN: <https://elibrary.ru/AARHWP>
54. Partridge, L., Fuentealba, M., & Kennedy, B. K. (2020). The quest to slow ageing through drug discovery. *Nat. Rev. Drug Discov.*, 19(8), 513–532. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-0067-7>. EDN: <https://elibrary.ru/XYPHPU>
55. Pegg, A. E. (2006). Regulation of ornithine decarboxylase. *J. Biol. Chem.*, 281(21), 14529–14532. <https://doi.org/10.1074/jbc.R500031200>.
56. Pegg, A. E. (2016). Functions of Polyamines in Mammals. *J. Biol. Chem.*, 291(29), 14904–14912. <https://doi.org/10.1074/jbc.R116.731661>.
57. Qi, Q., Hu, C., Zhang, H., Sun, R., Liu, Q., et al. (2023). Dietary supplementation with putrescine improves growth performance and meat quality of wenchang chickens. *Animals (Basel)*, 13(9), 1564. <https://doi.org/10.3390/ani13091564>. EDN: <https://elibrary.ru/RLDDGK>
58. Ren, J., & Zhang, Y. (2018). Targeting Autophagy in Aging and Aging-Related Cardiovascular Diseases. *Trends Pharmacol. Sci.*, 39(12), 1064–1076. <https://doi.org/10.1016/j.tips.2018.10.005>. EDN: <https://elibrary.ru/DHOGZJ>

-
59. Rossi, M. N., & Cervelli, M. (2024). Polyamine Metabolism and Functions: Key Roles in Cellular Health and Disease. *Biomolecules*, 14(12), 1570. <https://doi.org/10.3390/biom14121570>. EDN: <https://elibrary.ru/YQVNLD>
60. Schibalski, R. S., Shulha, A. S., Tsao, B. P., Palygin, O., & Ilatovskaya, D. V. (2024). The role of polyamine metabolism in cellular function and physiology. *Am. J. Physiol. Cell Physiol.*, 327(2), 341–356. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00074.2024>. EDN: <https://elibrary.ru/HGIBHB>
61. Schuber, F. (1989). Influence of polyamines on membrane functions. *Biochem. J.*, 260(1), 1–10. <https://doi.org/10.1042/bj2600001>.
62. Seiler, N., & Lamberty, U. (1975). Polyamines and nucleic acids in brains and hearts of newborn and adult autophagous and heterophagous vertebrates. *Comp. Biochem. Physiol. B*, 52(3), 419–425. [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(75\)90155-8](https://doi.org/10.1016/0305-0491(75)90155-8).
63. Seller, N. (2000). Oxidation of Polyamines and Brain Injury. *Neurochemical Research*, 25(4), 471–490. <https://doi.org/10.1023/A:1007508008731>. EDN: <https://elibrary.ru/AGKVHZ>
64. Singh, B. P., Saha, I., Nandi, I., & Swamy, M. J. (2017). Spermine and spermidine act as chemical chaperones and enhance chaperone-like and membranolytic activities of major bovine seminal plasma protein, PDC-109. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 493(4), 1418–1424. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.09.148>.
65. Sturman, J. A., & Gaull, G. E. (1975). Polyamine metabolism in the brain and liver of the developing monkey. *J. Neurochem.*, 25(3), 267–272. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.1975.tb06964.x>.
66. Sung, H. K., Jung, H. K., & Chan, S. S. (2021). Serum Spermidine as a Novel Potential Predictor for Fragility Fractures. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 106(2), e582–e591. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgaa745>. EDN: <https://elibrary.ru/THFJQJ>
67. Tkachenko, A. G., & Nesterova, L. Y. (2003). Polyamines as modulators of gene expression under oxidative stress in *Escherichia coli*. *Biochemistry*, 68(8), 850–856. PMID: 12948384. <https://doi.org/10.1023/a:1025790729797>. EDN: <https://elibrary.ru/LHSJLN>
68. Vivó, M., de Vera, N., Cortés, R., Mengod, G., Camón, L., et al. (2001). Polyamines in the basal ganglia of human brain. Influence of aging and degenerative movement disorders. *Neurosci. Lett.*, 304(1–2), 107–111. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(01\)01776-1](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(01)01776-1).
69. Vrijssen, S., Houdou, M., Cascalho, A., Eggermont, J., & Vangheluwe, P. (2023). Polyamines in Parkinson's Disease: Balancing Between Neurotoxicity and Neuroprotection. *Annu. Rev. Biochem.*, 92, 435–464. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-071322-021330>. EDN: <https://elibrary.ru/PGTGHU>

70. Wirth, A., Wolf, B., Huang, C. K., Glage, S., Hofer, S. J., et al. (2021). Novel aspects of age-protection by spermidine supplementation are associated with preserved telomere length. *GeroScience*, 43(2), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11357-020-00310-0>. EDN: <https://elibrary.ru/BLCCCC>
71. Wu, G., Bazer, F. W., Hu, J., Johnson, G. A., & Spencer, T. E. (2005). Polyamine synthesis from proline in the developing porcine placenta. *Biol. Reprod.*, 72(4), 842–850. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.104.036293>.
72. Wu, X., Cao, W., Jia, G., Zhao, H., Chen, X., et al. (2017). New insights into the role of spermine in enhancing the antioxidant capacity of rat spleen and liver under oxidative stress. *Anim. Nutr.*, 3(1), 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.11.005>. EDN: <https://elibrary.ru/SXUGAH>
73. Xu, T. T., Li, H., Dai, Z., Lau, G. K., Li, B. Y., et al. (2020). Spermidine and spermine delay brain aging by inducing autophagy in SAMP8 mice. *Aging (Albany NY)*, 12(7), 6401–6414. <https://doi.org/10.18632/aging.103035>. EDN: <https://elibrary.ru/LUPOIW>
74. Zhang, T., Fu, W., Zhang, H., Li, J., & Xing, B. (2024). Spermidine mediates acetylhypusination of RIPK1 to suppress diabetes onset and progression. *Nat. Cell Biol.*, 26(12), 2099–2114. <https://doi.org/10.1038/s41556-024-01540-6>. EDN: <https://elibrary.ru/QFQDHN>

References

1. Berezov, T. T., Makletsova, M. G., & Fedorova, T. N. (2012). Polyamines: Their role in normal conditions and in pathology of the central nervous system. *Annals of Clinical and Experimental Neurology*, 6(2), 38–42. EDN: <https://elibrary.ru/OZHGNJ>
2. Vasilieva, N. A. (2021). Pace-of-life syndrome (POLS): Evolution of the concept. *Zoological Journal*, 100(9), 969–983. <https://doi.org/10.31857/S0044513421090117>. EDN: <https://elibrary.ru/IXGKTP>
3. Korzun, I. A., Neborak, E. V., Syatkin, S. P., Sungrapova, K. Yu., Khilal, A., & Ibragimova, A. M. (2000). The role of polyamines in maintaining homeostasis of white adipose tissue. *Medical and Pharmaceutical Journal “Pulse”*, 22(1), 47–54. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-1-47-54>. EDN: <https://elibrary.ru/VXOQAP>
4. Makletsova, M. G., Kulikova, O. I., Svolinsky, S. L., & Fedorova, T. N. (2013). Polyamine content in the brain of 10-day-old and adult SAMP1 and SAMR1 mice characterized by different rates of aging. *Neurochemistry*, 30(3), 229–232. <https://doi.org/10.7868/S1027813313030096>. EDN: <https://elibrary.ru/QMGHIF>
5. Makletsova, M. G., Rikhireva, G. T., Kirichenko, E. Yu., Trinitatsky, I. Yu., Vaku-lenko, M. Yu., et al. (2022). The role of polyamines in the mechanisms of cog-

- nitive impairment. *Neurochemistry*, 39(3), 265–278. <https://doi.org/10.31857/S1027813322030050>. EDN: <https://elibrary.ru/IGICJR>
6. Travin, D. Yu., & Fenyuk, B. A. (2017). Aging of birds (mini-review). *Biochemistry*, 82(1), 35–42. EDN: <https://elibrary.ru/XWTTTH>
 7. Arthur, R., Jamwal, S., & Kumar, P. (2024). A review on polyamines as promising next-generation neuroprotective and anti-aging therapy. *European Journal of Pharmacology*, 978, 176804. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2024.176804>. EDN: <https://elibrary.ru/NUYIBG>
 8. Atiya Ali, M., Poortvliet, E., Strömberg, R., & Yngve, A. (2011). Polyamines in foods: Development of a food database. *Food Nutr. Res.*, 55, 5572. <https://doi.org/10.3402/fnr.v55i0.5572>.
 9. Bae, D. H., Lane, D. J. R., Jansson, P. J., & Richardson, D. R. (2018). The old and new biochemistry of polyamines. *Biochim. Biophys. Acta Gen. Subj.*, 1862(9), 2053–2068. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.06.004>. EDN: <https://elibrary.ru/VGHYPM>
 10. Ballas, S. K., Mohandas, N., Marton, L. J., & Shohet, S. B. (1983). Stabilization of erythrocyte membranes by polyamines. *P.N.A.S.*, 80(7), 1942–1946. <https://doi.org/10.1073/pnas.80.7.1942>.
 11. Bardócz, S., Duguid, T. J., Brown, D. S., Grant, G., Pusztai, A., et al. (1995). The importance of dietary polyamines in cell regeneration and growth. *Br. J. Nutr.*, 73(6), 819–828. <https://doi.org/10.1079/bjn19950087>.
 12. Brenner, S., Bercovich, Z., Feiler, Y., Keshet, R., & Kahana, C. (2015). Dual Regulatory Role of Polyamines in Adipogenesis. *J. Biol. Chem.*, 290(45), 27384–27392. <https://doi.org/10.1074/jbc.M115.686980>. EDN: <https://elibrary.ru/VFSOSD>
 13. Cantabrana, B., Peña-Iglesias, P., Castro-Estrada, P., Suárez, L., Bordiallo, J., et al. (2025). Dietary intake of polyamines in a Spanish adult population: Age-dependent correlation with Healthy Eating Index and Dietary Inflammatory Index scores. *Nutrition*, 130, 112608. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2024.112608>. EDN: <https://elibrary.ru/MIUZSY>
 14. Chai, N., Zhang, H., Li, L., et al. (2019). Spermidine Prevents Heart Injury in Neonatal Rats Exposed to Intrauterine Hypoxia by Inhibiting Oxidative Stress and Mitochondrial Fragmentation. *Oxid. Med. Cell. Longev.*, 2019, 5406468. <https://doi.org/10.1155/2019/5406468>. EDN: <https://elibrary.ru/NPNUJX>
 15. Clarkson, A. N., Liu, H., Pearson, L., Kapoor, M., Harrison, J. C., et al. (2004). Neuroprotective effects of spermine following hypoxic-ischemic-induced brain damage: a mechanistic study. *F.A.S.E.B. J.*, 18(10), 1114–1116. <https://doi.org/10.1096/fj.03-1203fje>.
 16. Despotovic, D., Longo, L. M., Aharon, E., Kahana, A., Scherf, T., et al. (2020). Polyamines mediate folding of primordial hyperacidic helical proteins. *Biochemis-*

- try, 59(46), 4456–4462. <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.0c00800>. EDN: <https://elibrary.ru/AUSAXG>
17. Dever, T. E., & Ivanov, I. P. (2018). Roles of polyamines in translation. *J. Biol. Chem.*, 293(48), 18719–18729. <https://doi.org/10.1074/jbc.TM118.003338>. EDN: <https://elibrary.ru/XBCYBL>
 18. Díaz-Osorio, Y., Gimeno-Agud, H., Mari-Vico, R., Illescas, S., Ramos, J. M., et al. (2025). Spermidine Recovers the Autophagy Defects Underlying the Pathophysiology of Cell Trafficking Disorders. *J. Inherit. Metab. Dis.*, 48(1), e12841. <https://doi.org/10.1002/jimd.12841>. EDN: <https://elibrary.ru/KCLFNR>
 19. Drolet, G., Dumbroff, E. B., Legge, R. L., & Thompson, J. E. (1986). Radical scavenging properties of polyamines. *Phytochemistry*, 25(2), 367–371. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)85482-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)85482-5).
 20. Duan, H., Yu, Q., Ni, Y., Li, J., Yu, L., et al. (2024). Synergistic anti-aging effect of Dendrobium officinale polysaccharide and spermidine: A metabolomics analysis focusing on the regulation of lipid, nucleotide and energy metabolism. *Int. J. Biol. Macromol.*, 278(4), 135098. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135098>. EDN: <https://elibrary.ru/LULEGG>
 21. Eisenberg, T., Abdellatif, M., Schroeder, S., Primesnig, U., Stekovic, S., et al. (2016). Cardioprotection and lifespan extension by the natural polyamine spermidine. *Nat. Med.*, 22(12), 1428–1438. <https://doi.org/10.1038/nm.4222>.
 22. Eisenberg, T., Knauer, H., Schauer, A., Buttner, S., Ruckstuhl, C., et al. (2009). Induction of autophagy by spermidine promotes longevity. *Nat. Cell Biol.*, 11(11), 1305–1314. <https://doi.org/10.1038/ncb1975>.
 23. Furukawa, K., He, W., Bailey, C. A., Bazer, F. W., Toyomizu, M., & Wu, G. (2021). Polyamine synthesis from arginine and proline in tissues of developing chickens. *Amino Acids*, 53(11), 1739–1748. <https://doi.org/10.1007/s00726-021-03084-7>.
 24. Galasso, L., Cappella, A., Mulè, A., Castelli, L., Ciorciari, A., et al. (2023). Polyamines and Physical Activity in Musculoskeletal Diseases: A Potential Therapeutic Challenge. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(12), 9798. <https://doi.org/10.3390/ijms24129798>. EDN: <https://elibrary.ru/IPEEYF>
 25. Gautam, P., Srivastava, V., Bammidi, S., Ghosh, S., Babu, V. S., & Banerjee, A. (2025). Putrescine modulates alternative splicing of gonadotropin hormone-releasing hormone (GnRH) through differential regulation of splicing factors. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 763, 151795. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2025.151795>.
 26. Ha, H. C., Sirisoma, N. S., Kuppusamy, P., Zweier, J. L., Woster, P. M., & Caseiro, R. A., Jr. (1998). The natural polyamine spermine functions directly as a free radical scavenger. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95(19), 11140–11145. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.19.11140>.

27. Handa, A. K., Fatima, T., & Mattoo, A. K. (2018). Polyamines: Bio-Molecules with Diverse Functions in Plant and Human Health and Disease. *Frontiers in Chemistry*, 6, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00010>.
28. He, W., Li, P., & Wu, G. (2021). Amino acid nutrition and metabolism in chickens. *Adv. Exp. Med. Biol.*, 1285, 109–131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54462-1_7. EDN: <https://elibrary.ru/EIOPAD>
29. Ibarra, A. A., Wrobel, K., Escobosa, A. R., Elguera, J. C., Garay-Sevilla, M. E., et al. (2015). Determination of putrescine, cadaverine, spermidine and spermine in different chemical matrices by high performance liquid chromatography-electrospray ionization-ion trap tandem mass spectrometry (HPLC-ESI-ITMS/MS). *J. Chromatogr. B. Analyt. Technol. Biomed. Life Sci.*, 1002, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2015.08.036>.
30. Jaenne, J., Raina, A., & Siimes, M. (1964). Spermidine and spermine in rat tissues at different ages. *Acta Physiol. Scand.*, 62, 352–358. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1964.tb10433.x>.
31. Jaenne, J., Raina, A., & Siimes, M. (1964). Spermidine and spermine in rat tissues at different ages. *Acta Physiol. Scand.*, 62, 352–358. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1964.tb10433.x>.
32. Jeong, J. W., Cha, H. J., Han, M. H., Hwang, S. J., Lee, D. S., et al. (2018). Spermidine protects against oxidative stress in inflammation models using macrophages and zebrafish. *Biomol. Ther.*, 26, 146–156. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2016.272>. EDN: <https://elibrary.ru/YFXRJJ>
33. Jiang, D., Guo, Y., Niu, C., Long, S., & Jiang, Y. (2023). Exploration of the Antioxidant Effect of Spermidine on the Ovary and Screening and Identification of Differentially Expressed Proteins. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(6), 5793. <https://doi.org/10.3390/ijms24065793>. EDN: <https://elibrary.ru/WPPUKS>
34. Jiang, D., Weikang, L., Zhixin, Y., Yilong, J., Zelong, W., et al. (2024). High-performance liquid chromatography determination of polyamine contents in poultry based on precolumn benzoyl chloride derivatization. *Microchemical Journal*, 203, 110821. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110821>. EDN: <https://elibrary.ru/URKVXU>
35. Jimenez, G. E., Borbolla, F. V., Muñoz, L. G., et al. (2023). The Molecular Role of Polyamines in Age-Related Diseases: An Update. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(22), 16469. <https://doi.org/10.3390/ijms242216469>. EDN: <https://elibrary.ru/FDPQHO>
36. Jing, Y., Zhang, C. R., Li, Z. X., Gao, Y. H., Jiang, L., et al. (2025). Spermine alleviates myocardial cell aging by inhibiting mitochondrial oxidative stress damage. *Eur. J. Pharmacol.*, 997, 177477. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2025.177477>. EDN: <https://elibrary.ru/HKWZMM>
37. Kalac, P., & Krausová, P. (2005). A review of dietary polyamines: Formation, implications for growth and health and occurrence in foods. *Food Chemistry*, 90, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.044>. EDN: <https://elibrary.ru/MDYPDR>

38. Kiechl, S., Pechlaner, R., Willeit, P., Notdurfter, M., Paulweber, B., et al. (2018). Higher spermidine intake is linked to lower mortality: a prospective population-based study. *Am. J. Clin. Nutr.*, 108(2), 371–380. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqy102>.
39. Knut, A. E., Risøen, U., Rønning, H. F., & Reistad, R. (2002). Dietary polyamines. *Food Chem.*, 78, 273–280. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00405-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00405-8).
40. Kolesnikov, Y., Kretynin, S. V., Filepova, R., Dobrev, P. I., Martinec, J., et al. (2024). Polyamines metabolism and their biological role in plant cells: what do we really know? *Phytochemistry Reviews*, 23, 997–1026. <https://doi.org/10.1007/s11101-024-09913-3>. EDN: <https://elibrary.ru/JBWJVL>
41. Krausová, P., Kalač, P., Křížek, M., & Pelikánová, T. (2006). Content of biologically active polyamines in livers of cattle, pigs and chickens after animal slaughter. *Meat Sci.*, 73(4), 640–644. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.03.005>.
42. Li, Y., Cheng, A., & He, F. (2025). Metabolism of polyamine in vascular diseases: a prospective therapeutic target. *Bratisl. Med. J.*, 126, 845–863. <https://doi.org/10.1007/s44411-025-00147-z>. EDN: <https://elibrary.ru/MSJGOB>
43. Lovaas, E. (1997). Antioxidative and metal-chelating effects of polyamines. *Adv. Pharmacol.*, 38, 119–149. [https://doi.org/10.1016/s1054-3589\(08\)60982-5](https://doi.org/10.1016/s1054-3589(08)60982-5). EDN: <https://elibrary.ru/XYPYEL>
44. Luo, D., Lu, X., Li, H., Li, Y., Wang, Y., et al. (2024). The Spermine Oxidase/Spermine Axis Coordinates ATG5-Mediated Autophagy to Orchestrate Renal Senescence and Fibrosis. *Adv. Sci. (Weinh)*, 11(29), e2306912. <https://doi.org/10.1002/adv.202306912>. EDN: <https://elibrary.ru/WEMIXS>
45. Luo, D., Lu, X., Li, Y., Xu, Y., Zhou, Y., et al. (2023). Metabolism of polyamines and kidney disease: a promising therapeutic target. *Kidney Dis.*, 9(6), 469–484. <https://doi.org/10.1159/000533290>. EDN: <https://elibrary.ru/GRVJCN>
46. Mahalingam, S. S., & Pandiyan, P. (2024). Polyamines: Key Players in Immunometabolism and Immune Regulation. *J. Cell. Immunol.*, 6(5), 196–208. <https://doi.org/10.33696/immunology.6.206>. EDN: <https://elibrary.ru/ZCNLKN>
47. Makletsova, M. G., Fedorova, T. N., Maksimova, M. J., & Boldyrev, A. A. (2012). Effects of Carnosine on Polyamine Levels in Red Blood Cells of Patients with Hypertonic Discirculatory Encephalopathy. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 154(2), 210–212. <https://doi.org/10.1007/s10517-012-1914-2>. EDN: <https://elibrary.ru/RGFETX>
48. Minois, N., Carmona-Gutierrez, D., & Madeo, F. (2011). Polyamines in aging and disease. *Aging*, 3(8), 716–732. <https://doi.org/10.18632/aging.100361>. EDN: <https://elibrary.ru/RJYPKT>
49. Moreno Borralló, A., Jaramillo, S., Schaeffer-Reiss, C., Rey, B., Quintard, B., et al. (2024). Understanding glycaemia and glycation levels in birds: diet and life history traits associations. <https://doi.org/10.1101/2024.07.02.600014>.

50. Muñoz-Esparza, N. C., Costa-Catala, J., Comas-Basté, O., Toro-Funes, N., Latorre-Moratalla, M. L., et al. (2021). Occurrence of Polyamines in Foods and the Influence of Cooking Processes. *Foods*, 10(8), 1752. <https://doi.org/10.3390/foods10081752>. EDN: <https://elibrary.ru/OQXVUP>
51. Naoyoshi, N., Akihiro, Y., & Toshiko, A. (2007). Amounts of polyamines in foods in Japan and intake by Japanese. *Food Chemistry*, 100, 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.070>.
52. Ni, Y. Q., & Liu, Y. S. (2021). New insights into the roles and mechanisms of spermidine in aging and age-related diseases. *Aging Dis.*, 12(8), 1948–1963. <https://doi.org/10.14336/AD.2021.0603>. EDN: <https://elibrary.ru/TOGXOU>
53. Ou, Q., Tang, S., Zhu, J., Xue, S., Huang, H., et al. (2024). Spermidine ameliorates osteoarthritis via altering macrophage polarization. *Biochim. Biophys. Acta Mol. Basis Dis.*, 1870(4), 167083. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2024.167083>. EDN: <https://elibrary.ru/AARHWP>
54. Partridge, L., Fuentealba, M., & Kennedy, B. K. (2020). The quest to slow ageing through drug discovery. *Nat. Rev. Drug Discov.*, 19(8), 513–532. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-0067-7>. EDN: <https://elibrary.ru/XYPHPU>
55. Pegg, A. E. (2006). Regulation of ornithine decarboxylase. *J. Biol. Chem.*, 281(21), 14529–14532. <https://doi.org/10.1074/jbc.R500031200>.
56. Pegg, A. E. (2016). Functions of Polyamines in Mammals. *J. Biol. Chem.*, 291(29), 14904–14912. <https://doi.org/10.1074/jbc.R116.731661>.
57. Qi, Q., Hu, C., Zhang, H., Sun, R., Liu, Q., et al. (2023). Dietary supplementation with putrescine improves growth performance and meat quality of wenchang chickens. *Animals (Basel)*, 13(9), 1564. <https://doi.org/10.3390/ani13091564>. EDN: <https://elibrary.ru/RLDDGK>
58. Ren, J., & Zhang, Y. (2018). Targeting Autophagy in Aging and Aging-Related Cardiovascular Diseases. *Trends Pharmacol. Sci.*, 39(12), 1064–1076. <https://doi.org/10.1016/j.tips.2018.10.005>. EDN: <https://elibrary.ru/DHOGZJ>
59. Rossi, M. N., & Cervelli, M. (2024). Polyamine Metabolism and Functions: Key Roles in Cellular Health and Disease. *Biomolecules*, 14(12), 1570. <https://doi.org/10.3390/biom14121570>. EDN: <https://elibrary.ru/YQVNLD>
60. Schibalski, R. S., Shulha, A. S., Tsao, B. P., Palygin, O., & Ilatovskaya, D. V. (2024). The role of polyamine metabolism in cellular function and physiology. *Am. J. Physiol. Cell Physiol.*, 327(2), 341–356. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00074.2024>. EDN: <https://elibrary.ru/HGIBHB>
61. Schuber, F. (1989). Influence of polyamines on membrane functions. *Biochem. J.*, 260(1), 1–10. <https://doi.org/10.1042/bj2600001>.
62. Seiler, N., & Lamberty, U. (1975). Polyamines and nucleic acids in brains and hearts of newborn and adult autophagous and heterophagous vertebrates. *Comp. Biochem. Physiol. B*, 52(3), 419–425. [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(75\)90155-8](https://doi.org/10.1016/0305-0491(75)90155-8).

63. Seller, N. (2000). Oxidation of Polyamines and Brain Injury. *Neurochemical Research*, 25(4), 471–490. <https://doi.org/10.1023/A:1007508008731>. EDN: <https://elibrary.ru/AGKVHZ>
64. Singh, B. P., Saha, I., Nandi, I., & Swamy, M. J. (2017). Spermine and spermidine act as chemical chaperones and enhance chaperone-like and membranolytic activities of major bovine seminal plasma protein, PDC-109. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 493(4), 1418–1424. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.09.148>.
65. Sturman, J. A., & Gaull, G. E. (1975). Polyamine metabolism in the brain and liver of the developing monkey. *J. Neurochem.*, 25(3), 267–272. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.1975.tb06964.x>.
66. Sung, H. K., Jung, H. K., & Chan, S. S. (2021). Serum Spermidine as a Novel Potential Predictor for Fragility Fractures. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 106(2), e582–e591. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgaa745>. EDN: <https://elibrary.ru/THFJQJ>
67. Tkachenko, A. G., & Nesterova, L. Y. (2003). Polyamines as modulators of gene expression under oxidative stress in Escherichia coli. *Biochemistry*, 68(8), 850–856. PMID: 12948384. <https://doi.org/10.1023/a:1025790729797>. EDN: <https://elibrary.ru/LHSJLN>
68. Vivó, M., de Vera, N., Cortés, R., Mengod, G., Camón, L., et al. (2001). Polyamines in the basal ganglia of human brain. Influence of aging and degenerative movement disorders. *Neurosci. Lett.*, 304(1–2), 107–111. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(01\)01776-1](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(01)01776-1).
69. Vrijsen, S., Houdou, M., Cascalho, A., Eggermont, J., & Vangheluwe, P. (2023). Polyamines in Parkinson's Disease: Balancing Between Neurotoxicity and Neuroprotection. *Annu. Rev. Biochem.*, 92, 435–464. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-071322-021330>. EDN: <https://elibrary.ru/PGTGHU>
70. Wirth, A., Wolf, B., Huang, C. K., Glage, S., Hofer, S. J., et al. (2021). Novel aspects of age-protection by spermidine supplementation are associated with preserved telomere length. *GeroScience*, 43(2), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11357-020-00310-0>. EDN: <https://elibrary.ru/BLCCCC>
71. Wu, G., Bazer, F. W., Hu, J., Johnson, G. A., & Spencer, T. E. (2005). Polyamine synthesis from proline in the developing porcine placenta. *Biol. Reprod.*, 72(4), 842–850. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.104.036293>.
72. Wu, X., Cao, W., Jia, G., Zhao, H., Chen, X., et al. (2017). New insights into the role of spermine in enhancing the antioxidant capacity of rat spleen and liver under oxidative stress. *Anim. Nutr.*, 3(1), 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.11.005>. EDN: <https://elibrary.ru/SXUGAH>
73. Xu, T. T., Li, H., Dai, Z., Lau, G. K., Li, B. Y., et al. (2020). Spermidine and spermine delay brain aging by inducing autophagy in SAMP8 mice. *Aging (Albany NY)*, 12(7), 6401–6414. <https://doi.org/10.18632/aging.103035>. EDN: <https://elibrary.ru/LUPOIW>

74. Zhang, T., Fu, W., Zhang, H., Li, J., & Xing, B. (2024). Spermidine mediates acetylhypusination of RIPK1 to suppress diabetes onset and progression. *Nat. Cell Biol.*, 26(12), 2099–2114. <https://doi.org/10.1038/s41556-024-01540-6>. EDN: <https://elibrary.ru/QFQDHN>

ВКЛАД АВТОРОВ

- Зеленкова Г.А.:** занималась концептуализацией исследования, обработкой данных и написанием текста; внесла существенный вклад в разработку гипотезы о ведущей роли полиаминов в долговечности птиц.
- Маклецова М.Г.:** участвовала в обработке данных, анализе результатов и подготовке рукописи; ее вклад включает обсуждение вопросов биологии и общей патологии, связанных с изучением полиаминов.
- Зеленков А.П.:** обеспечивал научную поддержку и экспертизу в изучении свойств полиаминов у домашних птиц; участвовал в формировании выводов и интерпретации данных.
- Устьянцев Д.А.:** оказывал помощь в обработке данных, проведении экспериментов и внесении предложений по улучшению структуры статьи.
- Кочеткова Н.А.:** координатор проекта, занималась подготовкой материалов и сбором необходимой информации; ее работа обеспечивала целостность и точность представленных данных.
- Плеханова Е.В.:** внесла вклад в химическое обоснование и интерпретацию результатов, касающихся химии полиаминов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

- Galina A. Zelenkova:** was responsible for conceptualizing the study, processing the data, and writing the manuscript; made a significant contribution to the development of the hypothesis regarding the key role of polyamines in avian longevity.
- Marina G. Makletsova:** participated in data processing, analysis of results, and preparation of the manuscript; her contributions include discussing issues in biology and general pathology related to the study of polyamines.
- Alexey P. Zelenkov:** provided scientific support and expertise in the study of polyamine properties in poultry; participated in drawing conclusions and interpreting data.
- Daniil A. Ustyantsev:** assisted with data processing, conducting experiments, and making suggestions for improving the structure of the article.
- Natalia A. Kochetkova:** project coordinator; she was responsible for preparing materials and gathering the necessary information; her work ensured the integrity and accuracy of the data presented.
- Elizabeth V. Plekhanova:** contributed to the chemical rationale and interpretation of the results concerning polyamine chemistry.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Устьянцев Даниил Алексеевич, аспирант кафедры «Биология и общая патология»

*Донской государственный технический университет
пл. Гагарина, г. Ростов-на-Дону, 1344003, Российская Федерация
ustyantsev.danil@yandex.ru*

Маклецова Марина Геннадьевна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры «Биология и общая патология»

*Донской государственный технический университет
пл. Гагарина, г. Ростов-на-Дону, 1344003, Российская Федерация
mgm52@bk.ru*

Зеленкова Галина Александровна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Биология и общая патология»

*Донской государственный технический университет
пл. Гагарина, г. Ростов-на-Дону, 1344003, Российская Федерация
galinazelenkova2025@gmail.com*

Кочеткова Наталья Алексеевна, младший научный сотрудник Управления научных исследований

*Донской государственный технический университет
пл. Гагарина, г. Ростов-на-Дону, 1344003, Российская Федерация
nkochetkova@donstu.ru*

Плеханова Елизавета Валерьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия»

*Донской государственный технический университет
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 1344003, Российская Федерация
plekhanjva.e@gs.donstu.ru*

Зеленков Алексей Петрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Биология и общая патология»

*Донской государственный технический университет
пл. Гагарина, г. Ростов-на-Дону, 1344003, Российская Федерация
zelenkovalex@rambler.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Daniil A. Ustyantsev, Postgraduate Student of the Department of Biology and General Pathology

Don State Technical University

*1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation
ustjantsev.danil@yandex.ru*

Marina G. Makletsova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biology and General Pathology
*Don State Technical University
1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation
mgm52@bk.ru*

Galina A. Zelenkova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Biology and General Pathology
*Don State Technical University
1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation
galinazelenkova2025@gmail.com*

Natalia A. Kochetkova, Junior Researcher at the Department of Scientific Research
*Don State Technical University
1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation
nkochetkova@donstu.ru
SPIN-code: 4049-3467
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6889-0650>
ResearcherID: OJU-1227-2025
Scopus Author ID: 58079668400
Academia.edu: <https://independent.academia.edu/NataliaKochetkova3>
ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Natalia-Kocetkova?ev=hdr_xprf*

Elizabeth V. Plekhanova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry
*Don State Technical University
1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation
plekhanjva.e@gs.donstu.ru*

Alexey P. Zelenkov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Biology and General Pathology
*Don State Technical University
1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation
zelenkovalex@rambler.ru*

Поступила 20.12.2025

После рецензирования 21.01.2026

Принята 24.01.2026

Received 20.12.2025

Revised 21.01.2026

Accepted 24.01.2026

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1438](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1438)

EDN: [DYRBVT](#)

UDC 338.43:633.85:502



The interplay between technology, institutions, and culture: Pathways to sustainable palm oil practices in Indonesia

A. Kurnia¹, A. Nugroho², A. Anhar³, A.H. Hamid⁴

^{1,3,4}*Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia*

²*Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia*

Abstract

Background. Indonesia's palm oil industry plays an important role in the economy but faces sustainability challenges, with smallholders struggling to meet ISPO certification requirements.

Purpose. This study aims to analyze the factors influencing farmers' readiness to implement Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO).

Materials and methods. The factors influencing the level of farmers' readiness to implement ISPO are analyzed using the Structural Equation Modeling-Partial Least Square (SEM-PLS) method by testing the effect of exogenous latent variables (X) on endogenous latent variables (Y).

Results. The results show that farmers' readiness to implement ISPO is directly and significantly influenced by the perception of technology, institutional support, community culture, and access to information technology. The most significant influence is exerted by community culture, followed by access to information, then institutional support, and the smallest influence is exerted by the perception of technology.

Keywords: Palm oil; ISPO; sustainability; SEM PLS; Smallholder

For citation. Kurnia, A., Nugroho, A., Anhar, A., & Hamid, A. H. (2026). The interplay between technology, institutions, and culture: Pathways to sustainable palm oil practices in Indonesia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 300–319. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1438>

Introduction

Indonesia is one of the largest palm oil-producing countries in the world. Palm oil is a strategic commodity that contributes significantly to the national

economy, both through exports and the provision of employment [1]. However, despite its economic potential, the palm oil industry often receives negative attention related to environmental and social issues, such as deforestation, environmental damage, and labor rights violations [2].

In an effort to address these sustainability challenges, the Indonesian government has developed the Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) certification system with a sustainability scheme that is mandatory for all palm oil plantation business actors, including smallholders [3]. ISPO aims to increase the competitiveness of Indonesian palm oil in the international market while encouraging palm oil plantation management practices that are more environmentally friendly, socially responsible, and in accordance with applicable regulations.

However, the implementation of ISPO at the smallholder level still faces various obstacles. Based on several studies, smallholders often have a low level of readiness to meet ISPO standards. This is due to various factors, such as farmers' limited knowledge and understanding of ISPO, access to funding, institutional support, land legality issues, and socio-cultural factors that influence the adoption of sustainable practices [4; 5].

The research also shows that smallholders' readiness to implement ISPO varies greatly depending on the region. As in Muara Kaman Ulu Village and Jonggon Village in Kutai Kartanegara District, East Kalimantan, smallholders face different levels of readiness and challenges. Farmers in Muara Kaman Ulu village who are involved in the inti-plasma scheme have a higher readiness index score compared to independent farmers in Jonggon village. Factors such as land legality and social structure also differ between the two villages, affecting their readiness to meet ISPO standards [6]. Therefore, it is important to identify factors that contribute to the level of readiness of farmers in ISPO implementation so that targeted interventions can be designed.

The Structural Equation Modeling-Partial Least Square (SEM-PLS) method is a relevant approach to analyzing the complex relationships among various factors that influence farmer readiness. SEM-PLS enables comprehensive analysis of latent variables that are difficult to measure directly, such as farmer attitudes, risk perceptions, and institutional support [7]. With this approach, the research is expected to provide a more in-depth picture of the farmer readiness model in ISPO implementation and the most influential factors.

This study aims to develop a strategy for smallholder readiness in ISPO implementation by identifying and analyzing the factors that influence it. Thus, the results of this study are expected to be the basis for policy makers, supporting

institutions, and stakeholders related to the preparation of strategies to improve the readiness and participation of oil palm smallholders in the ISPO scheme.

Materials and methods

The Structural Equation Modelling - Partial Least Squares (SEM-PLS) approach is one of the best methods for predicting results, especially in terms of forecasting and evaluating explanatory variables by considering the most potential variance. This method is widely used to analyze the relationship between variables in data analysis [8]. One of the advantages of SEM-PLS is its ability to produce better findings than other methods despite using a smaller sample size. SEM-PLS is also often applied to analyze complex path models [9]. The main attraction of this approach in management science is its various prospective benefits, including flexibility and efficiency [10]. The SEM-PLS approach allows for handling non-linear interactions in the model by using a two-stage analysis. In addition, PLS-based path modeling techniques have proven to be accurate and reliable in providing a precise assessment of structure. Before developing an internal model or evaluating the relationship between latent components, the convergent validity of the structural model must be evaluated to ensure a valid and consistent interpretation. With these characteristics, SEM-PLS is one of the effective approaches to analyzing complex data.

In this study, the SEM-PLS method was used to analyze the factors that influence the level of readiness of farmers in implementing ISPO by testing the effect of exogenous latent variables (X) on endogenous latent variables (Y). This analysis involves several exogenous latent variables, namely farmer characteristics (X1), perception of technology (X2), institutional support (X3), community culture (X4), and access to technological information (X5), with the endogenous latent variable being farmer readiness (Y1).

Path analysis was conducted using PLS to test the variables that influence the level of readiness of farmers in ISPO implementation. The first stage of the first-order analysis was carried out with Confirmatory Factor Analysis (CFA). The results of the measurement model of the PLS logarithm analysis can be seen in Figure 1, then excluded indicators that have a low loading factor value. The sub-variables are removed one by one based on the smallest loading factor value until the measurement model (outer model) is finally found. Indicators with low loading factors indicate poor convergent reliability, which in turn affects construct validity. Convergent reliability is measured using the loading factor value and composite reliability, so a low value indicates that the indicator is not strong enough to reflect the latent variable [11]. A feasible model has sub-variables with a loading factor value greater than 0.6 [7].

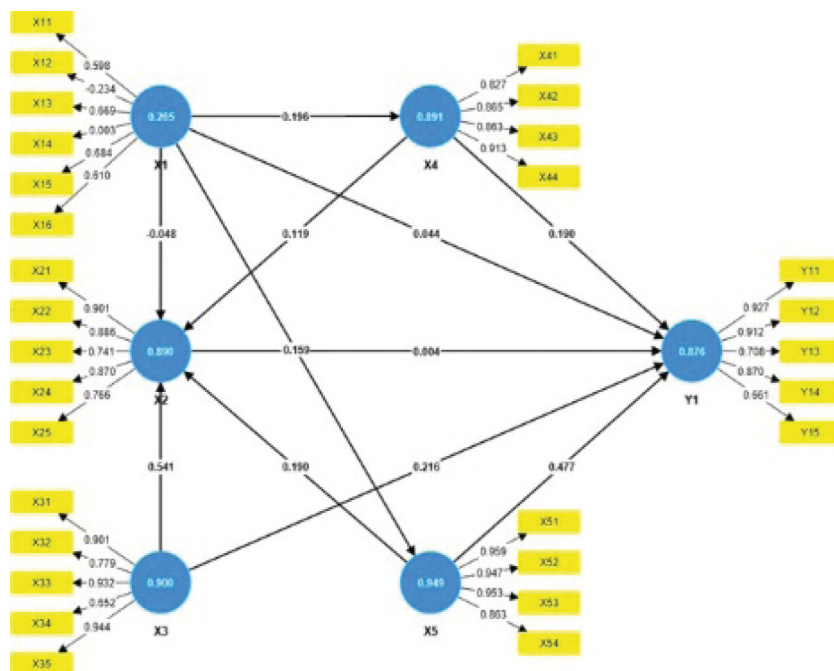


Fig. 1. Initial measurement model of farmer readiness for ISPO implementation

Therefore, at the initial stage of the measurement model analysis, indicators with loading factor values below 0.6, such as age, experience, and number of dependents, were excluded because they were not able to reflect the latent variables well [12].

Results and discussion

The Evaluation of Factors Affecting Farmers's Readiness to Implement the Indonesian Sustainable Palm Oil (Isipo) Certification

A Partial Least Square (PLS) analysis was conducted to test the variables affecting farmers' readiness for the implementation of ISPO. In the initial stage, the measurement model was generated from the PLS logarithm analysis (Figure 1); it was found that the results of the PLS algorithm iteration on the initial measurement model did not meet the Goodness of Fit (GoF) value standards, and therefore, the farmer characteristic variables with indicators that had the smallest loading factor value had to be removed from the model [13].

The characteristics eliminated included age (X1.1), experience (X1.2), and number of dependents (X1.4). The Goodness of Fit criteria presented in Table 1 indicate the minimum requirements that must be satisfied for the model to be declared fit for use. After the farmer characteristics variable (X1) was excluded, the test results indicated that the GoF level aligned with the standard. Consequently, it can be concluded that the model is suitable for use [14]. Following the elimination of the respondent characteristics variable (X1), it was also deemed necessary to eliminate the institutional support variable (X3), specifically the marketing institution indicator (X3.4), as well as the ISPO certificate readiness level variable (Y5), represented by the indicator for sustainable farming improvement (Y1.5). Both eliminated indicators exhibited red construct values despite being above 0.7. This elimination was undertaken to enhance the model's fit value and improve the constructed value of indicators within other variables [11].

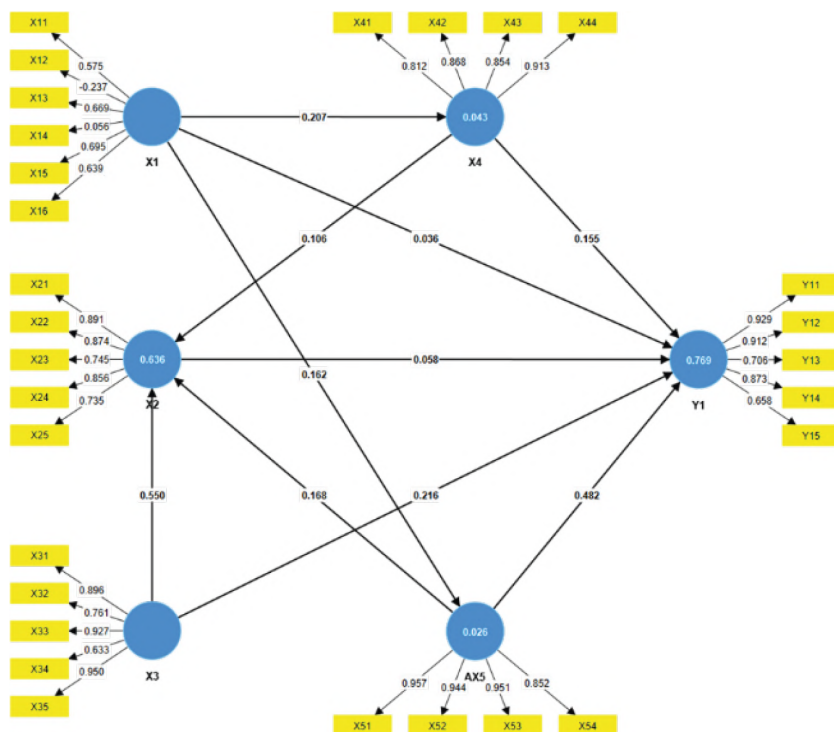


Fig. 2. Output of SEM-PLS analysis

Based on Figure 2, it is observed that the sub-variables included in farmer characteristics (X1) comprise age, education level, farming experience, land area, and total family income. From the data, the value of age (X1.1) is identified as 0.575; the level of education (X1.2) is -0.237; farming experience (X1.3) is 0.669; land area (X1.4) is 0.056; total family income (X1.5) is 0.695; and total income (X1.6) is 0.639. After the variables were eliminated, the test results indicated that the level of fit conformed to the standard. Therefore, it can be concluded that the model is appropriate for use. The criteria for model fit (Goodness of Fit) in Table 1 indicate the minimum requirements that must be satisfied for the constructed model to be considered suitable for use.

Table 1.

Goodness of Fit (GoF) test results on the model

No	GoF Measurements	Model Saturated	Model Estimation	Fit Level
1	SRMR	0,099	0,099	Good Fit
2	d_ ULS	2,688	2,688	Good Fit
3	d_ G	5,003	5,003	Good Fit
4	Chi-square	7266,217	7266,217	Good Fit
5	NFI	0,564	0,564	Good Fit

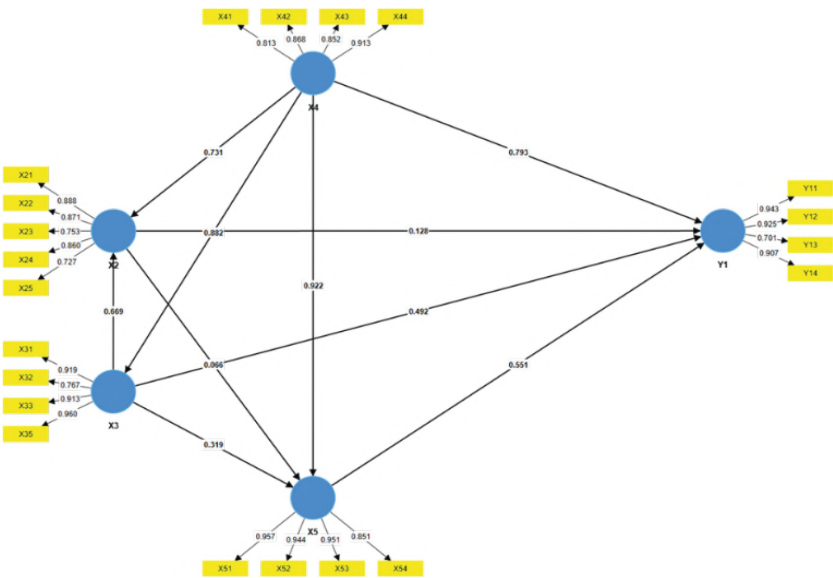


Fig. 3. Measurement Model (outer model)

Evaluation of Measurement Model (Outer Model)

The measurement model or Outer Model is evaluated to analyze the relationship between variables and their indicators. The evaluation conducted for the measurement model includes convergent validity (assessed based on the loading factor of each variable), discriminant validity, and composite reliability or Cronbach's Alpha output. Reliability and validity are used to assess the measurement model. Cronbach's Alpha is utilized to perform the reliability test.

Convergent Validity

The convergent validity of the measurement model using reflective indicators is evaluated based on the loading factor of the indicators that measure the construct. A minimum threshold of 0.5 is established for the loading factor. If the loading factor value exceeds 0.5, the construct validity is considered to be fulfilled. However, if the loading factor value is below 0.5, the construct is required to be excluded from the analysis [13]. The assessment of convergent validity using reflective indicators is conducted by analyzing the loading factor values of the indicators associated with the construct. Constructs with a loading factor above 0.5 are deemed to meet validity criteria, while constructs with a loading factor below 0.5 are removed from further analysis.

Table 2.

Loading Factor				
Variable	Indicator	Loading Factor	Re-estimation	Description
Perception of Technology (X2)	X2.1	0,891	0,888	Valid
	X2.2	0,874	0,871	Valid
	X2.3	0,745	0,753	Valid
	X2.4	0,856	0,860	Valid
	X2.5	0,735	0,727	Valid
Institutional Support (X3)	X3.1	0,896	0,919	Valid
	X3.2	0,761	0,767	Valid
	X3.3	0,927	0,913	Valid
	X3.5	0,950	0,960	Valid
Community Culture (X4)	X4.1	0,812	0,813	Valid
	X4.2	0,868	0,868	Valid
	X4.3	0,854	0,852	Valid
	X4.4	0,913	0,913	Valid

Variable	Indicator	Loading Factor	Re-estimation	Description
Information Technology Access (X5)	X5.1	0,957	0,957	Valid
	X5.2	0,944	0,944	Valid
	X5.3	0,951	0,951	Valid
	X5.4	0,852	0,851	Valid
ISPO Certification Readiness Level (Y1)	Y1.1	0,929	0,943	Valid
	Y1.2	0,912	0,925	Valid
	Y1.3	0,706	0,701	Valid
	Y1.4	0,873	0,907	Valid

Source: Processed primary data (2024)

Based on Table 2, no indicators were found to have a score of <0.5, as the indicators that did not meet the criteria had been eliminated. After the elimination of these indicators, re-estimation was conducted to ensure that all loading factor values exceeded 0.5 and were declared valid, meeting the required criteria. Following the determination of loading factor values for each research variable, the indicators that met the criteria were tested for validity and reliability to establish their connection to the latent variables in this study.

Composite Reliability and Cronbach’s Alpha

In addition to the construct validity test, a construct reliability test was performed, which was measured using composite reliability and Cronbach’s Alpha. The results of the composite reliability and Cronbach’s Alpha tests were generated using Smart PLS. A construct is considered to be reliable if the Average Variance Extracted (AVE) value exceeds 0.5, the composite reliability exceeds 0.7, and Cronbach’s Alpha exceeds the recommended threshold of 0.6 [15].

Table 3.

Reliability Test			
Variable	Cronbach’s Alpha	Composite Reliability	Average Variance Extracted (AVE)
Perception of Technology (X2)	0,879	0,912	0,677
Institutional Support (X3)	0,913	0,940	0,797
Community Culture (X4)	0,886	0,921	0,744
Information Technology Access (X5)	0,945	0,961	0,859
ISPO Certification Readiness Level (Y1)	0,894	0,928	0,764

Source: Processed primary data (2024)

Based on Table 3, the construct is considered reliable as it demonstrates a composite reliability value exceeding 0.70 and a Cronbach’s Alpha value exceeding 0.60. From the Smart PLS output, all constructs are shown to have composite reliability values above 0.70 and Cronbach’s Alpha values above 0.60. Therefore, it can be concluded that the constructs are reliable. Additionally, each variable is shown to have an Average Variance Extracted (AVE) value greater than 0.5. Consequently, all variables in this study are deemed valid and reliable, fulfilling the required reliability criteria [11].

Discriminant Validity

The discriminant validity test is conducted using two methods, namely cross-loading and the Fornell-Larcker criteria, to determine whether each indicator and variable exclusively measures its own variable or potentially measures other variables as well. In this study, the discriminant validity test is performed using the Fornell-Larcker criteria, as presented in Table 4.

Table 4.

Furnell-Lacker Criteria						
Variable	X2	X3	X4	X5	Y1	Description
X2	0,823					Valid
X3	0,793	0,893				Valid
X4	0,731	0,882	0,863			Valid
X5	0,746	0,884	0,922	0,927		Valid
Y1	0,700	0,809	0,793	0,839	0,874	Valid

Source: Processed primary data (2024)

According to the Furnell-Lacker criteria presented in Table 4, it is required that the square root value of the Average Variance Extracted (AVE) for each construct be greater than the correlation value between constructs in the model. This implies that the relationship between variables and other variables is considered more dominant than the size of the latent variable itself. The superiority of the latent construct in that block compared to other blocks is indicated. It can be concluded from this that the latent variable is well explained by the research instrument (valid).

Structural Model Testing (Inner Model)

The structural model in SEM-PLS is evaluated through the R2 of the dependent variable and the path coefficient values for the independent variables.

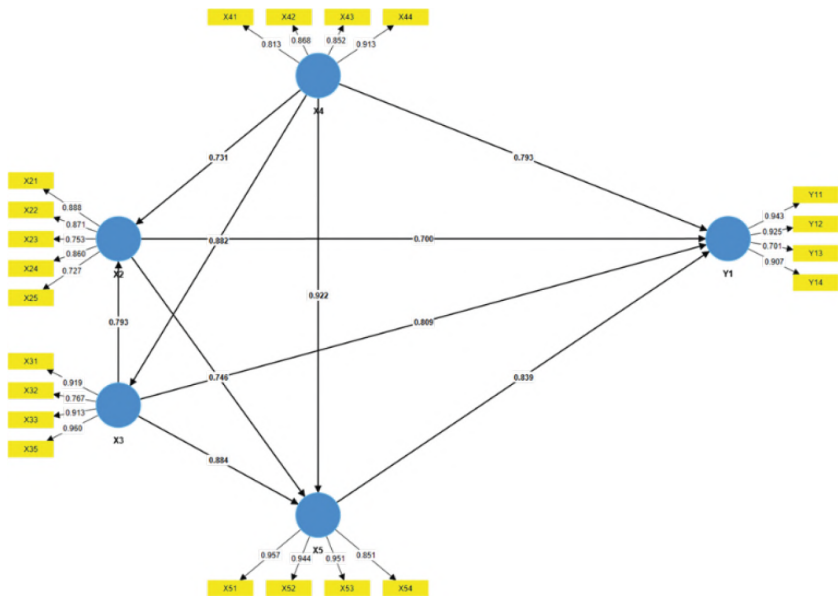


Fig. 4. Structural Model (inner model)

Variant Analysis (R-Square) or Determination Test

R^2 can be used to assess whether the effect of the independent latent variable on the dependent latent variable is substantive. The criteria for limiting the R^2 value are classified into three categories: 0.67, 0.33, and 0.19, with each classification indicating that the model is considered “good,” “moderate,” and “weak,” respectively [11].

Table 5.

R-Square Value (R^2)		
Variable	R-square	R-square Adjusted
ISPO Certification Readiness Level (Y1)	0,728	0,725

Source: Processed primary data (2024)

Based on the R^2 value in Table 5, it can be observed that the value of the ISPO Certification Readiness Level (Y1) construct is 0.728. This indicates that the Perception of Technology, Institutional Support, Community Culture, and access to information are able to explain 72.8% of the ISPO Certification Read-

iness Level construct variable, with the remaining 27.2% being explained by other variables outside the scope of this study. Other factors outside this study, such as government policies, socio-economic conditions, local political conditions, and regional geopolitics, could contribute to this. Therefore, it can be concluded that the Perception of Technology, Institutional Support, Community Culture, and access to information have a very strong influence on the ISPO Certification Readiness Level.

Path Coefficient Analysis Results

Path coefficient analysis is conducted to determine whether the hypothesis proposed in the study is accepted. Hypothesis testing is performed using the Bootstrapping function in SmartPLS 4.0. The hypothesis is accepted when the significance level of the P-value is <0.05 [16]. The table and final path diagram of the Path coefficient test results in this study are presented below. An equation is also formulated based on the model structure drawing, with the model structure being shown in Figure 4.

Table 6.

Path Coefficient Analysis Results

Variable	Original Sample (O)	Sample Mean (M)	Standard Deviation (STDEV)	T Statistic (O/STDEV)	P-Value
Perception of Technology (X2) -> ISPO Certification Readiness Level (Y1)	0,128	0,129	0,043	2,984	0,003
Institutional Support (X3) -> ISPO Certification Readiness Level (Y1)	0,492	0,493	0,053	9,222	0,000
Community Culture (X4) -> ISPO Certification Readiness Level (Y1)	0,793	0,794	0,018	43,338	0,000
Akses Terhadap Informasi (X5) -> ISPO Certification Readiness Level (Y1)	0,551	0,551	0,074	7,430	0,000

Source: Processed primary data (2024)

Based on the structural model formed, the structural equation of the factors affecting the level of readiness of farmers in the implementation of ISPO is presented as follows:

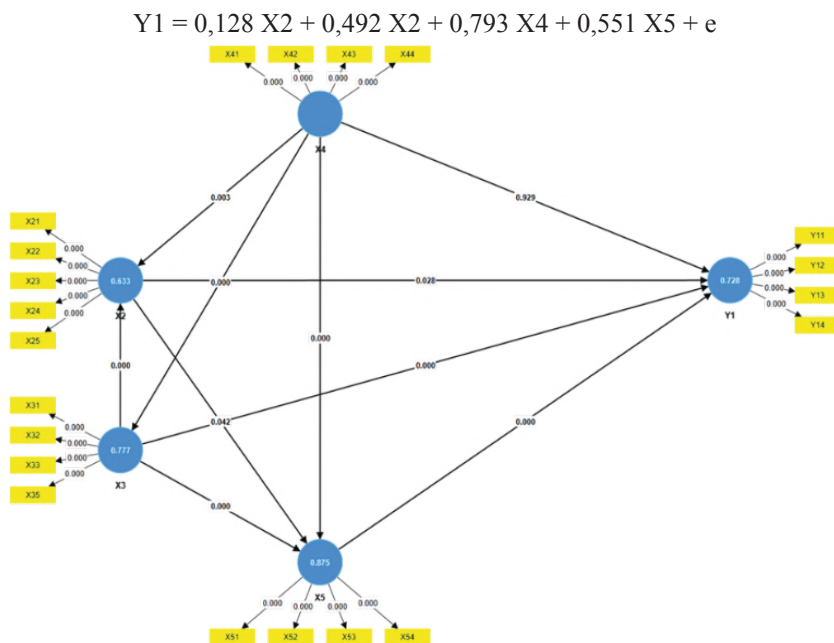


Fig. 5. PLS Bootstrapping

Variables that directly and significantly influence the readiness of farmers to implement ISPO include Perception of Technology, Institutional Support, Community Culture, and access to information technology. The R square value of 0.728 indicates that the factors tested in this study are able to explain 72.8% of the level of readiness of farmers, while the remaining 27.2% is explained by other factors outside the model.

Based on the results of statistical testing, the hypothesis is accepted if the significance value (sig) is <0.05 . Conversely, if the sig value is >0.05 , the hypothesis is rejected. An explanation of the influence of each variable is provided:

a. The coefficient value of Perception of Technology (X2) on ISPO Certification Readiness Level (Y1) is 0.128, indicating that a one percent increase in Perception of Technology results in a 12.8% increase in ISPO Certification Readiness Level. This influence is considered positive and significant, as the p-value is <0.05 .

b. The coefficient value of Institutional Support (X3) on the ISPO Certification Readiness Level is 0.492, indicating that a one percent increase in Institutional

Support results in a 49.2% increase in the ISPO Certification Readiness Level. This influence is considered positive and significant, as the p-value is <0.05 .

c. The coefficient value of Community Culture (X4) on the ISPO Certification Readiness Level is 0.793, indicating that a one percent increase in Community Culture results in a 79.3% increase in the ISPO Certification Readiness Level. This influence is considered positive and significant, as the p-value is <0.05 .

The coefficient value of Information Technology Access (X5) on the ISPO Certification Readiness Level is 0.551, indicating that a one percent increase in Information Technology Access results in a 55.1% increase in the ISPO Certification Readiness Level. This influence is considered positive and significant, as the p-value is <0.05 .

Discussion

It is revealed in this study that four main factors influence the readiness of farmers to implement ISPO certification: Perception of Technology, Institutional Support, Community Culture, and Information Technology Access. The importance of synergy between institutional, social, and technological aspects in facilitating the adoption of sustainability standards in the oil palm plantation sector, such as ISPO certification, is emphasized by these findings [17-19].

It is found that Perception of Technology contributes the least significantly to the readiness of farmers compared to other variables, with a coefficient of 0.128. This result is observed from the acquisition of a path coefficient value of 0.128, indicating that a 1% increase in the perception of technology among oil palm farmers results in a 12.8% increase in the ISPO Certification Readiness Level. This effect is also significant, although considered small, as it still meets the statistical requirements with a t-statistic of 2.984 and a p-value of 0.003. The Perception of Technology (X2) indicator consists of relative advantage (X2.1), compatibility (X2.2), triability (X2.3), complexity (X2.4), and observability (X2.5). All indicators in this variable are found to have values that pass the model evaluation test. The inner path analysis model shows that Perception of Technology (X2) has a significant effect on ISPO Certification Readiness Level (Y1). The perception of technology is recognized as playing a very important role in increasing the readiness for ISPO certification among oil palm farmers in the Aceh Tamiang district. Perception of Technology (X2) is still found to have a good loading factor value after re-estimation, above 0.7. Relative advantage is identified as the indicator with the highest coefficient of influence, with a value of 0.888. This indicates that oil palm farmers, whether ISPO farmers, PSR farmers, or independent farmers, who perceive significant benefits from adopting technology to meet ISPO standards are more likely to be ready and

encouraged to implement the technology. This aligns with Pasimura's research titled "Impact of Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) Certification on the Environmental Behavior of Palm Oil Plantation Companies," which states that positive perceptions of technology facilitate the adoption of innovations that support environmental sustainability, with adaptation to new technology being an indicator of the successful implementation of ISPO [20]. Farmers' technological understanding and literacy are also found to contribute to their ability to fulfil certification requirements, such as document management and good agricultural practices (efficient irrigation or soil conservation methods).

Institutional Support has been proven to significantly contribute to the readiness of farmers, with a coefficient of 0.492. This indicates that every 1% increase in Institutional Support results in a 49.2% increase in readiness. This influence is positive and significant, with a t-statistic value of 9.222 and a p-value of 0.000. The significance demonstrates that institutional support plays an important role in ISPO certification readiness for farmers in the Aceh Tamiang district. Institutional Support (X3) is used as one of the indicators to measure the ISPO Certification Readiness Level (Y1) of oil palm farmers, including ISPO-certified oil palm farmers, independent farmers, and PSR farmers in the Aceh Tamiang district. In this study, Institutional Support (X3) consists of indicators of farmer group support (X3.1), government support (X3.2), company support (X3.3), marketing institution support (X3.4), and development partner institution support (X3.5). The marketing institution support indicator (X3.4) was the only one not passing the model evaluation test, as its value was found to be below 0.7, specifically 0.633. The effect of this indicator on the connected variables was also found to be low (red) during the analysis test. Consequently, the marketing institution support indicator (X3.4) was eliminated from the model to prevent distortion in the model estimation, which could reduce the overall quality and suitability of the model.

The elimination of invalid or low-loading indicators is an important step in improving model performance, enhancing internal consistency, and increasing model validity. This improvement is reflected in the increase in Goodness of Fit (GoF) values or other statistical indicators, such as Average Variance Extracted (AVE) and Composite Reliability. These findings align with Pasimura's research on the "Impact of Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) Certification on the Environmental Behaviour of Palm Oil Plantation Companies," where institutions are shown to play a crucial role in the implementation of ISPO certification by influencing various aspects related to sustainability and environmental management practices in the oil palm plantation sector [20]. Pasimura emphasized that institutions significantly impact the implementation of ISPO certification through regulations, stakeholder

support, education, and monitoring and evaluation processes. Strengthening these institutional aspects is expected to increase the adoption of sustainability standards in the oil palm plantation sector, providing benefits to both the environment and society. Institutional support is also critical in helping farmers adopt technology [19], directly contributing to their readiness to implement ISPO certification by assisting them in accessing relevant technologies and training [18]. Research by Rahutomo on “Smallholders’ Land Productivity Improvement through Sustainable Palm Oil Certification in Indonesia” further emphasizes the importance of structured mentoring to improve smallholders’ understanding of ISPO and RSPO standards as a first step towards sustainable practices [21]. Additionally, palm oil companies are identified as playing a key role in providing material support, such as subsidized seeds and access to modern technology.

Community Culture is found to make the most significant contribution to the level of readiness of farmers, with a coefficient of 0.793. This indicates that every 1% increase in Community Culture (X4) results in a 79.3% increase in the ISPO Certification Readiness Level (Y1). The value of 79.3% is considered large, demonstrating that Community Culture (X4) has a very significant influence on the ISPO Certification Readiness Level (Y1) in Aceh Tamiang District. The influence of Community Culture is positive, with a t-statistic value of 43.338 and a p-value of 0.000. This value indicates a very strong and significant relationship between the Community Culture variable (X4) and the ISPO Certification Readiness Level (Y1), suggesting that the measured effect has near absolute certainty. The effect of Community Culture (X4) is assessed as one of the variables measuring the ISPO Certification Readiness Level (Y1) using four main indicators: social interaction (X4.1), social support (X4.2), problem-solving mechanisms (X4.3), and informal leadership (X4.4). The inner path analysis model confirms that Community Culture (X4) has a significant effect on the ISPO Certification Readiness Level (Y1).

This finding suggests that communities characterized by a collective culture and strong social interaction are more likely to adopt sustainability practices [18]. These findings are aligned with Denahusya’s research on “Overcoming Barriers to ISPO Certification: Analysing the Drivers of Sustainable Agricultural Adoption among Farmers,” which highlights the importance of considering local farmers’ beliefs, traditions, and social norms when promoting sustainable practices [18]. Local community support is identified as playing a crucial role in assisting farmers in implementing ISPO standards. A positive community culture is shown to facilitate the adoption of innovations, emphasizing the need to recognize and respect farmers’ cultural and social values while aligning them with sustainable practices in accordance with local beliefs, traditions, and social norms[22]. Increased adoption

of ISPO by farmers is also suggested to be achievable through effective communication by government policymakers and stakeholders. Such communication should align sustainability practices with the norms and values held by farmers [23; 24].

Information Technology Access is found to have the most dominant influence, with a coefficient of 0.551. This indicates that every 1% increase in Information Technology Access (X5) results in a 55.1% increase in the ISPO Certification Readiness Level (Y1). This effect is identified as positive, with a t-statistic value of 7.430 and a p-value of 0.000, signifying the crucial role played by Information Technology Access in influencing the ISPO Certification Readiness Level (Y1) for farmers. The influence of Information Technology Access (X5) on the ISPO Certification Readiness Level (Y1) is measured using indicators such as the intensity of media use (X5.1), the variety of types of information (X5.2), the diversity of information sources (X5.3), and the level of information utilization (X5.4). All indicators of Information Technology Access (X5) are found to impact the ISPO Certification Readiness Level (Y1). The coefficient values for these indicators are as follows: media use (X5.1) at 0.957, types of information (X5.2) at 0.944, information sources (X5.3) at 0.951, and information utilization at 0.852. The ability of farmers to access information through internet-based media is recognized as a key factor supporting their high access to information. Enhanced information access allows farmers to quickly understand the ISPO standards, facilitating a deeper comprehension of the required technology and its adoption to meet ISPO criteria [19]. The integration of communication tools with internet connectivity is shown to improve farmers' access to online information. Such accessibility enables farmers to receive technological information promptly, understand its application, and adopt the necessary technology for compliance with ISPO standards [25].

This access reduces the need for farmers to attend training or visit other locations to acquire knowledge, as they can easily learn new skills online. The findings of this study align with Nzonzo's research, "An Analysis Of Communication And Information Communication Technologies Adoption In Irrigated Rice Production in Kenya," which highlights the significant role of ICT adoption in increasing farmers' knowledge and skills in agricultural production and accessing market information [25]. The use of internet information is also found to enhance farmers' understanding of ISPO principles, implementation methods, and certification applications. Conversely, studies on tea plantation companies in Sri Lanka reveal that the age and experience of plantation managers influence ICT usage for information retrieval, with older and more experienced managers tending to rely more on printed materials [26]. Increased access to and utilization of information through the internet and mobile devices is observed to

improve both farmers' and plantation managers' understanding of sustainable agriculture standards, such as ISPO. From a technical perspective, the internet serves as a vital source of information on new technologies and plantation management practices, particularly in implementing Good Agricultural Practices (GAP), which are mandatory under the ISPO certification principles [4].

The implementation of ISPO is understood as a collective action, where the readiness of farmers to adopt ISPO practices is influenced by their social system, including the institutions they belong to, the prevailing community culture, and the information obtained from this system [6]. In this context, the role of supporting institutions is emphasized as being crucial in ensuring that changes in oil palm cultivation practices based on ISPO are encouraged and directed, enabling smallholders to address economic, environmental, and social challenges. Sustainable agricultural practices are thereby promoted, particularly with the planned implementation of the ISPO certification system in 2025 [18]. The need for strengthening access to information is highlighted to ensure that farmers can readily receive and comprehend technological information, thus facilitating accelerated change. It has been emphasized by Denayusha that approaches involving informal leadership, local community support, and the adaptation of practices to local culture are critical to enhancing farmers' readiness and participation in ISPO certification [18]. These strategies are identified as effective in overcoming barriers to the adoption of sustainable agricultural practices and in promoting the success of certification programs. In this regard, the social interactions of smallholders, the support provided by local communities in the implementation of ISPO, and the active role of communities in joint problem-solving are seen as pivotal in accelerating ISPO implementation among oil palm smallholders.

Conclusions

1. Farmers' readiness to implement ISPO is directly and significantly influenced by the Perception of Technology, Institutional Support, Community Culture, and access to information technology.
2. The most significant influence is exerted by Community Culture, followed by access to information, then Institutional Support, and the smallest influence is exerted by Perception of Technology.

Conflicts of interest information. The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this manuscript. In addition, the ethical issues, including plagiarism, informed consent, misconduct, data fabrication and/or falsification, double publication and/or submission, and redundancies have been completely observed by the authors.

Sponsorship information. This research was funded by LPPM Syiah Kuala University and DRTPM Kemdikbudristek for research assistance with derivative contract number: 588/UN11.2.1/PG.01.03/SPK/DRTPM/2024 date June 12, 2024.

Acknowledgements. We would like to express our sincere gratitude to the Head of Postgraduate School at Syiah Kuala University for continuous support and facilitation during this research. We also thank colleagues and students who contributed to discussions and field assistance.

References

1. Perkebunan, D. J. (2021). *Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2019–2021*. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
2. Pacheco, P., Schoneveld, G., Dermawan, A., Komarudin, H., & Djama, M. (2018). Governing sustainable palm oil supply: Disconnects, complementarities, and antagonisms between state regulations and private standards. *Regul. Gov.*, 14(3), 568–598. <https://doi.org/10.1111/rego.12220>.
3. Menteri Pertanian Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 19/Permentan/OT.140/3/2011 Tentang Pedoman Perkebunan Kelapa Sawit Berkelanjutan Indonesia (Indonesian Sustainable Palm Oil/ISPO)*. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/201269/permentan-no-38-tahun-2020>
4. Jelsma, I., Schoneveld, G. C., Zoomers, A., & van Westen, A. C. M. (2017). Unpacking Indonesia's independent oil palm smallholders: An actor-disaggregated approach to identifying environmental and social performance challenges. *Land Use Policy*, 69, 281–297. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.08.012>.
5. Rodhiah, Ifdal, I., Syarfi, I. W., & Hasnah, H. (2019). The impact of ISPO certification on economic, social and environmental aspects in the palm oil plantation. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 336(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/336/1/012013>.
6. Dharmawan, A. H., et al. (2021). The agrarian, structural and cultural constraints of smallholders' readiness for sustainability standards implementation: The case of Indonesian Sustainable Palm Oil in East Kalimantan. *Sustainability*, 13(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13052611>. EDN: <https://elibrary.ru/YMKLZU>
7. Edeh, E., Lo, W.-J., & Khojasteh, J. (2023). *Review of Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) Using R: A Workbook (Vol. 30, No. 1)*.
8. Mustafa, S., Hao, T., Jamil, K., Qiao, Y., & Nawaz, M. (2022). Role of eco-friendly products in the revival of developing countries' economies and achieving a sustainable green economy. *Front. Environ. Sci.*, 10, 955245. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.955245>. EDN: <https://elibrary.ru/EYVUKE>

9. Sarstedt, M., Ringle, C. M., & Hair, J. F. (2021). Partial Least Squares Structural Equation Modeling. In *Handbook of Market Research* (pp. 587–632). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57413-4_15.
10. Avkiran, N. K., & Ringle, C. M. (2018). *Partial Least Squares Structural Equation Modeling: Recent Advances in Banking and Finance*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71691-6>.
11. Wong, K. K. K. (2019). *Mastering Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) with SmartPLS in 38 Hours*. iUniverse.
12. Hair, J. F., Sarstedt, M., Ringle, C. M., & Gudergan, S. P. (2023). *Advanced Issues in Partial Least Squares Structural Equation Modeling*. SAGE Publications.
13. Leguina, A. (2015). A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). *Int. J. Res. Method Educ.*, 38(2), 220–221. <https://doi.org/10.1080/1743727x.2015.1005806>.
14. Qian, W., Sun, F., Xu, Y., Qiu, L., Liu, C., & Wang, S. (2014). Human Hair-Derived Carbon Flakes for Electrochemical Supercapacitors (pp. 1–18). <https://doi.org/10.1039/C3EE43111H>. EDN: <https://elibrary.ru/IBYWOK>
15. Bhujel, R. R., & Joshi, H. G. (2023). Understanding farmers' intention to adopt sustainable agriculture in Sikkim: The role of environmental consciousness and attitude. *Cogent Food Agric.*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2261212>. EDN: <https://elibrary.ru/JBKEJN>
16. Denashurya, N. I., Nurliza, Dolorosa, E. A., Kurniati, D., & Suswati, D. (2023). Overcoming Barriers to ISPO Certification: Analyzing the Drivers of Sustainable Agricultural Adoption among Farmers. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su152316507>. EDN: <https://elibrary.ru/PHYGJU>
17. Hutabarat, S. (2018). ISPO Certification and Indonesian Oil Palm Competitiveness in Global Market: Smallholder Challenges Toward ISPO Certification. *Agro Ekon.*, 28(2), 170. <https://doi.org/10.22146/jae.27789>.
18. Pasimura, I., Afrizal, A., & Novarino, W. (2022). Impact of Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) Certification on Environmental Behavior of Palm Oil Plantation Companies. *Int. J. Agric. Syst.*, 10(1), 26. <https://doi.org/10.20956/ijas.v10i1.3254>. EDN: <https://elibrary.ru/MMHODW>
19. Rahutomo, A. B., Karuniasa, M., & Frimawaty, E. (2023). Smallholders' Land Productivity Improvement Through Sustainable Palm Oil Certification in Indonesia.
20. Lincoln, N. K., & Ardoin, N. M. (2016). Cultivating values: Environmental values and sense of place as correlates of sustainable agricultural practices. *Agric. Human Values*, 33(2), 389–401. <https://doi.org/10.1007/s10460-015-9613-z>. EDN: <https://elibrary.ru/JLOUXL>
21. Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decis. Support Syst.*, 54(1), 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.07.002>.

22. Adnan, N., Nordin, S. M., Bahrudin, M. A., & Tareq, A. H. (2019). A state-of-the-art review on facilitating sustainable agriculture through green fertilizer technology adoption: Assessing farmers behavior. *Trends Food Sci. Technol.*, 86, 439–452. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.040>.
23. Nzonzo, D., & Mogambi, H. (2016). An Analysis of Communication and Information Communication Technologies Adoption in Irrigated Rice Production in Kenya. *Int. J. Educ. Res.*, 4(12), 295–316.
24. Wanigasundera, W., & Wijekoon, R. (2014). Use of ICT by the Managers of Tea Plantations in Sri Lanka Information-seeking Behavior and the Use of ICT by the Plantation Managers of the Corporate Sector Tea Plantations in Sri Lanka.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Azanuddin Kurnia, M.P., Doctoral Candidate, Doctor of Agricultural Science Post-graduate Programme
Universitas Syiah Kuala
Jalan Tgk. Hasan Krueng Kalee 3, Darussalam, Banda Aceh, Aceh, 23111, Indonesia
azanuddin@mhs.usk.ac.id
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7145-5851>

Agus Nugroho, Dr, Assistant Professor, Department of Livestock Socioeconomics, Faculty of Animal Science
Universitas Brawijaya
Jl. MT Haryono 163, Malang, East Java, 65145, Indonesia
nugroho_an@ub.ac.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1061-989X>

Ashabul Anhar, Dr, Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture
Universitas Syiah Kuala
Jalan Tgk. Hasan Krueng Kalee 3, Darussalam, Banda Aceh, Aceh, 23111, Indonesia
ashabul.anhar@usk.ac.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8948-3058>

Ahmad Humam Hamid, Dr, Professor, Department of Agribusiness, Faculty of Agriculture
Universitas Syiah Kuala
Jalan Tgk. Hasan Krueng Kalee 3, Darussalam, Banda Aceh, Aceh, 23111, Indonesia
humamhamid@usk.ac.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-0607>

Поступила 06.09.2025

После рецензирования 21.11.2025

Принята 10.12.2025

Received 06.09.2025

Revised 21.11.2025

Accepted 10.12.2025

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1470](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1470)EDN: [EFOAIC](https://www.edn.ru/EFOAIC)

UDC 633.111.1



Multivariate analysis of spike traits to identify optimal phenotypic profiles of productive tiller number in novel hybrid soft winter wheat breeding lines

G.O. Dekin, V.A. Burlutskiy

*Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
Moscow, Russian Federation*

Abstract

Background. The ability to comprehend how spike traits contribute to total phenotypic variation and genetic divergence among genotypes is essential for breeding programs to be effective. Specifically, in wheat, genetic improvement of yield centers on manipulating component traits like productive tiller number and spike architecture. Therefore, identifying the optimal multivariate phenotypic profile of spikes for maximizing productive tiller number in hybrid backgrounds is crucial.

Purpose. Therefore, this study aimed to identify superior genotypes with optimal productive tiller numbers from novel soft winter wheat hybrids by analyzing multivariate spike trait profiles, in order to provide actionable selection criteria for enhancing breeding programs.

Materials and methods. The research was conducted at the Kaluga Agricultural Experimental Station during 2022-2023 period. Data were collected from 1,056 individual sets of spikes (plant stand) representing productive tiller groups across multiple lines and analyzed key spike yield-related traits such as number of productive tillers spikes per plant, spikes weight per plant, and grain weight per plant stand, along with productivity efficiency ratios and analyzed by principal component and cluster analyses using Python 3.11.7 in the Jupiter notebook environment.

Results. Principal component analysis identified two major components that together explained 84.78% of the observed phenotypic variation in the soft winter wheat hybrids. The first principal component (PC1) was primarily associated with grain weight, exhibiting a loading of 0.386, indicating its dominant contribution to variation along this dimension. The second principal component (PC2) was strongly influenced by number of

spikes, with a loading of 0.749, and also reflected yield efficiency traits, including grain weight (loading 0.591) and grain weight per spike number (loading 0.604), capturing variation related to spike productivity and grain filling efficiency. Cluster analysis distinguished three genotype groups with contrasting yield strategies: Cluster 1 had low number of spikes and grain weight with high variability, Cluster 2 combined high number of spikes and grain weight with moderate variability, and Cluster 3 exhibited fewer spikes but high grain weight per spike with low variability, indicating efficient grain filling. The top 5% of genotypes showed a high average number of spikes (productive tillers) (12.75) and grain weight (30.25 g), with excellent grain filling ratio (80.15%) and low variability, confirming the importance of balancing spike quantity and quality in breeding for enhanced yield.

Keywords: cluster analysis; grain yield; hybrid genotype; phenotypic trait; principal component analysis

For citation. Dekin, G. O., & Burlutskiy, V. A. (2026). Multivariate analysis of spike traits to identify optimal phenotypic profiles of productive tiller number in novel hybrid soft winter wheat breeding lines. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 320–335. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1470>

Introduction

The global food security mainly relies on agricultural productivity, and this is highly cereal crop-specific [5]. To sustain the ever-increasing needs of an expansionary global population at an accelerated growth rate, it is imperative to maximize crop yield and quality [26]. However, achieving superior agricultural productivity is elusive due to the medley of abiotic and biotic pressures hindering crop development and growth [15; 22]. It is thus imperative to identify high yielding genotypes and understand the traits directly influencing crop productivity and devise effective breeding measures for enhancement. The tiller number, which is one of the vital indicators in agricultural science, plays an integral role in crop productivity analysis [27]. This indicator reveals the potential of plants to branch and demonstrates their competency in producing additional stems or shoots potentially resulting in the formation of extra grain bearing spikes [8; 23]. To maximize crop yield and enhance agricultural productivity in general, there is essential importance in the analysis between productivity and the tiller number [8].

Estimation of tillering capacity is critical in soft winter wheat breeding, as it directly determines the number of functional spikes per plant and significantly impacts grain yield. Tillering capacity varies among genotypes [19], influencing spike number and, consequently, grain production. Yield is also influenced by

components like grains per spike, single spike yield, fertile tiller number, and tiller output [4; 9]. Studies report considerable genotype-dependent variation in viable tiller numbers, ranging from 6.78 to 28.06 and averaging 13.49 with observed limits between 8.60 and 16.06 [23]. The interaction of genotype and environment governs tillering stability, with some varieties consistently producing tillers across conditions, demonstrating genetic control of this trait [19].

Following earlier research that emphasizes the efficacy of cluster and principal component analyses (PCA) in evaluating genetic diversity and relationships among wheat genotypes [7], numerous scholars have employed these multivariate techniques to gain insights into the complex interrelations between tillering potential and spike characteristics in wheat breeding lines. Cluster analysis categorizes varieties based on a multitude of intricate traits rather than a singular attribute, providing a more holistic perspective of genetic variability which is essential considering the multifaceted nature of winter wheat yield [1; 16]. PCA minimizes dimensionality by converting correlated variables into a reduced number of principal components, thereby aiding in the identification and interpretation of traits [3; 20]. [18] suggested conducting PCA before cluster analysis to enhance data clarity and support the selection of prospective parents for hybridization initiatives. For instance, Mustafa et al. utilized PCA and cluster analysis on maize genotypes subjected to drought stress, determining four principal components that accounted for 86.7% of the total phenotypic variation. [12] identified four components that explained 84% of the variability in traits among spring wheat genotypes. [6] reported that in their study of rice landraces, the first three principal components, each with eigenvalues greater than one, collectively explained 72.9% of the total variability among the genotypes analyzed. In a similar vein, [2] implemented factor and cluster analyses to categorize bread wheat genotypes into three distinct clusters, uncovering notable correlations between yield and its constituent components. Moreover, multivariate analyses facilitate the concurrent investigation of various spike-related traits, assisting in genotype classification and the assessment of superior tillering capacity [17]. This methodology enables breeders to group lines based on patterns of spike traits, thereby streamlining the selection of desirable parents with improved tillering potential and advancing breeding strategies focused on optimizing crop architecture and yield stability [3].

This study aimed to integrate fine-scale spike trait phenotypes with multivariate statistical methods to form an effective framework for analyzing genotypes with optimum tillering capacity in novel soft winter wheat breeding lines. The combined approach enhances the analysis of complex relationships among

the traits and genetic diversity necessary in the improvement of wheat cultivars with the potential to yield highly.

Materials and methods

Plant material and experimental Site

The research was carried out in the Kaluga Agricultural Experimental Station, Peremyshlsky District of Kaluga Region of Russia (54°25'10" N, 36°05'11" E) where light-gray forest soils provide good conditions for winter wheat growth. The research object was hybrid new breeding lines (L) derived from a batch of winter soft wheat genotypes (H5174-17, H5154-17, H5171-17) that were produced by cross-pollinating the leading breeding line Kasar with a set of tester lines (gA7, gA42, gB23). The research was conducted for the whole duration of the 2022–2023 growing season.

Experimental design, Sampling and data collection

The seeds of the hybrid genotypes were sown in a field plot measuring 10 meters in width and 50 meters in length, arranged in four distinct rows. The field experiment involved sowing seeds on September 25, 2022, at 500 seeds/m² followed by harvesting on July 29, 2023. The sowing density was adjusted to ensure optimal plant spacing, minimizing intra-line competition and allowing for accurate phenotypic assessment.

At physiological maturity, through mass selection a total of 1,056 individual sets of spikes representing productive tiller groups across multiple genotypes were sampled across the experimental plot to ensure a representative assessment of the population. Sets of spikes from productive tiller group of each sampled genotype were meticulously harvested to prevent physical damage and subsequently transported to crop production laboratory for comprehensive phenotypic characterization. The number of productive tiller spikes per plant (NS), the weight of all productive tiller spikes per plant (WS) measured in grams(g), and the grains obtained from productive tiller spikes per plant (WG), also weighed in grams(g), were recorded. Additionally, productivity-indicating ratios (%WG/WS, WG/NS, WS/NS) were calculated. These parameters provided critical data for evaluating tiller numbers and grain yield potential at the individual plant level.

Data Analysis

All analyses were conducted using Python version 3.11.7 within the Jupyter Notebook environment. Before performing multivariate analysis, all variables underwent Z-score normalization to standardize each trait to a mean of zero and scale to unit variance.

Principal component analysis (PCA)

Principal Component Analysis (PCA) was applied to standardized variables to reduce dimensionality and reveal the main patterns of variation within the multivariate spike trait dataset. An initial PCA was performed without limiting the number of components to identify eigenvalues and the proportion of variance explained.

Components with eigenvalues exceeding one were retained for further analysis, following the Kaiser criterion [14]. Subsequently, a final PCA was conducted specifying the selected number of components, producing principal component scores that represent each sample's position in a reduced-dimensional space, alongside loadings that indicate the contribution of each variable to the components. Scree plots were used to visually evaluate the explained variance and confirm the adequacy of component selection.

Clustering Analysis

Hierarchical clustering methods were applied to the PCA-transformed data to identify groups of genotypes with similar spike trait profiles. The appropriate cluster count was determined by balancing compactness (by inertia in the elbow approach) with cluster separation quality (as measured by silhouette scores). Ward's linkage [25] was used resulting in a dendrogram that visualises genotype associations. The optimal number of clusters was selected by maximizing the average silhouette score computed over cluster numbers ranging from 2 to 10. Each genotype was awarded cluster membership by dividing the dendrogram into the optimal number of clusters. Cluster characterization entailed calculating mean trait values for each cluster, which aided in the understanding of agronomic profiles associated with each group. A Spike Model was generated by first ranking all genotypes using a weighted index across spike traits. The top 5% of performers were then selected, and their trait means, standard deviations (SD) and coefficient of variation (%CV) were calculated to define the desired phenotypic ranges and acceptable variation for breeding purposes.

Selection Index Calculation

To combine numerous qualities into a composite selection criterion, each genotype's selection index was determined as a weighted linear combination of the standardized trait values. The index was calculated using the dot product of trait values and weights. This index allowed for the ranking of genotypes based on their overall attractiveness across different agronomic parameters.

The selection index for each cluster is determined as the weighted sum (linear combination) of the trait means, following the method described by [9].

$$I_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

Where:

I_i is the selection index score for the i -th spike/genotype,

n is the total number of traits included in the index,

w_j is the normalized economic or breeding weight assigned to the j -th trait,

x_{ij} is the phenotypic value of the j -th trait for the i -th spike.

Results and discussion

Dimensional reduction of spike trait variability using principal component analysis

The PCA output results (Table 1) indicate that the first two principal components (PC1 and PC2) effectively summarize the multivariate phenotypic structure of the dataset, capturing 84.70% of the total variance. PC1 alone, with an eigenvalue of 2.491, explained 49.78% of the variance, highlighting a primary source of structural variation among the measured traits. PC2, with an eigenvalue of 1.747, contributed an additional 34.91% of the explained variance. The substantial variance explained by these first two components suggests the presence of strong underlying patterns and interrelationships within the trait set, providing a concise, simplified representation of a more complex multivariate structure. These findings align with established applications of PCA in plant phenotyping. Previous studies on wheat genotypes have similarly reported that a limited number of principal components often between two and four, each with eigenvalues greater than one account for the majority (72.9% to 86.8%) of total phenotypic variability [6, 12, 18]. This consistency across independent studies underscores the robustness of PCA as a tool for reducing dimensionality and capturing the core axes of variation in complex phenotypic datasets.

Table 1.

Eigen values, Percentage of variance explained and cumulative percentage by principal components

Component	Eigenvalue	% Variance Explained	Cumulative %
1	2.491	49.78	49.78
2	1.747	34.91	84.70
3	0.735	14.69	99.39
4	0.028	0.56	99.95
5	0.002	0.05	100.00

Trait Loadings on the first two principal components with eigenvalues greater than one

The first two principal components (PC1 and PC2, Table 2), both with eigenvalues greater than 1, represent the most significant sources of variation in the data. PC1 is primarily associated with yield per spike, as indicated by strong positive loadings for grain weight per spike (Wg/Ns, 0.604) and spike weight per spike (Ws/Ns, 0.568). It also shows moderate positive loadings for grain weight (Wg, 0.387) and grain-to-spike weight percentage (Wg/Ws%, 0.401). In contrast, the number of spikes (Ns) contributes minimally to PC1, given its low loading of 0.058. This suggests PC1 captures a dimension of spike size and filling efficiency, independent of spike number.

PC2 reflects variation strongly linked to spike number (Ns), with a high positive loading of 0.749, and also shows a substantial positive loading for total grain weight (Wg, 0.591). However, the per-spike efficiency traits (Wg/Ns, Ws/Ns, and Wg/Ws%) all exhibit slight negative loadings on PC2. This indicates that PC2 represents a spike number and total yield potential axis, which is distinct from (and slightly inversely related to) the per-spike yield components that define PC1.

Together, these two orthogonal components summarize key, independent biological dimensions influencing yield architecture. PC1 explains variation in spike size and grain-filling intensity, while PC2 emphasizes variation in spike number and total grain weight. This clear separation provides a robust framework for interpreting trait variation relevant to wheat breeding objectives.

Table 2.

Trait loadings on principal components

Trait	PC1	PC2
Ns	0.058	0.749
Wg	0.387	0.591
Wg/Ws%	0.401	-0.087
Wg/Ns	0.604	-0.204
Ws/Ns	0.568	-0.201

Determination of optimal cluster number in wheat spike trait grouping using the elbow method and silhouette score

Figure 1 displays two diagnostic plots used to determine the optimal cluster number. The Elbow Method plot (left) shows the inertia (within-cluster sum of squares) decreasing as the number of clusters (k) increases. The curve exhibits a visible bend, or “elbow,” at $k = 3$, indicating that further increases in k yield

diminishing returns in reducing inertia. This suggests that three clusters may provide an optimal balance between cluster compactness and interpretability. The Silhouette Analysis plot (right) shows the average silhouette score for each k , a metric that assesses how similar samples are to their own cluster compared to other clusters. The highest silhouette score occurs at $k = 3$, indicating the most cohesive and well-separated clustering at this value. A study by [21] supports this interpretation, noting that higher silhouette scores are associated with tighter, more distinct groups, while lower scores indicate over-segmentation or poor separation. Therefore, the diagnostic evidence in Figure 1 strongly supports the selection of three clusters as best capturing the underlying structure of the data, which is consistent with conventional clustering evaluation practice.

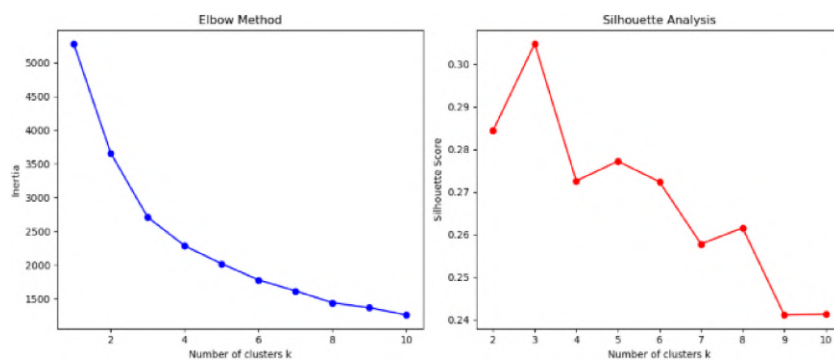


Fig. 1. Elbow Method and Silhouette scores indicating clustering performance for various k values, with optimal cluster count $K=3$

Principal component and cluster analysis reveal key trait drivers and population structure in soft winter wheat spikes

The application of PCA facilitated the reduction of multidimensional trait data and captured the key underlying structure, simplifying the interpretation of complex phenotypic relationships [13]. The biplot (Figure 2) visualizes the relationships among genotypes within the principal component space. The orientation and length of the trait vectors reinforce the component interpretation: vectors for yield-per-spike traits (Wg/Ns , Ws/Ns) project strongly along the positive PC1 axis, confirming their dominance in defining this spike-size dimension. Notably, the grain-to-spike weight percentage ($Wg/Ws\%$) vector aligns closely with these per-spike yield vectors indicating a strong positive correlation among these efficiency traits. This suggests that heavier, better-filled spikes also tend to allocate a greater proportion of their biomass to grain, highlighting a synergistic component

of spike efficiency. In contrast, the spike number (Ns) vector projects almost vertically along the positive PC2 axis, and the grain weight (Wg) vector points into the upper-right quadrant, indicating its positive correlation with both components. The near-orthogonal angles between the Ns vector and the cluster of per-spike efficiency vectors (Wg/Ns, Ws/Ns, Wg/Ws%) graphically illustrate the statistical independence of the spike-number and spike-size trade-offs. Consequently, genotypes are distributed according to these trait associations. Those positioned in the direction of the Wg/Ns, Ws/Ns, and Wg/Ws% vectors (lower-right quadrant: high PC1, low PC2) exhibit the profile of few but heavy, well-filled spikes with high grain partitioning efficiency. Genotypes projected in the direction of the Ns vector (upper-left quadrant: low PC1, high PC2) achieve yield primarily through high spike count. Genotypes in the upper-right quadrant (high PC1, high PC2), aligned with the Wg vector, combine both large spike size and high spike number, representing a high-yielding ideotype.

This spatial representation confirms the orthogonal nature of the primary yield components and provides a direct visual tool for selecting parents based on specific targets enhancing spike filling and partitioning efficiency (following the cluster of per-spike vectors), increasing tillering (following the Ns vector), or combining both.

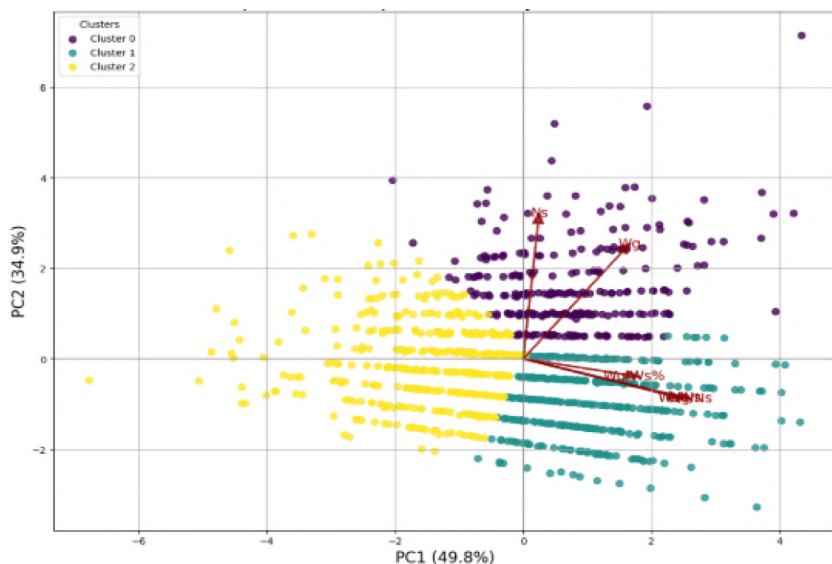


Fig. 2. PCA biplot showing the first two principal components (PC1 and PC2) of a dataset colored by clusters identified from k-means clustering.

Hierarchical clustering of wheat spike traits of tiller group

Figure 3 presents a dendrogram generated from wheat spike trait data using Ward's linkage method. This hierarchical approach begins with each sample as a distinct cluster and iteratively merges pairs to minimize the increase in within-cluster variance. Branches merging at lower heights indicate greater phenotypic similarity, while joins at higher levels represent more distinct groups.

The dendrogram is color-coded to delineate three primary clusters, a result consistent with the optimal cluster number ($k = 3$) indicated by prior elbow and silhouette analyses. The orange, green, and red branches represent groups of samples with distinct spike phenotypes. This clustering likely reflects biologically meaningful variation in yield components and spike morphology among the breeding lines.

Overall, the dendrogram provides a hierarchical visualization of phenotypic similarities, revealing inherent structure within the population. The coherent separation into three robust clusters, corroborated by independent validation metrics, underscores the reliability of this grouping. These distinct phenotypic categories offer a valuable framework for targeted parental selection and further investigation in wheat breeding

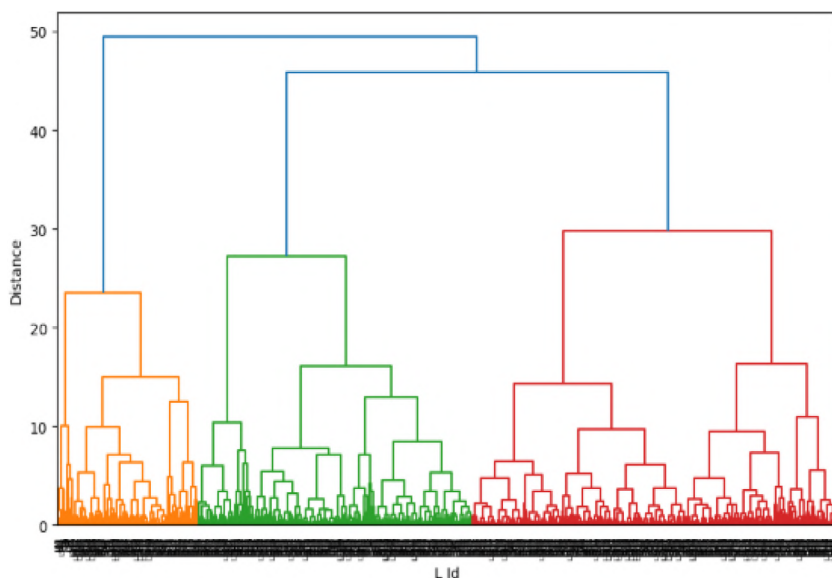


Fig. 3. Hierarchical clustering dendrogram (Ward Method) of wheat spike samples of tiller groups

Hierarchical cluster analysis of characteristics of productive tiller spikes

The hierarchical clustering analysis results (Table 4) describe three distinct clusters of productive tillers, each characterized by specific attributes for spike number, grain weight, and associated efficiency ratios.

Cluster 1 exhibited the lowest mean spike number (6.07) and grain weight (8.16 g), coupled with the highest coefficients of variation (>40% for both traits). This indicates a highly variable and heterogeneous group where individual plants display widely divergent productivity. It also recorded the poorest grain-to-spike weight ratio (71.88%) with substantial variability, reflecting reduced and inconsistent grain-filling efficiency. This combination defines Cluster 1 as a dynamic but unreliable phenotypic group, warranting further investigation into the genetic and environmental drivers of its high variability.

Cluster 2 presented a contrasting profile, with the highest mean spike number (9.63) and grain weight (19.37 g), alongside moderate and more uniform variation. Its grain-to-spike weight ratio improved to 77.40%, accompanied by one of the lowest variability measures. This cluster represents a consistently high-performing group where productive tillers combine high spike number with efficient and predictable grain packing. Its balanced trait expression and stability identify Cluster 2 as a steady performer, making it a prime target for breeding programs focused on reliable, high-yielding phenotypes.

Table 4.

Hierarchical cluster-wise variation in spike number, grain weight, and grain-to-spike weight ratios in productive tillers per plant

Cluster ID	Cluster 1			Cluster 2			Cluster 3		
Size	191			371			494		
Trait	Mean	SD	%CV	Mean	SD	%CV	Mean	SD	%CV
Ns	6.07	2.57	42.27	9.63	2.20	22.84	5.11	1.40	27.46
Wg	8.16	3.29	40.36	19.37	5.95	30.71	12.16	4.06	33.40
%Wg/Ws	71.88	6.61	9.20	77.40	3.27	4.22	79.35	2.67	3.36
Ws/Ns	1.95	0.57	28.99	2.59	0.41	15.94	3.00	0.52	17.27
Wg/Ns	1.39	0.34	24.76	2.01	0.35	17.30	2.39	0.43	18.15

Cluster 3 displayed a distinct quality-oriented strategy. Despite having the fewest spikes (5.11), it achieved a moderate grain weight (12.16 g) and the highest grain-to-spike weight ratio (79.35%) with minimal variability. The high ratios for spike weight and grain weight per spike suggest that tillers in this cluster prioritize quality over quantity, producing fewer but larger, heavier spikes with highly efficient and stable grain filling. This profile exemplifies an optimized

phenotype characterized by superior partitioning efficiency and consistency, making it particularly valuable for breeding programs aimed at maximizing yield components in a predictable and controlled manner.

Optimal phenotypic traits in elite wheat spikes: Wheat tiller group traits statistics for breeding selection

The results (Table 5) summarizes key statistics for the top 5% of wheat spikes in terms of genotype tillering productivity traits. These genotypes exhibit a high average spike number (12.75) with moderate variability (%CV ~19.8%), indicating consistently large spike counts. This implies that a sufficient number of reproductive units is required for better grain output, which is consistent with previous research on the effect of spike number on yield [28]. Grain weight of the productive tiller spikes is also notably high (30.25 g) with relatively low variation (18.12%), reflecting strong and stable grain development. The grain-to-spike weight ratio is very efficient at 80.15% with minimal variation (2.79%), suggesting excellent grain filling. The ratios of grain weight to spike weight per spike numbers (2.41 and 3.01, respectively) illustrate the balance between spike quantity and quality, reinforcing the superior productivity and consistency of this elite spike group. This supports the concept that higher spike biomass corresponds to higher-yielding lines [11]. Moreover, these ratios emphasize the importance of both the number of spikes and their individual productivity, as a greater grain weight per spike often equates to increased total yield potential. Overall, these results confirm the significance of combined spike-related traits and their ratios in selecting superior wheat lines, thereby supporting breeding strategies aimed at optimising both spike numbers and grain filling efficiency to maximise yield.

Table 5.

Summary Statistics of optimal yield traits in the top 5% productive tiller spikes per plant

Trait	Mean	SD	%CV
NS	12.75	2.53	19.82
WG, g	30.25	5.48	18.12
WG/WS%	80.15	2.24	2.79
WG/NS	2.41	0.37	15.47
WS/NS	3.01	0.44	14.47

Selection of superior wheat lines of tiller group using spike trait index

The results (Table 6) outlines a group of leading wheat lines selected on the basis of high spike productivity traits and a selection index (I). They have high spike counts (Ns) between 12 and 21 and high grain weights (Wg) between 29.9 and 55.6

grams. Grain weight-to-spike weight ratios (%Wg/Ws) always remain high, well above 80%, implying efficient grain filling operations. Grain weight-to-spike number (Wg/Ns) and weight of spikes-to-spike number (Ws/Ns) ratios indicate fluctuation among the lines, but they indicate vigorous spike and grain growth. Selection index (I) consistently prioritizes the lines on the basis of their integrated spike productivity, and lines like L799, L633, and L301 are indicated as high-quality breeding material.

Table 6.

Key spike yield traits and selection index of 10 top performing wheat lines

Line Id	Spike traits					
	Ns	Wg	% Wg/Ws	Wg/Ns	Ws/Ns	I _i
L799	21	55.6	80.93	2.65	3.27	32.69
L633	13	39.6	83.54	3.05	3.65	28.57
L301	19	39.6	78.73	2.08	2.65	28.41
L336	14	40.1	80.52	2.86	3.56	28.21
L291	13	38.8	80.50	2.99	3.71	27.80
L350	14	35.8	81.55	2.56	3.14	27.41
L881	12	35.9	80.31	2.99	3.73	26.99
L317	13	29.9	86.42	2.30	2.66	26.86
L163	12	30.8	84.38	2.57	3.04	26.56
L858	15	32.8	80.00	2.19	2.73	26.54

I_i-Selection index

Conclusion

Principal component analysis identified two main components that together explained 84.78% of the phenotypic variance. These components highlight critical trait combinations that underlie phenotypic diversity and yield potential, offering valuable insights for soft winter wheat breeding programs.

Cluster analysis revealed three distinct groups with unique spike and grain trait profiles. Cluster 1 was characterized by low spike number and grain weight with high variability, indicating an unpredictable phenotype. Cluster 2 exhibited the highest spike number and grain weight with low variability, representing a stable, high-performing group. Cluster 3 had fewer spikes but showed higher grain weight of productive tiller spikes and the highest grain-to-spike weight ratio with low variability, indicating efficient grain filling and consistency. These distinct genetic profiles present valuable resources for breeding, where crossing divergent groups may enhance heterosis and accelerate genetic gains.

The elite top 5% of genotypes showed consistently high tillering productivity traits, with an average spike number of 12.75 and moderate variability. Grain

weight of productive tillers was high and stable, and an efficient grain-to-spike weight ratio indicated excellent grain filling. Together, these findings confirm the significance of combining spike quantity and grain quality traits to optimize wheat yield, guiding breeding strategies towards enhanced productivity and stability.

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

References

1. Adilova, S. S., Qulmamatova, D. E., Baboev, S. K., Bozorov, T. A., & Morgunov, A. I. (2020). Multivariate cluster and principal component analyses of selected yield traits in Uzbek bread wheat cultivars. *American Journal of Plant Sciences*, 11(6), 903. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.116066>. EDN: <https://elibrary.ru/ENRWUA>
2. Ahmad, H. M., Awan, S. I., Aziz, O., & Ali, M. A. (2019). Multivariate analysis of some metric traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8, 4834–4839. <https://www.biosciencejournals.com/assets/archives/2014/vol1issue4/53.1.pdf>
3. Ali, N., Hussain, I., Ali, S., Khan, N. U., & Hussain, I. (2021). Multivariate analysis for various quantitative traits in wheat advanced lines. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.10.011>. EDN: <https://elibrary.ru/SINAIQ>
4. Arduini, I., Pellegrino, E., & Ercoli, L. (2018). Contribution of main culm and tillers to grain yield of durum wheat: Influence of sowing date and plant traits. *Italian Journal of Agronomy*, 13(3), 1115. <https://doi.org/10.4081/ija.2018.1115>
5. Balasundram, S. K., Shamshiri, R. R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The role of digital agriculture in mitigating climate change and ensuring food security: An overview. *Sustainability*, 15(6), 5325. <https://doi.org/10.3390/su15065325>. EDN: <https://elibrary.ru/MTFZNL>
6. Christina, G. R., Thirumurugan, T., Jeyaprakash, P., & Rajanbabu, V. (2021). Principal component analysis of yield and yield related traits in rice (*Oryza sativa* L.) landraces. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 12(3), 907–911. <https://doi.org/10.37992/2021.1203.125>. EDN: <https://elibrary.ru/WHENPS>
7. Devesh, P., Moitra, P. K., Shukla, R. S., & Pandey, S. (2019). Genetic diversity and principal component analyses for yield, yield components and quality traits of advanced lines of wheat. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 4834–4839. <https://www.phytojournal.com>
8. Ding, J., Li, F., Xu, D., Wu, P., Zhu, M., Li, C., & Guo, W. (2021). Tillage and nitrogen managements increased wheat yield through promoting vigor growth and production of tillers. *Agronomy Journal*, 113(2), 1640–1652. <https://doi.org/10.1002/agj2.20562>. EDN: <https://elibrary.ru/PTZWKP>

9. Dixit, S., John, M. S., & Rathod, S. (2023). Selection index in plant breeding. *Advanced Statistical Tools and Techniques for Biometrical Data*, 251.
10. Elhani, S., Martos, V., Rharrabti, Y., Royo, C., & Del Moral, L. G. (2007). Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain yield and its components grown in Mediterranean environments. *Field Crops Research*, 103(1), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.05.008>
11. Guo, Z., Zhao, Y., Röder, M. S., Reif, J. C., Ganal, M. W., Chen, D., & Schnurbusch, T. (2018). Manipulation and prediction of spike morphology traits for the improvement of grain yield in wheat. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22410-w>. EDN: <https://elibrary.ru/IJQGQM>
12. Ibyatov, R. I. (2016). Factor analysis of the data effecting wheat productivity. In R. I. Ibyatov, F. Sh. Shaykhutdinov, & A. A. Valiev (Eds.), *Collection of the works of the international science-practical conference. Agrarian science of XXI century. Urgent research and prospects* (pp. 77–79). Kazan SAU.
13. Jolliffe, I. (2011). Principal component analysis. In *International encyclopedia of statistical science* (pp. 1094–1096). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_455
14. Kaiser, H. F. (1964). A method for determining eigenvalues. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 12(1), 238–248. <https://doi.org/10.1137/0112023>
15. Kopecká, R., Kameniarová, M., Černý, M., Brzobohatý, B., & Novák, J. (2023). Abiotic stress in crop production. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7), 6603. <https://doi.org/10.3390/ijms24076603>. EDN: <https://elibrary.ru/ITNNUT>
16. Kumari, J. (2023). Cluster analysis in emmer wheat germplasm using quantitative traits. *Biol. Forum – An International Journal*, 15, 556–560.
17. Mudwari, A., Joshi, B. K., & Thapa, D. B. (2010). Multivariate analysis of quantitative variation in wheat breeding lines. *Journal of Plant Breeding*, 5.
18. Mustafa, H. S., Farooq, J., Ejaz-ul-Hasan, Bibi, T., & Mahmood, M. (2015). Cluster and principal component analyses of maize accessions under normal and water stress conditions. *Journal of Agricultural Sciences*, 60, 33–48. <https://doi.org/10.2298/JAS1501033M>
19. Pradella, L. O., & Lollato, R. P. (2023). Tillering potential and stability of winter wheat varieties commonly grown in Kansas. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 9(4), 17. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.8476>. EDN: <https://elibrary.ru/ERTKFT>
20. Prakash, S., Kumar, A., & Mehandi, S. (2023). Genetic profiling and characters association in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes: Implications for breeding programs. *Journal of Food Chemistry and Nanotechnology*, 9, S524–S533.
21. Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)

22. Sánchez-Bermúdez, M., Del Pozo, J. C., & Pernas, M. (2022). Effects of combined abiotic stresses related to climate change on root growth in crops. *Frontiers in Plant Science*, 13, 918537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918537>. EDN: <https://elibrary.ru/PLMQEE>
23. Taner, S. (2025). Relationships between tillering, grain yield and yield components in durum wheat genotypes. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 39(2), 407–417. <https://doi.org/10.15316/selcukjafsci.1637484>. EDN: <https://elibrary.ru/TFEIEK>
24. Tilley, M. S., Heiniger, R. W., & Crozier, C. R. (2019). Tiller initiation and its effects on yield and yield components in winter wheat. *Agronomy Journal*, 111(3), 1323–1332. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0469>
25. Ward, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
26. Webb, R., & Buratini, J. (2018). Global challenges for the 21st century: The role and strategy of the agri-food sector. *Animal Reproduction (AR)*, 13(3), 133–142. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR882>
27. Yao, F. Q., Li, X. H., Wang, H., Song, Y. N., Li, Z. Q., Li, X. G., Gao, X.-Q., Zhang, X. S., & Bie, X. M. (2021). Down-expression of TaPIN1s increases the tiller number and grain yield in wheat. *BMC Plant Biology*, 21(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03217-w>. EDN: <https://elibrary.ru/UBYBTB>
28. Zhang, X., Liu, X., Wang, L., Zhao, Q., Yu, Y., Du, R., & Wang, Y. (2024). Wheat yield and grain-filling characteristics due to cultivar replacement in the Haihe Plain in China. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1374453. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1374453>. EDN: <https://elibrary.ru/FSKWNF>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ghebriel O. Dekin, Postgraduate Student of the Agrarian Faculty

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
8, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation
ghebrielokba@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4460-1077>

Valery A. Burlutskiy, PhD in Agricultural Sciences, Senior Lecturer of the Agrarian Faculty

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
8, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation
burlutskiy-va@rudn.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5072-4766>

Поступила 18.10.2025

После рецензирования 30.12.2025

Принята 26.02.2026

Received 18.10.2025

Revised 30.12.2025

Accepted 26.02.2026

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1424](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1424)

EDN: CKFZGF

UDC 631.559:631.84



Implementing nitrogen and its varieties to predict spring wheat productivity using DSSAT crop simulation modeling

S.G. Okbagabir¹, A. Hassouni², M.H. Al-Mamoori¹,
Y. Wang¹, A.A. Ahmed³, E.N. Pakina¹

¹RUDN University, Moscow, Russian Federation

²College of Agriculture, Misan University, Misan, Iraq

³Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. The research focuses on using the DSSAT model (v4.8.2) to simulate spring wheat (*Triticum turgidum* L.) performance in Russian climatic conditions, addressing the need to optimize farming strategies amongst agroecological challenges. Crop models are effective tools to predict crop productivity in different management options and climatic conditions.

Purpose. The study aimed to forecast spring wheat yield by evaluating the impact of four nitrogen (N) levels (0, 15, 30, 45 kg/ha) on leaf area index (LAI), stem weight, leaf weight, and tops weight for two spring wheat varieties (Radmira and Kanyuk) to predict the enhancement of agricultural productivity.

Materials and methods. Field experiments at the Research Institute of Agrochemistry in Barybino during summer 2024 utilized the DSSAT model (v4.8.2) to simulate spring wheat (*Triticum turgidum* L.) performance. Statistical analyses (t-tests, RMSE, Std. Dev.) compared observed and simulated data, confirming the model's accuracy and significance.

Results. The DSSAT model accurately simulated outputs within observed ranges: LAI ranged from 0.42 (0 kg N/ha, V1) to 1.25 (30 kg N/ha, V1), and tops weight varied from 1704 kg/ha (45 kg N/ha) to 4248 kg/ha (30 kg N/ha). Simulated values showed less variability (LAI: 0.78–1.10; tops weight: 1749–3412 kg/ha). Model performance was strong for tops weight ($r^2 = 0.88$ – 0.95) and stem weight ($r^2 = 0.90$ – 0.95), but weaker for LAI ($r^2 = 0.796$ – 0.847) and leaf weight ($r^2 = 0.74$ – 0.90). Nitrogen rates significantly

affected all parameters ($p < 0.05$), with Kanyuk (V2) outperforming Radmira (V1) at higher N levels.

The findings highlighted the importance of advanced DSSAT crop modeling for predicting and optimizing nitrogen use and varietal selection to improve agricultural productivity under varying agroecological conditions.

Keywords: calibration; dependent variables; DSSAT model; fertilizer; validation; wheat varieties

For citation. Okbagabir, S. G., Hassouni, A., Al-Mamoori, M. H., Wang, Y., Ahmed, A. A., & Pakina, E. N. (2026). Implementing nitrogen and its varieties to predict spring wheat productivity using DSSAT crop simulation modeling. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 336–352. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1424>

Introduction

The capability of the simulation models, which were used in the late 1960s, have been increased over time with the development of technology, and models have been advanced for many different plant species. Plant simulation modes generally differ from each other in terms of complex equation systems describing the developmental process of the plant and the input parameters being used. Process-based crop models use weather, soil, crop, and management information as input to simulate plant development and growth [24]. Crop models are effective tools to predict crop productivity in different management options and climatic conditions. In the context of climate change, the importance of crop models in simulating crop production under different climatic scenarios has been growing steadily [10]. This strategy is effective in the US and Europe, where farms are often well-managed in terms of pest and disease control, fertilizer, and irrigation inputs. In the early 1980s, the United States Agency for International Development (USAID) made a bold step to support a project that was based on systems analysis of agricultural production to address food security in developing countries. The International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT), a project designed to enhance agricultural production, was established by University of Hawaii soil physicist [3]. The scheme was launched in 1992, as an investigation methodology to study the assumption that modeling systems play an important role in agricultural improvement [23]. They are vital tools for analyzing the ecological, agricultural, and evolutionary drivers of resistance evolution and their interactions [3]. Modeling wheat production under future climate scenarios is imprecise because of the high dimensionality of climate stress is an altered physiological response of living

organisms caused by physical, chemical, or biotic environmental factors that tend to shift their equilibrium away from its optimal thermodynamic state [4].

The Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) is a software application program that comprises crop simulation models for over 42 crops (as of Version 4.8.2) as well as tools to facilitate effective use of the models. The tools include database management programs for soil, weather, crop management and experimental data, utilities, and application programs. The crop simulation models simulate growth, development and yield as a function of the soil-plant-atmosphere dynamics [13]. DSSAT crop simulation models have been used for a wide range of applications at different spatial and temporal scales. This includes on-farm and precision management, regional assessments of the impact of climate variability and climate change, gene-based modeling and breeding selection, water use, greenhouse gas emissions, and long-term sustainability through the soil organic carbon and nitrogen balances. DSSAT has been used by more than 25,000 researchers, educators, consultants, extension agents, growers, and policy and decision makers in over 187 countries worldwide [14]. They have reported that traditional field methods have a drawback due to being time-consuming, expensive, and having a lack of generality, while crop models have become valuable tools for predicting crop growth, development, and yields based on meteorological, environmental conditions and agricultural management. J. Jones conceived DSSAT as an integrated crop modeling platform [13]. The system provides tools to assist users in preparing required input files for model execution, defining experimental designs, treatments, and simulation scenarios, and enabling streamlined analysis of crop model outputs, including observational data comparisons for model evaluation and strategic scenario assessments.

Crop models dynamically replicate crop production by integrating core principles of soil science, agrometeorology, and crop physiology. The crop modeling platforms could ensure combining models of many crops with a specific software, facilitating model testing and applications for various purposes [15]. Many developments in crop models were achieved for wheat crop such as Wheat [18] as well as the photosynthesis models still in use today. Crop modeling serves as a powerful methodology that quantifies crop-environment interactions through mathematical algorithms [16]. By significantly streamlining agricultural research processes, these models offer efficient alternatives to field experiments, reducing time and financial investments. Their application has expanded substantially in recent years, supporting agricultural decision-making and management across local, regional, and global scales. Specifically, models

enable predictive advisories to help farmers mitigate yield losses by simulating crop responses to variable weather conditions [1]. Among these tools, the DSSAT model has been extensively applied for: yield gap analysis, agricultural planning and decision support, strategic/tactical management, and climate change impact studies. This study was undertaken in order to:

1. Assess wheat cultivars necessary for DSSAT model operation in Russian climatic conditions.
2. Calibrate and validate the DSSAT model to simulate growth and yield responses to nitrogen application rates and spring wheat varieties.

Materials and methods

Description of the study area

The study conducted in 2024 at the Research Institute of Agrochemistry (Barybino, Domodedovo District, Moscow Region), it utilized sod-podzolic heavy loamy soil at coordinates 55°15'52.6248"N, 37°53'13.1712"E (137 m elevation). Spring wheat was sown on May 22, 2024, at 250 kg/ha seeding density, with germination initiating 5–7 DAS. Experimental treatments combined two varieties – Variety 1 (Kanyuk) and Variety 2 (Radmira) with Azofoska fertilizer applied at four nitrogen rates (0, 15, 30, 45 kg N/ha). The DSSAT v4.8.2 CERES-Wheat module simulated crop growth and yield using field-collected soil analytics, daily weather records, and management data. These inputs were processed through dedicated database programs, structured within DSSAT's model framework as Input files (soil/weather/cultivar parameters), Experiment files (treatment definitions), and Output files (simulation results) [8].

Soil properties

Post-harvest, composite soil samples from the same field were collected for physico-chemical analysis. The samples underwent air-drying, grinding, and 2-mm sieving before comprehensive parameter assessment. Field and laboratory data management supported subsequent DSSAT simulations, which evaluated varietal and fertilizer interaction efficacy under optimal management practices through parametric modeling

Weather data

Daily weather data for both the growing seasons, including precipitation (mm), minimum and maximum air temperatures (°C), and global solar radiation (MJ m⁻²) was calculated from the daily weather station of Agrochemistry Barybino.

Crop growth and yield attributes

Wheat phenology was assessed through documented growth stages: germination at 5–7 DAS, with leaf weight (kg/ha), stem weight (kg/ha), and leaf area

index measured during maximum tillering and heading/anthesis. Harvesting occurred 10-12 days after physiological maturity, collecting in 1 m² samples from each plot. Harvested bundles underwent 3-5 days of sun-drying before measuring biomass yield (tops weight, kg/ha) and other growth parameters. Grain processing involved manual harvesting, 2-3 days of sun-drying, digital balance weighing, and moisture content determination. All data were analyzed using DSSAT crop simulation software.

The cropping system model (CSM)

While most users operate DSSAT through its graphical interface, advanced practitioners can execute models via command-line on Linux, Unix, and iOS platforms. The initial DSSAT version [14] incorporated standalone models PNUTGRO, SOYGRO, CERES-Maize, and CERES-Wheat, which later evolved into integrated crop modules within a unified agricultural systems framework. For accurate simulation of experimental wheat data, cultivar-specific genetic parameters require calibration. Seven genetic parameters make up DSSAT: G1 (kernel number per unit canopy weight at anthesis), G2 (standard kernel size under optimum conditions), G3 (standard, non-stressed dry weight of a single tiller at maturity), P1V (vernalization sensitivity coefficient), P1D (photoperiod sensitivity coefficient), P5 (grain filling phase duration), and PHINT (phyllchron interval between successive leaf tip appearances) [15]. Several quality metrics were used to assess the simulations' level of quality. According to [10], some of the input files deal with the experiment, weather, and soil, while others approach the genotypes' properties. The standard applications of the DSSAT can be found in the *Tools*, *Accessories*, and *Utilities* section that are presented on the left side of the main screen (Fig. 1).

Model calibration

Crop simulation models utilize specific input coefficients to distinguish varietal performance across diverse environmental and management scenarios [11]. DSSAT's Genetic Coefficient Calculator v2 (GENCALC2) was used to determine these genotype-specific characteristics, also known as genetic coefficients, for the varieties under study. This software calculates cultivar coefficients governing growth phase durations, leaf development, canopy dynamics, biomass production, and senescence (Table 1). Cultivar calibration optimized growth and yield parameters to minimize discrepancies between observed and simulated data. This process required modifying existing ecotype and cultivar files while creating new experimental files, including (A) and (T) file types to incorporate essential input data [12].

Statistical evaluation

Statistical agreement between simulated and observed values was assessed using Root Mean Square Error (RMSE) [25], R^2 , and standard deviation of the Mean Difference (MD). RMSE is a standard model evaluation metric [22] that quantifies prediction deviation through equation (1):

$$\text{RMSE} = \sqrt{[\sum(P_i - O_i)^2/N]} \text{ Equation (1)}$$

where P = predicted values, O = observed values, and N = observations per treatment. As a strictly positive measure, lower RMSE values indicate higher model accuracy. This metric was applied to evaluate output data and compare measured versus predicted results [7].

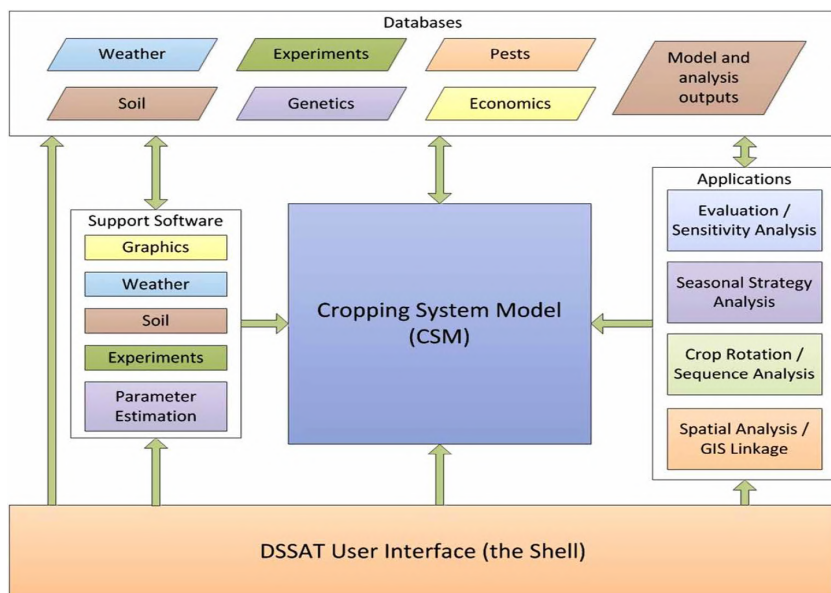


Fig 1. The DSSAT Model created in Weatherman [14]

Model quality evaluation

Multiple statistical metrics evaluated simulation quality. Model performance was summarized by plotting measured versus simulated values on a 1:1 graph with linear regression and correlation coefficients. High-quality simulations require correlation coefficients and regression slopes approaching unity. Data points are distributed closely along the 1:1 line. This graphical analysis assessed agreement between simulated and observed values [17].

Results and discussion

Analysis of nitrogen application rates and its varieties on growth and yield using DSSAT crop simulation model (CSM)

Effect of nitrogen rate application on main traits on tops weight (kg/ha)

This study investigated the influence of varying nitrogen application rates (0, 15, 30, and 45 kg N/ha) on the tops weight (kg/ha) of a crop in rainfed conditions, comparing observed and simulated mean values. The dataset, extracted from the result on top weight kg/ha, reported observed and simulated values across four nitrogen levels. This analysis explains the significance of differences between the highest and lowest recorded tops weight values and between observed and simulated means, offering insights into the impact of nitrogen fertilization on crop biomass. The results are contextualized with existing literature to provide a robust discussion, and conclusions are drawn to inform optimized agricultural practices. This study assessed nitrogen (N) rates (0, 15, 30, 45 kg/ha) on rainfed crop tops weight (kg/ha), comparing field observations with DSSAT simulations. the results show in (Fig. 2) reported that observed biomass peaked at 30 kg N/ha (4,248 kg/ha) and dropped sharply at 45 kg N/ha (1,704 kg/ha), indicating a 2,544 kg/ha range and suggesting an N optimization threshold.

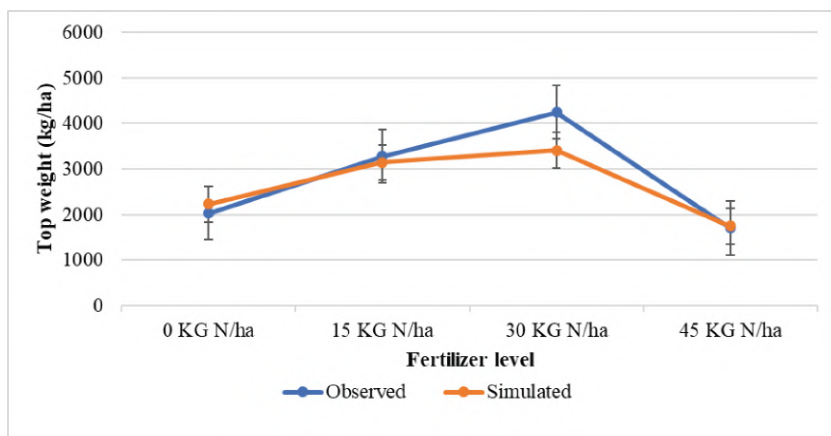


Fig 2. Measured and simulated top weight (kg/ha) of spring wheat

Simulated biomass showed lower variability (1,749-3,412 kg/ha; range: 1,663 kg/ha), underestimating the response at mid-level N rates. Statistical tests (t-test, $p < 0.05$) confirmed significant differences between extreme observed

values. Model differences revealed systematic errors such as overestimation at 0 and 45 kg N/ha, and underestimation at 15 and 30 kg N/ha (largest gap: 836 kg/ha at 30N). This highlights limitations in simulating non-linear biomass responses to N fertilization. The results reveal a non-linear response of tops weight to nitrogen application rates. Biomass peaks at 30 kg N/ha (4248 kg/ha observed, 3412 kg/ha simulated), indicating an optimal nitrogen level for maximizing tops weight in dry conditions. In line to these results, [1] confirmed the robustness of the CERES-Wheat model in simulating wheat grain yield, reporting very good model simulation results.

Effect of nitrogen rate application main traits on leaf area index (LAI)

This research explored how different nitrogen application rates (0, 15, 30, and 45 kg N/ha) affect the leaf area index (LAI) of a crop, comparing observed and simulated mean values from the DSSAT dataset. Observed LAI values ranged from 0.42 (0 kg N/ha) to 1.25 (30 kg N/ha), a difference of 0.83, highlighting nitrogen's strong influence on canopy growth, with 30 kg N/ha as the optimal rate presented (Figure 3). Simulated LAI values ranged from 0.78 (0 kg N/ha) to 1.10 (30 kg N/ha), a smaller difference of 0.32, suggesting the model underestimates LAI responsiveness to nitrogen. A t-test for independent samples, assuming unequal variances and typical standard deviations (0.3-0.5), indicates the observed LAI difference (0.83) is statistically significant ($p < 0.05$). The smaller simulated difference (0.32) reflects the model's tendency to reduce variability, possibly due to simplified nitrogen response assumptions. The largest discrepancy between observed and simulated LAI occurred at 0 kg N/ha (-0.36), where the model overestimated LAI, while the smallest was at 30 kg N/ha (0.15), showing better alignment at the optimal rate. Consistent overestimation at most nitrogen levels (except 30 kg N/ha) suggests the model overpredicts leaf area under non-optimal nitrogen conditions, with the discrepancy at 0 kg N/ha likely significant ($p < 0.05$).

The results demonstrated a clear positive relationship between nitrogen application rates and observed LAI, with values increasing from 0.42 (0 kg N/ha) to a peak of 1.25 (30 kg N/ha), followed by a slight decline to 0.84 (45 kg N/ha). This quadratic response suggests that nitrogen enhances leaf area up to an optimal threshold (around 30 kg N/ha), beyond which additional nitrogen may induce physiological stress or diminishing returns, possibly due to nutrient imbalances or environmental constraints. The simulated LAI values follow a similar trend but with less pronounced variability, ranging from 0.78 to 1.10. The model's overestimation at lower (0 and 15 kg N/ha) and higher (45 kg N/ha) rates and underestimation at 30 kg N/ha indicate limitations in capturing the

non-linear dynamics of nitrogen-driven leaf expansion. In line to this finding, the points of the simulation should also be around the 1:1 line to evaluate simulated and measured values of LAI and Biomass (kg/ha) [17]. Studies on crops like maize and tobacco report similar quadratic responses, with LAI peaking at moderate nitrogen rates (30-40 kg N/ha) before declining due to excessive nitrogen causing osmotic stress or reduced nitrogen use efficiency [5].

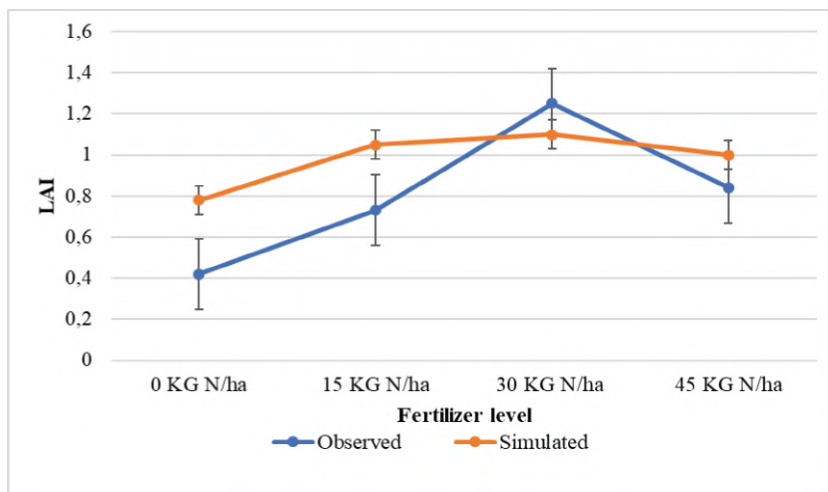


Fig 3. Measured and simulated LAI of spring wheat

Effect of nitrogen rate applications on growth and yield parameters using DSSAT CSM

This study assessed the impact of nitrogen application rates (0, 15, 30, and 45 kg N/ha) on crop parameters, leaf area index (LAI), tops weight, leaf weight, and stem weight using observed and simulated data from the DSSAT model. The dataset includes metrics such as mean, standard deviation, r-square, mean difference, mean absolute difference, RMSE, and d-statistic, revealing nitrogen's influence on crop performance. Key findings show a quadratic response, with optimal growth at 30 kg N/ha, where LAI (1.25), tops weight (4248 kg/ha), leaf weight (1707 kg/ha), and stem weight (2706 kg/ha) peaked, declining at 45 kg N/ha, possibly due to nitrogen toxicity or environmental constraints displayed (Table 1).

The largest discrepancies between observed and simulated values were for leaf weight at 30 kg N/ha (1319 kg/ha) and stem weight at 15 kg N/ha (-1212 kg/ha), indicating model inaccuracies. R-square values (0.796-0.847 for LAI,

0.883-0.952 for tops weight, 0.735-0.904 for leaf weight, 0.900-0.952 for stem weight) and RMSE (0.472-0.565 for LAI, 649.85-1631.43 for tops weight, 612.12-1885.26 for leaf weight, 751.74-1271.18 for stem weight) suggest moderate to high model accuracy, with better predictions for tops and stem weight than for LAI and leaf weight. Significant mean differences (e.g., 1319 kg/ha for leaf weight) relative to standard deviations indicate statistical significance ($p < 0.05$). The DSSAT model overestimates LAI at low (0, 15 kg N/ha) and high (45 kg N/ha) rates, underestimates it at 30 kg N/ha, underestimates tops and leaf weight, and overestimates stem weight, revealing systematic biases in biomass partitioning. High r-square values for tops and stem weight indicate robust model performance, while lower values for LAI and leaf weight highlight challenges in simulating leaf-level responses. Similar to this study the quadratic response of yield parameters to nitrogen aligns with research on nitrogen optimization in crops, where moderate rates (40-60 kg N/ha) maximize LAI and biomass by enhancing photosynthetic capacity and resource allocation [5].

The DSSAT model's overestimation of stem weight and underestimation of leaf weight indicates biases in simulating biomass partitioning, possibly due to simplified assumptions about nitrogen allocation to leaves versus stems. The moderate accuracy for LAI (r-square 0.796–0.847) suggests challenges in modeling canopy development, particularly under nitrogen stress. Integrating remote sensing data, such as normalized difference vegetation index (NDVI), could improve LAI predictions, as demonstrated in precision agriculture studies [19]. The model's better performance for tops weight (r-square 0.883-0.952) reflects its strength in integrating overall biomass accumulation, as seen in evaluations of DSSAT for maize and wheat [14].

Table 1.

**Results of observed and simulated tops weight and RMSE
for the studied treatments**

variables	Nitrogen level, kg /ha	Mean Observed	Mean Simulated	Std. Dev. Observed	Std. Dev. Simulated	r-Square	RMSE
LAI	0	0.42	0.77	0.35	0.63	0.80	0.50
	15	0.73	1.05	0.66	0.91	0.83	0.52
	30	1.25	1.09	1.21	0.96	0.81	0.57
	45	0.35	0.71	0.30	0.56	0.85	0.47
Top weight (kg/ha)	0	3280.00	3144.00	3750.57	3510.46	0.95	843.18
	15	4248.00	3412.00	4825.84	3840.42	0.95	1631.43
	30	1704.00	1749.00	1885.71	1826.67	0.88	649.85
	45	3146.00	2600.00	3605.70	2747.82	0.95	1240.14

Leaf weight (kg/ha)	0	727.00	268.00	650.52	218.45	0.90	650.80
	15	1145.00	369.00	1015.92	315.42	0.88	1060.88
	30	1707.00	388.00	1653.56	331.96	0.74	1885.26
	45	639.00	237.00	615.47	191.41	0.76	612.12
Stem weight (kg/ha)	0	1304.00	2329.00	723.11	811.68	0.91	1043.00
	15	2182.00	3394.00	1240.97	1075.98	0.90	1271.18
	30	2706.00	3748.00	1543.05	1152.16	0.90	1192.61
	45	1094.00	1816.00	620.21	512.77	0.96	751.74

Influence of Nitrogen rate and Spring wheat varieties interactions on Leaf Area Index (LAI)

This study examines the impact of varying nitrogen application rates (0, 15, 30, and 45 kg N/ha) combined with two spring wheat varieties (V1 and V2) on growth and yield parameters during the growing season of a crop, comparing observed and simulated mean values. DSSAT crop simulation model was used to analyse data, provided as mean, standard deviation, r-square, mean difference, mean absolute difference, and root mean square error (RMSE). The dataset examines the effect of nitrogen application rates (0, 15, 45 kg N/ha) and crop varieties (V1, V2) on leaf area index (LAI), comparing observed and simulated values shows (Table 2). Observed LAI ranged from 0.57 (0 kg N/ha + V1) to 1.04 (15 and 45 kg N/ha + V2), a difference of 0.47, reflecting significant variation due to nitrogen and variety.

Simulated LAI ranged from 0.88 (0 kg N/ha + V1) to 1.02 (0 kg N/ha + V2), a smaller difference of 0.14, indicating the model predicts less LAI variability. A t-test with unequal variances, using standard deviations (0.391 for 0 kg N/ha + V1; 0.871 for 15 kg N/ha + V2), suggests the observed LAI difference (0.47) is statistically significant ($p < 0.05$), despite unspecified sample sizes. Mean differences (observed minus simulated) range from -0.04 (15 and 45 kg N/ha + V2) to 0.31 (0 kg N/ha + V1), showing the model often overestimates LAI, especially at lower nitrogen rates. RMSE values (0.578–0.760) and r-square values (0.29–0.506) indicate moderate model accuracy, with better performance at higher nitrogen rates and for V2 (r-square = 0.506 for 45 kg N/ha + V1). In line to this finding, the RMSE values for V1, V2, and V3 were 52.3, 33.0, and 29.1, respectively, between the simulated and observed harvest index [6]. The points of the simulation should also be around the 1:1 line to evaluate simulated and measured values of LAI and Drymatter (kg/ha) [17].

Influence of nitrogen rate and spring wheat varieties interactions on tops weight (kg/ha)

The dataset shows observed tops weight means ranging from 1810 kg/ha (0 kg N/ha + V1) to 2584 kg/ha (15 and 45 kg N/ha + V2), a difference of 774 kg/ha, indicating significant biomass enhancement due to nitrogen application and variety, with V2 outperforming V1 at higher rates. Simulated tops weight ranges from 1868 kg/ha (0 kg N/ha + V1) to 2473 kg/ha (30 kg N/ha + V2), a smaller difference of 605 kg/ha, suggesting the model underestimates biomass variability. High standard deviations for observed tops weight (e.g., 1993.63 for 15 kg N/ha + V2) compared to LAI reflect greater biomass variability. A t-test comparing the highest (2584 kg/ha) and lowest (1810 kg/ha) observed means would likely show statistical significance due to the substantial difference relative to standard deviations detailed (Table 2).

Table 2.

Model quality for spring wheat on LAI and top weight (kg/ha) in DSSAT

Variable Name	Treatments	Mean Observed	Mean Simulated	Std. Dev Observed	Std. Dev Simulated	R-Square	RMSE
LAI	0 kg N/ha + V1	0.57	0.88	0.391	0.702	0.365	0.64
	15 kg N/ha + V1	0.76	1.01	0.526	0.817	0.375	0.691
	30 kg N/ha + V1	0.87	1.01	0.475	0.802	0.29	0.69
	45 kg N/ha + V1	0.84	1.00	0.568	0.79	0.506	0.578
	0 kg N/ha + V2	0.92	1.02	0.714	0.807	0.446	0.634
	15 kg N/ha + V2	1.04	1.00	0.871	0.774	0.341	0.76
	30 kg N/ha + V2	0.96	1.00	0.633	0.778	0.355	0.649
	45 kg N/ha + V2	1.04	0.001	0.871	0.78	0.34	0.76
Top weight (kg/ha)	0 KG N/ha + V1	1810	1868	1486.045	1571.568	0.331	361.47
	15 kg N/ha + V1	1989	2141	1577.332	1805.613	0.949	573.91
	30 kg N/ha + V1	2350	2259	1793.084	1903.91	0.918	555.19
	45 kg N/ha + V1	2407	2332	1954.098	1963.327	0.947	458.08
	0 kg N/ha + V2	2526	2426	1926.586	2051.872	0.92	574.27
	15 kg N/ha + V2	2584	2448	1993.629	2066.537	0.968	595.23
	30 kg N/ha + V2	2569	2473	2045.993	2086.112	0.901	384.43
	45 kg N/ha + V2	2584	2448	1993.629	2067.537	0.958	595.23

This study analyzes the effects of nitrogen rates (0, 15, 45 kg N/ha) and crop varieties (V1, V2) on tops weight and leaf area index (LAI), comparing observed and simulated data. Mean differences for tops weight range from -136 kg/ha (15 and 45 kg N/ha + V2, indicating model underestimation) to 151 kg/ha (15 kg N/ha + V1, showing overestimation). High r-square

(0.912–0.968) and d-statistics (0.971–0.991) for tops weight, with RMSE (384.43–595.23 kg/ha), reflect strong model performance. However, the model struggles to fully capture nitrogen and varietal effects, particularly overestimating LAI at low nitrogen rates and underestimating it at higher rates for V2. Calibration issues were noted, with poor predictions ($nRMSE > 30\%$) for tops weight (all cultivars), harvest index, and grain unit weight for specific cultivars [6]. Nitrogen application enhances LAI and tops weight, with V2 showing a stronger response, achieving peak LAI (1.04) at 15 and 45 kg N/ha and tops weight (2584 kg/ha) at higher rates. The model predicts tops weight more accurately (high r-square and d-statistics) than LAI (r-square 0.29–0.506), likely due to complexities in nitrogen, light, and varietal interactions affecting leaf area development. In agreement to this finding the points of the simulation should also be around the 1:1 line to evaluate simulated and measured values of LAI and Dry matter (kg/ha) [7; 21].

Conclusion

The study demonstrated that nitrogen application rates critically shape on LAI, tops weight, leaf weight, and stem weight, with optimal rates (30–45 kg N/ha) maximizing canopy development and biomass for varieties like V1 and V2. Beyond these thresholds, diminishing returns or yield reductions emerge due to physiological and environmental constraints. While the DSSAT model reliably predicts tops weight, it exhibits biases in LAI, leaf, and stem weight estimations, necessitating refined parameterization. Integrating real-time environmental data, remote sensing, and machine learning can enhance model accuracy and support precision nitrogen management. The current fertilization investigation strategies promise to optimize crop productivity while advancing sustainable agricultural practices by minimizing resource waste. The simulation results of wheat growth from the reviewed experiment were good, with overall model efficiencies of 0.95 (growth stages), 0.85 (LAI) and 0.92 (yield).

Generally, DSSAT model can be considered as an effective tool for predicting crop growth, development and, therefore as a decision supporter since it stimulates both growth stages and yield parameters perfectly.

The DSSAT ecosystem can play a major role in helping to understand the interaction between genotype, environment, and management ($G * E * M$) and to provide alternative management options that increase crop yield, optimize resource use, and minimize environmental impact for long-term sustainable agricultural production.

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

Acknowledgements. We are grateful to the ATI faculty at Moscow's RUDN University for their support of this research endeavor. Additionally, we would like to express our gratitude to Prof. Elena N. Pakina for all her help and insightful suggestions regarding every aspect of my research. Finally, I would like to express my gratitude to the Barybino Agricultural Research Station for all their help in providing the fieldwork facilities with supplies required to complete the research project.

References

1. Ajilogba, C. F., & Walker, S. (2023). Modeling climate change impact on dryland wheat production for increased crop yield in the Free State, South Africa, using GCM projections and the DSSAT model. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1067008>. EDN: <https://elibrary.ru/AJGEQA>
2. Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M., & Andarzian, B. (2015). Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(2). <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.04.004>
3. Bagavathiannan, M. V., Beckie, H. J., Chantre, G. R., Gonzalez-Andujar, J. L., Leon, R. G., Neve, P., Poggio, S. L., Schutte, B. J., Somerville, G. J., Werle, R., & Van Acker, R. (2020). Simulation models on the ecology and management of arable weeds: Structure, quantitative insights, and applications. *Agronomy*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy10101611>. EDN: <https://elibrary.ru/ARPWQE>
4. Bouranis, D. L., Gasparatos, D., Zechmann, B., Bouranis, L. D., & Chorianopoulos, S. N. (2019). The effect of granular commercial fertilizers containing elemental sulfur on wheat yield under mediterranean conditions. *Plants*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/plants8010002>
5. Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2012). Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.008>
6. Elgadi, J. A. (2019). Calibration and Validation of the DSSAT Model with Experimental Data for Three Varieties of Wheat on Different Planting Dates. *Journal of Misurata University for Agricultural Sciences*, 1. <https://doi.org/10.36602/jmuas.2019.v01.01.10>
7. Green, R. E., & Loague, K. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7(1-2).

8. Hoogenboom, G., Jones, J. W., Traore, P. C. S., & Boote, K. J. (2012). Experiments and Data for Model Evaluation and Application. In *Improving Soil Fertility Recommendations in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2960-5_2
9. Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Boote, K. J., Singh, U., Uryasev, O., & Bowen, W. T. (2004). Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0. University of Hawaii, Honolulu, HI (CD-ROM).
10. Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Shelia, V., Wilkens, P. W., Singh, U., White, J. W., Asseng, S., Lizaso, J. I., Moreno, L. P., Pavan, W., Ogoshi, R., Hunt, L. A., Tsuji, G. Y., & Jones, J. W. (2019). The DSSAT crop modeling ecosystem. <https://doi.org/10.19103/as.2019.0061.10>
11. Hunt, L. A., Pararajasingham, S., Jones, J. W., Hoogenboom, G., Imamura, D. T., & Ogoshi, R. M. (1993). GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agronomy Journal*, 85(5). <https://doi.org/10.2134/ agronj1993.00021962008500050025x>
12. Ibrahim, O. M., Gaafar, A. A., Wali, A. M., Tawfik, M. M., & El-Nahas, M. M. (2016). Estimating cultivar coefficients of a spring wheat using GenCalc and GLUE in DSSAT. *Journal of Agronomy*, 15(3). <https://doi.org/10.3923/ja.2016.130.135>
13. Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. The DSSAT cropping system model. www.elsevier.com/locate/eja.
14. Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003a). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4). [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
15. Jones, J. W., Porter, C. H., Batchelor, W., Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003b). DSSAT v4, cropping system simulation model Advanced Computer Technologies for Integrated Agro-Hydrologic Systems Modeling: Coupled Crop and Hydrologic Models for Agricultural Intensification Impacts Assessment View project AgMIP-Agricultural Model intercomparison & improvement program View project The DSSAT cropping system model. <https://www.researchgate.net/publication/285807899>. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
16. Kheir, A. M. S., Ding, Z., Ali, M. G. M., Feike, T., Abdelaal, A. I. N., & Elnashar, A. (2020). Wheat Crop Modelling for Higher Production. In *Systems Modeling*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4728-7_6
17. Meus, L. D., Quintero, C. E., Ribas, G. G., Silva, M. R. da, Streck, N. A., Alberto, C. M., Zamero, M. de los Á. A., & Zanon, A. J. (2022). Evaluating crop models to

- assess rice yield potential in Argentina. *Crop and Environment*, 1(3). <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.08.002>. EDN: <https://elibrary.ru/LXVYNL>
18. Otter, S., & Ritchie, J. T. (1985). Validation of the Ceres-Wheat Model in Diverse Environments. In *Wheat Growth and Modelling*. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3665-3_28
 19. Rapant, P., & Kolejka, J. (2021). Dynamic pluvial flash flooding hazard forecast using weather radar data. *Remote Sensing*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/rs13152943>. EDN: <https://elibrary.ru/WNSJAB>
 20. Saquee, F. S., Diakite, S., Kavhiza, N. J., Pakina, E., & Zargar, M. (2023). The Efficacy of Micronutrient Fertilizers on the Yield Formulation and Quality of Wheat Grains. *Agronomy*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy13020566>. EDN: <https://elibrary.ru/YOGWVZ>
 21. Seidel, S. J., Palosuo, T., Thorburn, P., & Wallach, D. (2018). Towards improved calibration of crop models – Where are we now and where should we go? *European Journal of Agronomy*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.006>
 22. Stockl, F. A., Dolmetsch, A. M., Saornil, M. A., Font, R. L., & Burnier, M. N. (1997). Orbital granulocytic sarcoma. *British Journal of Ophthalmology*, 81(12). <https://doi.org/10.1136/bjo.81.12.1084>
 23. Thorp, K. R., DeJonge, K. C., Marek, G. W., & Evett, S. R. (2020). Comparison of evapotranspiration methods in the DSSAT Cropping System Model: I. Global sensitivity analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105658>. EDN: <https://elibrary.ru/PGAFCF>
 24. UZUN, A., & USTAOĞLU, B. (2022). The Effects of Atmospheric Oscillations on Crop (Olive, Grape and Cotton) Yield in the Eastern Part of the Mediterranean Region, Turkey. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9(1). <https://doi.org/10.30897/ijgeo.1010181>. EDN: <https://elibrary.ru/OMYZAA>
 25. Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'Donnell, J., & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(5). <https://doi.org/10.1029/jc090ic05p08995>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Shimendi Gde Okbagabir

RUDN University

8, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation

shimendigde@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8937-9230>

Ali Hassouni*College of Agriculture, Misan University**Misan, Iraq**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2687-3638>***Mohammed H. Al-Mamoori***RUDN University**8, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation**madi0981@gmail.com**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0299-2608>***Yuqing Wang***RUDN University**8, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation**1515208408@qq.com***A.A. Ahmed***Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy**49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation***Elena N. Pakina***RUDN University**8, Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russian Federation**pakina-en@rudn.ru**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6493-6121>*

Поступила 21.08.2025

После рецензирования 17.11.2025

Принята 12.12.2025

Received 21.08.2025

Revised 17.11.2025

Accepted 12.12.2025

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1452](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1452)EDN: [AIQDUT](https://www.edn.ru/AIQDUT)

УДК 631.531.02:634.76



Эффективность черенкования и экономическая оценка производства посадочного материала голубики в необогреваемой теплице

Г.С. Gabrielyan¹, Г.А. Унанян¹, К.А. Маргарян¹,
А.А. Манвелян¹, М.А. Казарян^{1,2}, Ж.А. Акопян³

¹Национальный аграрный университет Армении, Ереван, Республика Армения

²Научный центр оценки и анализа рисков в области безопасности пищевой
продукции, Министерство экономики, Ереван, Республика Армения

³Институт ботаники им. А. Тахтаджяна НАН РА, Ереван, Республика Армения

Аннотация

Обоснование. Размножение высокорослой голубики *Vaccinium corymbosum* L. черенками остается одним из наиболее эффективных и экономически целесообразных методов получения посадочного материала. Учитывая возрастающий интерес к голубике в Армении, актуальной задачей является отбор и адаптация перспективных сортов данной культуры для локальных условий и оптимизация технологии их размножения.

Цель. Целью исследования является разработка и внедрение эффективных технологий размножения голубики различных сортов полуодревесневшими и одревесневшими черенками для получения качественного автокорневого посадочного материала в сокращенные сроки. Это позволит создать условия для организации локального производства посадочного материала, обеспечивающего продуктивные и экономически эффективные плантации как в открытом, так и в защищенном грунте. В разрабатываемые технологии интегрируется применение препарата «Корневин» и микоризных грибов, что повышает коэффициент размножения и обеспечивает высокий выход укоренённых черенков в неотапливаемой теплице.

Материалы и методы. Для исследования были отобраны сорта 'Duke', 'Legacy', 'Patriot', 'Reka', 'Bluegold' высокорослой голубики с учётом агрономических характеристик, зимостойкости, потенциальной урожайности и адаптации к условиям Армении. Укоренение проводилось в условиях пленочной неотапливаемой теплицы. Использовались полуодревесневшие и одревесневшие черенки. В качестве стимуляторов применялись препараты «Корневин» и биофунгициды на основе микоризных

грибов. Оценивались параметры выживаемости, интенсивности корнеобразования, а также влияние сезона посадки (весна, осень) и диаметра черенка.

Результаты. Проведенные исследования влияния сортовых и морфологических особенностей черенков голубики, сезона посадки и способов укоренения на выживаемость посадочного материала, показали, что сорта 'Patriot', 'Duke', и 'Legacy' обладают наилучшими характеристиками для размножения в условиях неотапливаемой пленочной теплицы. Эти сорта отличаются высоким вегетативным ростом, хорошей укореняемостью как при весенней, так и осенней посадке, активным образованием побегов и мощной корневой системой. Использование стимулятора "Корневин" в комбинации с грибными препаратами способствовало увеличению укореняемости черенков и общей рентабельности. Сорта 'Reka' и 'BlueGold' показали более слабое развитие, однако также могут использоваться в производстве. Наиболее перспективными для промышленного размножения признаны сорта 'Patriot', 'Duke' и 'Legacy'.

Заключение. Проведенные исследования подтвердили возможность эффективного выращивания саженцев голубики высокорослой сортов 'Patriot', 'Duke', 'Legacy', 'Reka' и 'BlueGold' в условиях неотапливаемой пленочной теплицы. Разработанная технология, включающая весенне-осенние сроки черенкования и использование препарата "Корневин" в комбинации с грибными биопрепаратами обеспечивает получение качественного посадочного материала и может быть рекомендована для широкого внедрения в производственную практику.

Ключевые слова: голубика высокорослая; *Vaccinium corymbosum* L.; размножение; укоренение; сорта; посадочный материал; выращивание в теплицах

Для цитирования. Габриелян, Г. С., Унанян, Г. А., Маргарян, К. А., Манвелян, А. А., Казарян, М. А., & Акопян, Ж. А. (2026). Эффективность черенкования и экономическая оценка производства посадочного материала голубики в неотапливаемой теплице. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 353–373. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1452>

Cutting propagation efficiency and economic evaluation of blueberry planting material production in an unheated greenhouse

**G.S. Gabrielyan¹, G.H. Hunanyan¹, K.A. Margaryan¹,
A.A. Manvelyan¹, M.H. Ghazaryan^{1,2}, J.A. Akopian³**

¹National Agrarian University of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

²Food Safety Risk Analysis and Assessment Research Center, Ministry of Economy,
Yerevan, Republic of Armenia

³A. Takhtajan Institute of Botany NAS RA, Yerevan, Republic of Armenia

Abstract

Background. Propagation of highbush blueberry *Vaccinium corymbosum* L. by cuttings remains one of the most effective and economically feasible methods of obtaining

planting material. Given the growing interest in blueberries in Armenia, an urgent task is the selection and adaptation of promising varieties of this crop for local conditions and the optimization of their propagation technology.

Purpose. The aim of the study is to develop and implement effective technologies for propagating various blueberry varieties using semi-woody and woody cuttings to produce high-quality self-rooted planting material in a shorter timeframe. This will facilitate local production of planting material, ensuring productive and cost-effective plantations in both open and protected soil. The developed technologies integrate the use of “Kornevin” and mycorrhizal fungi, which increases the propagation coefficient and ensures a high yield of rooted cuttings in an unheated greenhouse.

Materials and methods. The following varieties of highbush blueberry were selected for the study: ‘Duke’, ‘Legacy’, ‘Patriot’, ‘Reka’, ‘Bluegold’, taking into account their agronomic characteristics, winter hardiness, potential yield and adaptation to the conditions of Armenia. Rooting was carried out in a film unheated greenhouse. Semi-lignified and lignified cuttings were used. The preparations “Kornevin” and bio-fungicides based on mycorrhizal fungi were used as stimulants. The parameters of survival, root formation intensity, as well as the influence of the planting season (spring, autumn) and the diameter of the cutting were assessed.

Results. The conducted studies of the influence of varietal and morphological features of cuttings, planting season and rooting methods on the survival of planting material showed that blueberry varieties ‘Patriot’, ‘Duke’, and ‘Legacy’ have the best characteristics for propagation in an unheated film greenhouse. These varieties were characterized by high vegetative growth, good rooting both during spring and autumn planting, active formation of shoots and a powerful root system. The use of the stimulator “Kornevin” in combination with fungal preparations contributed to an increase in the rooting of cuttings and overall profitability. The varieties ‘Reka’ and BlueGold showed weaker development, but can also be used in production. The most promising for industrial propagation are the varieties ‘Patriot’, ‘Duke’ and ‘Legacy’.

Conclusion. The conducted studies confirmed the possibility of effective cultivation of seedlings of the varieties ‘Patriot’, ‘Duke’, ‘Legacy’, ‘Reka’ and BlueGold of highbush blueberry in the conditions of an unheated film greenhouse. The developed technology, including spring-autumn terms of cuttings and the use of the preparation “Kornevin” in combination with fungal biopreparations, ensures the production of high-quality planting material and can be recommended for wide implementation in production practice.

Keywords: highbush blueberry; *Vaccinium corymbosum* L.; propagation; rooting; cultivars; planting material; greenhouse cultivation

For citation. Gabrielyan, G. S., Hunanyan, G. H., Margaryan, K. A., Manvelyan, A. A., Ghazaryan, M. H., & Akopian, J. A. (2026). Cutting propagation efficiency and

economic evaluation of blueberry planting material production in an unheated greenhouse. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 353–373. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1452>

Введение

Культивирование голубики (*Vaccinium* spp., *Ericaceae*) в Республике Армения приобретает всё большую актуальность. Впервые голубика была интродуцирована в Армению в 2018 году как высокоценная плодовая культура с большим агроэкономическим потенциалом. В последние годы наблюдается устойчивый спрос на её ягоды, как свежие, так и переработанные, благодаря выраженным диетическим и лечебным свойствам. В некоторых зонах высокогорного плодоводства Армении уже заложены насаждения с холодостойкими сортами голубики ‘Duke’, ‘Legacy’ селекции высокорослой голубики (*Vaccinium corymbosum* L.) [18]. Однако разработки, касающиеся технологии размножения и выращивания данной культуры в условиях защищённого грунта (теплице) находятся на начальной стадии. В настоящее время основная масса посадочного материала голубики импортируется, поскольку местные питомники ранее не занимались вегетативным размножением этого растения.

К основным методам выращивания голубики относятся выращивание в открытом грунте, в контейнерах, а также в защищенном грунте, например, в теплицах [1-3; 15]. Для всех методов технологическими приемами являются такие как создание кислых субстратов с pH 4.0 5.0, обеспечение достаточного полива, регулярная обрезка, правильное опыление и мульчирование приствольного круга, развитие мочковатой корневой системы и формирование симбиотических связей с микоризными грибами. В условиях глобальных климатических изменений, характеризующихся повышением среднегодовой температуры и увеличением частоты экстремальных погодных явлений, использование эрикоидных микоризных грибов и бактерий-стимуляторов роста растений (PGPB) представляет перспективное направление для повышения термоустойчивости голубики и улучшения качественных характеристик плодов [11; 15; 20]. В связи с этим актуализируется использование симбиотических микроорганизмов, которые могут повысить адаптивные возможности голубики к экстремальным условиям. В агротехнической практике важное значение придается использованию почвенных субстратов, насыщенных органическими компонентами, особенно гумусом, а также оптимизации доз минеральных удобрений, преимущественно калийных солей, для повышения урожайности и качества

ягод [21]. Контейнерное выращивание голубики как перспективная технология позволяет осуществлять контроль над фотосинтетической реакцией различных сортов, а также над кислотностью субстрата, режимом дренажа и содержанием органического вещества, что способствует раннему вступлению в плодоношение и повышению хозяйственной эффективности [16].

Особое внимание в современных агротехнологиях уделяется вопросам эффективного вегетативного размножения культуры. Среди доступных методов размножения голубики – деление куста, размножение отводками, корневыми отпрысками, прививка и клональное микроразмножение. Наиболее распространенным и эффективным методом остается укоренение зеленых, полуодревесневших и одревесневших черенков [4; 6; 8]. Укореняемость зеленых черенков голубики является генетически детерминированным признаком и варьирует в зависимости от сорта от 48 до 87%, установлена положительная корреляция между способностью к ризогенезу и биометрическими параметрами растений [4; 6]. Для промышленного выращивания сортов голубики высокорослой *V. corymbosum* целесообразно применять размножение одревесневшими или зелеными черенками, что обеспечивает получение генетически однородных саженцев, сохраняющих сортовую принадлежность, по своим хозяйственно ценным признакам не отличающихся от материнских растений [8]. При этом необходимо учитывать сроки заготовки черенков, условия их хранения, режим укоренения, минеральное питание, адаптацию растений и условия их пересадки, меры по защите от болезней. Существенным аспектом успешного выращивания является фитосанитарный контроль посадочного материала, который предполагает систематический мониторинг вредных организмов и внедрение профилактических мер, направленных на предотвращение снижения продуктивности в связи с патогенами и вредителями.

Разработка методов вегетативного размножения является ключевым условием формирования устойчивого локального производства высококачественного посадочного материала. Настоящее исследование направлено на создание и внедрение эффективных технологий размножения голубики различных сортов с использованием полуодревесневших и одревесневших черенков для получения качественного автокорневого материала в сокращённые сроки. В условиях плёночной неотапливаемой теплицы проведена комплексная оценка укореняемости черенков пяти сортов высокорослой голубики – ‘Duke’, ‘Legacy’, ‘Patriot’, ‘Reka’ и ‘Bluegold’. Изучено влияние сортовых особенностей, морфофизиологических характеристик черенков,

сроков посадки (весна и осень), диаметра побегов, а также применения стимуляторов корнеобразования («Корневин», микоризные биопрепараты) на выживаемость и экономическую эффективность размножения. Обработка черенков препаратом «Корневин» и использование микоризных грибов повышают коэффициент размножения, расширяют зону корнеобразования и обеспечивают высокий выход укоренённых растений в условиях неотапливаемой теплицы.

Впервые в Армении в условиях защищённого грунта проведена комплексная оценка выживаемости черенков голубики в зависимости от состава субстрата, концентрации регулятора роста, сроков заготовки и морфометрических параметров посадочного материала. Разработана технология размножения различных сортов голубики с использованием полудревесневших и одревесневших черенков в контролируемых условиях. Реализация данных методов создаёт предпосылки для формирования локальных заготовительных и производственных систем, обеспечивающих создание высокоэффективных и устойчивых к климатическим стрессам плантаций как в открытом, так и в защищённом грунте. Оптимизация технологии размножения голубики в условиях Армении снижает зависимость от импортного посадочного материала и способствует формированию локальной системы его производства, пригодной для интенсивного и устойчивого земледелия в условиях изменяющегося климата.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились в условиях необогреваемой пленочной теплицы в два периода: весной (2021–2022 гг.) и с конца лета до ранней осени (2021–2022 гг.). Изучение охватывало различные сорта высокорослой голубики, отобранные по основным отличительным признакам [19], агрономическим характеристикам, коммерческой значимости, зимостойкости, потенциальной урожайности и адаптации к условиям Армении:

‘Duke’ – раннеспелый сорт американской селекции, высота куста 1.8–2.0 м, ягоды диаметром 17–20 мм, урожайность 6–8 кг/куст морозоустойкость до -34°C , самоопыляемый.

‘Legacy’ – позднеспелый сорт, высота до 2 м, высокоурожайный, ягоды плотные, транспортабельные, диаметр до 20 мм, урожайность высокая, морозоустойчив до -23°C .

‘Patriot’ – ране-среднеспелый, морозостойкий сорт, ягоды крупные, (2–3 г), светло-голубые, урожайность 4–5 кг/куст, устойчив к корневым гнилям, лучше плодоносит при перекрестном опылении.

'Reka' – раннеспелый сорт из Новой Зеландии, высота куста до 2м, ягоды весом 1.6–2.0г, морозостойкость до -35°C , урожайность 6–10кг/куст, частично самоплодный.

'Bluegold' – среднеспелый сорт, куст высотой 1.2–1.5м, ягоды до 3г, пригоден для механизированного сбора, урожайность 4,5–7кг/куст, морозостойкость до -34°C , отличается высокой антиоксидантной активностью.

Каждый сорт испытывался в трёх повторностях, по 5 черенков в каждой (всего 15 черенков на сорт).

Эксперименты включали весеннюю, летнюю и осеннюю посадки черенков. Применялись две схемы обработки регуляторами роста: обработка порошкообразным препаратом "Корневин" (без фунгицидного компонента) и комбинированная обработка "Корневин" и микробиологическим препаратом на основе симбиотических грибов.

Подготовка черенков и субстрата. После заготовки черенки измеряли по диаметру и сортировали. Обработка проводилась препаратом «Корневин» (на основе индолилмасляной кислоты с микроэлементами): (1) в форме порошка – нанесение непосредственно при посадке, (2) в виде 0,05%-го водного раствора (5 г/л) – внесение через 12 часов после посадки и далее трижды в неделю.

Черенки высаживали в контейнеры, заполненные субстратом (50% торф, 40% песок, 10% перлит), при глубине слоя 20–30 см. Посадка производилась на глубину 3 см, субстрат предварительно обеззараживали 1–2% раствором перманганата калия, после чего выдерживали под полиэтиленовой плёнкой 24 часа и промывали дистиллированной водой (четырёхкратное промывание по 3 мин.). Расположение черенков – по схеме 18×18см (30 черенков на 1 м² или 0,0324 м² на черенок). В период укоренения черенки поливались 1–2% раствором перманганата калия (еженедельно). Для поддержания необходимого уровня pH (4,0–4,5) субстрат окисляли раствором лимонной или уксусной кислоты (30 г/л), вносимым каждые два дня.

Условия среды и микоризная инокуляция. Укоренение проходило при естественных тепличных условиях температура воздуха в пределах 20–25°C, влажность –65–75 %. Для стимулирования симбиотических взаимодействий в субстрат вносились споры арбускулярных микоризных грибов (150–200 мл на растение), размещаемые на глубину 10–15 см [15].

Сбор данных и статистическая обработка. Оценка эффективности укоренения проводилась на основании следующих параметров: процент укоренившихся черенков; развитие побегов и корней (длина, ветвистость);

экономические показатели: себестоимость, прибыль, рентабельность. После завершения укоренения проводились биометрические измерения (диаметр черенка, морфология корней). В течение вегетационного периода оценивалась динамика роста и формирование посадочного материала. Использовались методические рекомендации Мичуринского НИИ садоводства 1973 [7].

Основными показателями служили: доля укоренившихся черенков (%); длина и развитие побегов и корней; экономические параметры: себестоимость, прибыль, рентабельность.

Для статистической обработки использовали двухфакторный дисперсионный анализ [13; 14]. Относительная ошибка эксперимента составила $S_{\chi_0\%}=4,06\%$, наименьшее значимое различие ($H3P_{05}$)—8.92. По сравнению с общим средним значением (22.16), различия по сортам и вариантам обработки (“Корневин” и “Корневин” + микориза) оказались статистически достоверными на уровне 95%. Количество посадочного материала определялось в соответствии с действующим стандартом (<https://internet-law.ru/gosts/gost/80825/>).

Фитосанитарный мониторинг. В вегетационном периоде 2021–2022 гг. проводились обследования на наличие вредных организмов. Образцы фитофагов и патогенов собирали с листьев, побегов и корней голубики на разных этапах развития растений. Образцы фиксировали по стандартным энтомологическим методикам, маркировали и идентифицировали до видового уровня с использованием специализированных определителей [5; 17].

Экономическая оценка. Для определения экономической оценки каждого метода размножения рассчитывались: суммарные затраты на производство; выручка от реализации посадочного материала; уровень рентабельности. Оценка выполнялась по общепринятым методикам анализа производственной эффективности в растениеводстве [9; 12].

Результаты исследования и обсуждение

Влияние методов обрезки черенков на урожайность у маточных растений. Обрезка является важнейшим агротехническим приёмом, регулирующим рост растений и повышающим выход посадочного материала. В данном исследовании на маточных растениях пяти сортов голубики, выращиваемых в клоновом саду, применяли два уровня обрезки: умеренную (укорачивание на 30%) и интенсивную (укорачивание на 60%). Черенки заготавливали после осенней и весенней обрезки и оценивали их продуктивность.

Таблица 1.

Влияние типа обрезки на количество черенков с куста и с 1 гектара**Table 1. Effect of pruning type on the number of cuttings per bush and per hectare**

Сорт	Тип обрезки: процент (%) укорачивания	Черенков с куста	Черенков с гектара
<i>Patriot</i>	30%	2	6666
	60%	4	13332
<i>Legacy</i>	30%	2	6666
	60%	3	9999
<i>Duke</i>	30%	2	6666
	60%	4	13332
<i>Reka</i>	30%	1	3333
	60%	3	9999
<i>BlueGold</i>	30%	1	3333
	60%	2	6666

Растения располагались плотностью 2.0×1.5 м (3333 растения/га). Среди всех сортов наибольшее количество черенков обеспечил сорт '*Patriot*', при интенсивной обрезке достигая 13332 черенка/га. В целом, более глубокая обрезка (60%) способствовала активному отрастанию побегов и увеличению выхода пригодных черенков по сравнению с умеренной (30%). Это объясняется усиленной стимуляцией спящих почек и усиленным образованием побегов. Сорт '*BlueGold*' стабильно давал наименьший выход черенков, что объясняется его медленным ростом, а также высокой чувствительностью к стрессам окружающей среды. Повреждение побегов после обрезки, вызванное морозами, снижало их регенерацию. В то же время сорта '*Patriot*', '*Duke*' и '*Legacy*' проявили устойчивость к морозам и хорошую восстановительную способность, что положительно сказалось на результатах обрезки.

Влияние диаметра черенков и сроков заготовки на способность к укоренению. Диаметр черенка голубики играет ключевую роль в его способности к укоренению. В таблице 2 представлены средние значения диаметра полуодревесневших (августовских) и полностью одревесневших черенков (весна и осень) по сортам.

Полуодревесневшие черенки, заготовленные в конце июля–начале августа, имели меньший диаметр по сравнению с одревесневшими, заготовленными весной и осенью. Сорта '*Patriot*' и '*Duke*' сформировали наиболее толстые черенки, что отражает их высокую силу роста. У '*BlueGold*' черенки были самыми тонкими, что частично объясняет низкий процент укоренения.

Таблица 2.

Средний диаметр (см) полуодревесневших и одревесневших черенков**Table 2. Average diameter (cm) of semi-woody and woody cuttings**

Сорт	Полуодревесневшие (август) Диаметр (см)	Одревесневшие (весна/осень) Диаметр (см)
<i>Patriot</i>	1.0–1.3	1.8–2.0
<i>Duke</i>	1.0–1.3	1.6–1.8
<i>Legacy</i>	1.0–1.2	1.6–1.8
<i>Reka</i>	1.0–1.2	1.4–1.6
<i>Blue Gold</i>	0.6–0.8	1.2–1.4

Укоренение полуодревесневших и одревесневших черенков. Добавление арбускулярных микоризных грибов к стимулятору укоренения “Корневин” значительно повысило успех укоренения. Без грибов укореняемость составляла 40–67%, с микоризой – до 87–93%. Наилучшие результаты показали сорта ‘*Patriot*’ и ‘*Duke*’.

Таблица 3.

Укореняемость полуодревесневших и одревесневших черенков (среднее за 2021–2022 гг., по 15 черенков на вариант)**Table 3. Rooting rates of semi-woody and woody cuttings (average for 2021–2022, 15 cuttings per treatment)**

Сорт	“Корневин”			“Корневин” + Микориза		
	Полуодревесневшие черенки		Одревесневшие черенки	Полуодревесневшие черенки		Одревесневшие черенки
	июль-август	сентябрь	март	июль-август	сентябрь	март
<i>Patriot</i>	10	10	12	14	14	14
<i>Duke</i>	10	8	12	14	11	13
<i>Legacy</i>	8	7	11	14	10	13
<i>Reka</i>	6	7	10	13	9	12
<i>BlueGold</i>	6	6	10	13	5	11

Укоренение полуодревесневших и одревесневших черенков посаженных весной и осенью. Весенняя посадка показала лучшие результаты укоренения одревесневших черенков, особенно при использовании микоризы. Время заготовки черенков и применение биостимуляторов существенно влияют на успех укоренения. Полуодревесневшие черенки, заготовленные в августе, показали более высокую укореняемость, особенно в сочетании с микоризой. Сорта с высоким потенциалом роста (‘*Patriot*’, ‘*Duke*’) превосходили другие по укоренению, что коррелирует с большей толщиной

черенков и лучшей устойчивостью к стрессам. Интенсивная обрезка (60%) увеличила выход черенков по сравнению с умеренной (30%), что подтверждает ранее полученные данные о стимулирующем влиянии глубокой обрезки на активацию почек. Комбинация “Корневина” и микоризных грибов значительно повысила укореняемость черенков. Микориза улучшала поглощение питательных веществ и развитие корневой системы, особенно в кислых субстратах, благоприятных для голубики. Полученные данные могут быть использованы для создания ускоренных систем размножения голубики в питомниках Армении и снизить зависимость от импортного посадочного материала. Ключевыми факторами успешного размножения являются: подбор сорта, режим обрезки, тип черенка и улучшенные условия укоренения [10].

Получение посадочного материала. Через 2-3 месяца после посадки черенков определялось количество и процент полученного посадочного материала.

Таблица 4.

**Количество и процент саженцев голубики
(из количества посаженных черенков)**
Table 4. Number and Percentage of Blueberry Seedlings
(out of the total number of cuttings planted)

Сорт	“Корневин”: саженцы–количество, (%)			“Корневин”+ Микориза: Саженцы–количество, (%)		
	летняя посадка 10.08.2022	осенняя посадка) 23.09.2022	весенняя посадка 26.03.2022	летняя посадка 10.08.2022	осенняя посадка 23.09.2022	весенняя посадка 26.03.2022
<i>Patriot</i>	8 (53,3 %)	6(40,0 %)	7 (46,7 %)	10 (66,7 %)	7 (46,6%)	11 (73,3 %)
<i>Duke</i>	9 (60,0 %)	4(26,7%)	9 (60,0 %)	11 (73,3 %)	6(40,0%)	12 (80,0 %)
<i>Legacy</i>	5 (33,3 %)	4(26,7%)	9 (60,0 %)	12 (80,0 %)	6 (40,0%)	11 (73,3 %)
<i>Reka</i>	3 (20,0 %)	4(26,7%)	6 (40,0 %)	6 (40,0 %)	4 (26,6%)	8 (53,3 %)
<i>BlueGold</i>	3 (20,0 %)	1(6,6%)	6 (40,0 %)	6 (40,0 %)	4(26,6%)	8 (53,3 %)

У всех сортов голубики наблюдалось улучшение результатов при использовании комбинации стимулятора “Корневина” и микоризных грибов. Особенно это актуально для трудноукореняемых сортов, таких как *Reka* и *BlueGold*. У сорта ‘*Legacy*’ процент саженцев увеличился с 33,3 % до 80,0 %. У *BlueGold* показатель вырос с 20,0 % до 40,0 %, а количество саженцев выросло с 1 до 4 в осенний период. Сорта ‘*Duke*’ и ‘*Legacy*’ демонстрировали стабильную и высокую эффективность при обоих вариантах обработки, подтверждая свои особенности легко укореняемых сортов.

Сорт *'Patriot'* также показал хорошие результаты, вероятно, благодаря высокой стрессоустойчивости и активному росту. Сорта *'Reka'* и *'BlueGold'* оказались сложнее в укоренении, что может быть связано с их слабым ростом и меньшим диаметром черенков. Тем не менее, *'BlueGold'* заметно улучшил показатель укоренения при добавлении грибов, что указывает на эффективность комплексной стимуляции. Наибольший успех укоренения наблюдался при весенних и раннелетних сроках посадки в условиях неотапливаемой теплицы, покрытой плёнкой. Результаты показывают, что черенки, высаженные весной и в конце лета, демонстрировали высокую успешность укоренения для всех сортов. Эти данные также подчеркивают важность физиологического состояния черенков: летние черенки были полужелёными–полуодревесневшими, тогда как весенние – полностью одревесневшими, находились в состоянии покоя и были закалены холодом, что положительно влияло на процесс укоренения. Высокая приживаемость полужелёных черенков также может быть связана с запасами питательных веществ – липидов, углеводов и белков.

Таблица 5.

**Рост и развитие саженцев при различных сроках посадки черенков
(средние значения)**

Table 5. Growth and Development of Seedlings at Different Cuttings Planting Times
(Average Values)

Сорт	Количество зеленых побегов (шт.)	Средняя длина побега (см)	Средняя длина корня (см)
Patriot	2	8	8
Duke	2	11.5	10
Legacy	2	7	8
Reka	1	6	7
Blue Gold	1	5	6.5

Как видно из Таблицы 5, после укоренения саженцы сортов *'Patriot'*, *'Duke'* и *'Legacy'* формировали в среднем по два зелёных побега. Средняя длина побега составляла: *'Patriot'* – 8 см, *'Duke'* – 11.5 см, *'Legacy'* – 7 см. В то же время *Reka* и *'BlueGold'* формировали лишь по одному побегу длиной 6 см и 5 см соответственно. Согласно таблице 5, наибольшее развитие корневой системы наблюдалось у сорта *'Duke'* (10.0 см), далее следуют *'Patriot'* и *'Legacy'* (по 8.0 см), *'Reka'* (7.0 см) и *'BlueGold'* (6.5 см). Саженцы формировали мочковатые корни, процесс укоренения происходил поэтапно: сначала наблюдалось образование каллуса, затем появление бе-

лых или светло-копичневых корней, после чего развивались темно-коричневые активные корни.

Экономическая эффективность питомникового производства. Экономическая эффективность является ключевым фактором устойчивости питомниковых хозяйств. Рентабельность саженцев голубики была рассчитана на 1 м² производственной площади.

Таблица 6.

**Экономические показатели саженцев с использованием “Корневина”
(без грибного препарата)**

Table 6. Economic indicators for seedlings treated with “Kornevin” (without a fungicide)

Сорт	Саженцы на 1 м ²	Себестоимость (AMD)	Цена реализации (AMD)	Доход (AMD)	Себестоимость на одно растение (AMD)	Прибыль (AMD)	Рентабельность (%)
Patriot	21	35 000	4900	102900	1667	67900	194
Duke	22	–	4900	107800	1591	800	208
Legacy	18	–	4900	88200	1944	53200	152
Reka	13	–	4900	63 700	2692	28700	82
BlueGold	10	–	4900	49000	3500	14 000	40

Таблица 7.

**Экономические показатели саженцев с использованием «Корневина»
и грибного препарата**

Table 7. Economic indicators for seedlings treated with “Kornevin” and a fungal preparation

Сорт	Саженцы на 1 м ²	Себестоимость (AMD)	Цена реализации (AMD)	Доход (AMD)	Себестоимость на 1 растение (AMD)	Прибыль (AMD)	Рентабельность (%)
Patriot	28	40 000	4900	137200	1429	97200	243
Duke	29	–	4900	142100	1379	102100	255
Legacy	29	–	4900	142100	1379	102100	255
Reka	18	–	4900	88200	2222	48200	120,5
Blue Gold	18	–	4900	88200	2222	48200	120,5

Экономические расчёты, проведённые на 1 м² площади, показали, что наибольшую прибыль в обоих вариантах обработки дали сорта ‘Patriot’, ‘Duke’ и ‘Legacy’. Прибыль варьировала от 43700 до 48700 драм, а уровень рентабельности составил от 218,5% до 324,6%. Себестоимость одного растения для этих сортов находилась в диапазоне от 1111 до 1154

драм. В отличие от них, сорта 'Reka' и 'BlueGold' отличались более высокой себестоимостью (от 1500 до 2143 драм) и меньшей рентабельностью. Даже при добавлении грибного препарата прибыльность сорта 'BlueGold' осталась ограниченной, в то время как у 'Reka' наблюдалось умеренное улучшение показателей.

В теплицах, где выращивалась рассада голубики, было зарегистрировано и идентифицировано 4 вида вредных организмов, из них 2 вида насекомых (*Myzodes persicae* Sulz., *Operophtera brumata* Linnaeus), 1 вид клеща (*Tetranychus urticae* Koch), и 1 вид болезни (*Microsphaera vaccinii* Schwein) [5; 17]. Однако наносимый ущерб был незначительным и не имел существенного влияния на полученные результаты.

Проведенные исследования подтвердили возможность эффективного выращивания саженцев голубики высокорослой сортов 'Patriot', 'Duke', 'Legacy', 'Reka' и 'BlueGold' в условиях неотапливаемой пленочной теплицы. В результате оценки влияния сортовых и морфологических особенностей черенков голубики, сезона посадки и способов укоренения на выживаемость посадочного материала, выявлено, что сорта 'Patriot', 'Duke' и 'Legacy' обладают наилучшими характеристиками для размножения в указанных в условиях. Разработанная технология, включающая весенне-осенние сроки черенкования и использование препарата "Корневин" в комбинации с грибными биопрепаратами обеспечивает получение качественного посадочного материала голубики и может быть рекомендована для широкого внедрения в производственную практику.

Заключение

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Впервые в Армении в условиях защищенного грунта проведена комплексная оценка выживаемости черенков сортов 'Patriot', 'Duke', 'Legacy', 'Reka' и 'BlueGold' голубики высокорослой *V. corymbosum* в зависимости от состава субстрата, концентрации регуляторов роста, сроков заготовки и морфометрических параметров черенков. Разработана технология размножения с использованием полуодревесневших и одревесневших черенков в условиях неотапливаемой пленочной теплицы.

2. Сорта 'Patriot', 'Legacy' и 'Duke' продемонстрировали наилучший вегетативный рост, формируя кусты средней высоты. Сорта 'BlueGold' и 'Reka' показали сравнительно слабое развитие. Двух- и трёхлетние растения всех сортов обладали хорошим потенциалом к образованию боковых и базальных побегов (2–4 побега на куст). Сорта 'Patriot', 'Legacy' и 'Duke'

имели среднюю степень ветвления, тогда как у сортов *'Reka'* и *'BlueGold'* ветвление было ограничено.

3. Сорта *'Patriot'* и *'Duke'* отличались мощным ростом, с диаметром черенков от 1,0 до 1,3 см. Сорта *'Legacy'* и *'Reka'* образовывали черенки средней толщины (1,1–1,2 см), а у *'BlueGold'* черенки были самыми тонкими (0,6–0,8 см), что отражает его слабую силу роста. Весенние черенки были, как правило, толще: *'Patriot'* (1,8–2,0 см), *'Duke'* и *'Legacy'* (1,6–1,8 см), *'Reka'* (1,4–1,6 см), *'BlueGold'* (1,2–1,4 см).

4. Укореняемость – осенняя посадка (“Корневин” + грибы): наибольшее количество укоренившихся черенков отмечено у сорта *'Patriot'* (12), затем у *'Duke'* (11), *'Legacy'* (10), *'Reka'* (9), *'BlueGold'* (5).

5. Укореняемость – весенняя посадка (“Корневин” + грибы): сорт *Patriot* показал наилучшую укореняемость в весенних условиях. *'BlueGold'* продемонстрировал наименьшую укореняемость, что может быть связано с его слабым ростом, повреждениями от заморозков и несоответствием черенков стандартным требованиям.

6. Образование побегов после укоренения: у сортов *'Patriot'*, *'Duke'* и *'Legacy'* в среднем формировалось по два зелёных побега на черенок. Их средняя длина составляла 8,0 см, 11,5 см и 7,0 см соответственно. У сортов *Reka* и *BlueGold* наблюдался только один побег длиной 6,0 см и 5,0 см соответственно.

7. Развитие корневой системы: наиболее мощные корни сформировались у сорта *'Duke'* (средняя длина – 10,0 см), за ним следовали *'Patriot'* и *'Legacy'* (по 8,0 см), *'Reka'* (7,0 см) и *'BlueGold'* (6,5 см).

8. Самые высокие показатели рентабельности показали сорта *'Duke'*, *'Patriot'* и *'Legacy'*. Использование грибного препарата существенно повышает экономическую отдачу.

На основе полученных данных рекомендуется: отдавать предпочтение весенним и осенним срокам посадки исследованных сортов голубики; использовать в качестве стимулятора укоренения препарат “Корневин” в комбинации с грибными препаратами; применять данную технологию размножения для эффективного получения посадочного материала сортов *'Patriot'*, *'Duke'*, *'Legacy'*, *'Reka'* и *'BlueGold'*. Изученные сорта рекомендованы для промышленного размножения, с приоритетом на сорта *'Duke'*, *'Patriot'* и *'Legacy'* по укореняемости и прибыльности.

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

Список литературы

1. Абиева, Ю. А., & Рязанова, Л. Г. (2018). Изучение интродуцированных сортов голубики в условиях Южного региона. *Вестник научно-технического творчества молодежи Кубанского ГАУ*, 210–213. EDN: <https://elibrary.ru/FAZXRJ>
2. Война, В. В. (2025). *Промышленное выращивание голубики: от посадки до урожая*. ЛитРес. 25 с. ISBN 978-5-04-734851.
3. Гладкова, Л. И. (1974). *Выращивание голубики и клюквы. Обзор*. ВНИИТЭИСХ. С. 5–36.
4. Дрозд, О. В. (2023). Регенерационная способность интродуцированных сортов голубики при размножении зелеными черенками в условиях Белорусского Полесья. *Земледелие и растениеводство*, (1(146)), 49–53.
5. *Определитель вредных и полезных насекомых и клещей плодовых и ягодных культур в СССР*. (1984). Колос. 288 с.
6. Павловский, Н. Б. (2010). Методы вегетативного размножения голубики высокой (*Vaccinium corymbosum* L.). *Плодоводство*, 22(1), 332–344.
7. *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур*. (1973). Министерство сельского хозяйства СССР, ВНИИ садоводства им. И. В. Мичурина. 493 с.
8. Радкевич, Т. В. (2024). Способы вегетативного размножения голубики высоко-рослой. *Плодоводство*, 36, 117–125.
9. Davtyan, G. V., & Danielyan, M. A. (2007). *Methodical instructions on the economic justification of agronomic measures*. HGA. 28 p.
10. Kelso, F., Da, K., Dewey, R. E., Reiland, D. S., Almeyda, C., Liu, W., & Ashrafi, H. (2025). Optimization of adventitious shoot regeneration protocols for six *Vaccinium corymbosum* cultivars. *HortScience*, 60(7), 1109–1117. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI118509-25>. EDN: <https://elibrary.ru/YJUBIQ>
11. Fransgo, K., Lin, L. C., & Rho, H. (2024). Distinct interactions of ericoid mycorrhizae and plant growth-promoting bacteria: Impacts on blueberry growth and heat resilience. *Plant Signaling & Behavior*, 19(1), 2329842. <https://doi.org/10.1080/15592324.2024.2329842>. EDN: <https://elibrary.ru/VHZPDH>
12. Harutunyan, T. H. (2021). *Investments and investment activities*. Armenian National Agrarian University. 188 p.
13. Khachatryan, A. R. (2002). *Methods of agronomic research: Study manual*. Asoghik. 238 p.
14. Mamajanyan, S. A. (2018). *Methodology of agronomic research*. Armenian National Agrarian University. 52 p.
15. Roccuzzo, G., Stango, F., Frassinetti, C., Maltoni, M. L., Assirelli, A., Sbrighi, P., & Baruzzi, G. (2021). Effects of arbuscular mycorrhizae *Glomus iranicum* var. *Tenui-*

- hypharum on strawberry fruit yield and quality. *Acta Horticulturae*, 1309, 613–620. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.88>. EDN: <https://elibrary.ru/LSJCWT>
16. Salazar-Gutiérrez, M. R., Lawrence, K., Coneva, E. D., & Chaves-Córdoba, B. (2023). Photosynthetic response of blueberries grown in containers. *Plants*, 12(18), 3272. <https://doi.org/10.3390/plants12183272>. EDN: <https://elibrary.ru/ESZNLQ>
 17. Sial, A. (2022). *Identification and management of scale insects in blueberries*. University of Georgia Integrated Pest Management. <https://ipm.uga.edu/2022/08/05/identification-management-of-scale-insects-in-blueberries>
 18. Sumbulyan, D. S., Gasparyan, A. N., & Gabrielyan, G. S. (2022). Establishment of orchard with Duke and Legacy bilberry varieties in conditions of Bavra community of the Shirak Region. *Agriscience and Technology*, 3(79), 275–280. <https://doi.org/10.52276/25792822-2022.3-275>. EDN: <https://elibrary.ru/BCZCGT>
 19. UPOV. (2009). *Guidelines for the conduct of tests for the distinctness, uniformity and stability: Blueberry* (Document TG/137/5 Rev.). International Union for the Protection of New Varieties of Plants. 32 p.
 20. Yu, Y. Y., Xu, J. D., Huang, T. X., Zhong, J., Yu, H., Qiu, J. P., & Guo, J. H. (2020). Combination of beneficial bacteria improves blueberry production and soil quality. *Food Science & Nutrition*, 8(11), 5776–5784. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1772>. EDN: <https://elibrary.ru/TRRJRN>
 21. Zhang, X., Li, S., An, X., Song, Z., Zhu, Y., Tan, Y., Guo, X., & Wang, D. (2025). Effects of nitrogen, phosphorus and potassium formula fertilization on the yield and berry quality of blueberry. *PLOS ONE*, 20(1), e0318032. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318032>. EDN: <https://elibrary.ru/OMEEOE>

References

1. Abieva, Yu. A., & Ryazanova, L. G. (2018). Study of introduced blueberry cultivars under conditions of the Southern region. *Bulletin of Scientific and Technical Creativity of Youth of Kuban State Agrarian University*, 210–213. EDN: <https://elibrary.ru/FAZXRJ>
2. Voyna, V. V. (2025). *Industrial cultivation of blueberry: from planting to harvest*. LitRes. 25 p. ISBN 978-5-04-734851.
3. Gladkova, L. I. (1974). *Cultivation of blueberry and cranberry. A review*. VNI-ITEISKh. pp. 5–36.
4. Drozd, O. V. (2023). Regeneration capacity of introduced blueberry cultivars propagated by green cuttings under conditions of Belarusian Polesie. *Agriculture and Crop Production*, 1(146)), 49–53.
5. *Key to harmful and beneficial insects and mites of fruit and berry crops in the USSR*. (1984). Kolos. 288 p.
6. Pavlovsky, N. B. (2010). Methods of vegetative propagation of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Fruit Growing*, 22(1), 332–344.

7. *Program and methodology for variety study of fruit, berry and nut crops.* (1973). Ministry of Agriculture of the USSR, All-Union Research Institute of Horticulture named after I. V. Michurin. 493 p.
8. Radkevich, T. V. (2024). Methods of vegetative propagation of highbush blueberry. *Fruit Growing*, 36, 117–125.
9. Davtyan, G. V., & Danielyan, M. A. (2007). *Methodical instructions on the economic justification of agronomic measures*. HGA. 28 p.
10. Kelso, F., Da, K., Dewey, R. E., Reiland, D. S., Almeyda, C., Liu, W., & Ashrafi, H. (2025). Optimization of adventitious shoot regeneration protocols for six *Vaccinium corymbosum* cultivars. *HortScience*, 60(7), 1109–1117. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI118509-25>. EDN: <https://elibrary.ru/YJUBIQ>
11. Fransgo, K., Lin, L. C., & Rho, H. (2024). Distinct interactions of ericoid mycorrhizae and plant growth-promoting bacteria: Impacts on blueberry growth and heat resilience. *Plant Signaling & Behavior*, 19(1), 2329842. <https://doi.org/10.1080/15592324.2024.2329842>. EDN: <https://elibrary.ru/VHZPDH>
12. Harutunyan, T. H. (2021). *Investments and investment activities*. Armenian National Agrarian University. 188 p.
13. Khachatryan, A. R. (2002). *Methods of agronomic research: Study manual*. Asoghik. 238 p.
14. Mamajanyan, S. A. (2018). *Methodology of agronomic research*. Armenian National Agrarian University. 52 p.
15. Roccuzzo, G., Stango, F., Frassinetti, C., Maltoni, M. L., Assirelli, A., Sbrighi, P., & Baruzzi, G. (2021). Effects of arbuscular mycorrhizae *Glomus iranicum* var. *Tenuihypharum* on strawberry fruit yield and quality. *Acta Horticulturae*, 1309, 613–620. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.88>. EDN: <https://elibrary.ru/LSJCWT>
16. Salazar-Gutiérrez, M. R., Lawrence, K., Coneva, E. D., & Chaves-Córdoba, B. (2023). Photosynthetic response of blueberries grown in containers. *Plants*, 12(18), 3272. <https://doi.org/10.3390/plants12183272>. EDN: <https://elibrary.ru/ESZNLQ>
17. Sial, A. (2022). *Identification and management of scale insects in blueberries*. University of Georgia Integrated Pest Management. <https://ipm.uga.edu/2022/08/05/identification-management-of-scale-insects-in-blueberries>
18. Sumbulyan, D. S., Gasparyan, A. N., & Gabrielyan, G. S. (2022). Establishment of orchard with Duke and Legacy bilberry varieties in conditions of Bavra community of the Shirak Region. *Agriscience and Technology*, 3(79), 275–280. <https://doi.org/10.52276/25792822-2022.3-275>. EDN: <https://elibrary.ru/BCZCGT>
19. UPOV. (2009). *Guidelines for the conduct of tests for the distinctness, uniformity and stability: Blueberry* (Document TG/137/5 Rev.). International Union for the Protection of New Varieties of Plants. 32 p.

20. Yu, Y. Y., Xu, J. D., Huang, T. X., Zhong, J., Yu, H., Qiu, J. P., & Guo, J. H. (2020). Combination of beneficial bacteria improves blueberry production and soil quality. *Food Science & Nutrition*, 8(11), 5776–5784. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1772>. EDN: <https://elibrary.ru/TRRJRN>
21. Zhang, X., Li, S., An, X., Song, Z., Zhu, Y., Tan, Y., Guo, X., & Wang, D. (2025). Effects of nitrogen, phosphorus and potassium formula fertilization on the yield and berry quality of blueberry. *PLOS ONE*, 20(1), e0318032. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318032>. EDN: <https://elibrary.ru/OMEEOCE>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Габриелян Гаяне Сардаровна, канд. с.-х. наук., доцент, кафедра садоводства и защиты растений
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, Республика Армения
gaygabrielyan1978@gmail.com

Унанян Гурген Айкович, магистрант
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, Республика Армения
gurgenhunan5566@mail.ru

Маргарян Карен Арменович, магистрант
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, Республика Армения
Karenmargaryan10@mail.ru

Манвелян Армине Ашотовна, канд. с.-х., наук., доцент, кафедра садоводства и защиты растений
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, Республика Армения
armjes77@mail.ru

Казарян Маргарит Акоповна, ассистент, кафедра садоводства и защиты растений

Национальный аграрный университет Армении; Научный центр оценки и анализа рисков в области безопасности пищевой продукции, Министерство экономики, Республика Армения

ул. Теряна, 74, г. Ереван, Республика Армения; Масисское шоссе, 107/2, г. Ереван, Республика Армения

мага-ghazaryan@mail.ru

Акопян Жанета Андраниковна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник

Институт ботаники им. А. Тахтаджяна НАН РА

ул. Ачаряна, 1, г. Ереван, Республика Армения

akopian_janna@inbox.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

G.S. Gabrielyan, Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Horticulture and Plant Protection

National Agrarian University of Armenia

74, Teryan Str., Yerevan, Republic of Armenia

gaygabrielyan1978@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4691-6995>

G.H. Hunanyan, master's student

National Agrarian University of Armenia

74, Teryan Str., Yerevan, Republic of Armenia

gurgenhunanyan5566@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5632-4890>

K.A. Margaryan, master's student

National Agrarian University of Armenia

74, Teryan Str., Yerevan, Republic of Armenia

Karenmargaryan10@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4089-2927>

A.A. Manvelyan, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Horticulture and Plant Protection

National Agrarian University of Armenia

74, Teryan Str., Yerevan, Republic of Armenia
armjes77@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9354-4807>

M.H. Ghazaryan, Assistant, Department of Horticulture and Plant Protection
National Agrarian University of Armenia; Food Safety Risk Analysis and Assessment Research Center, Ministry of Economy, Republic of Armenia
74, Teryan Str., Yerevan, Republic of Armenia; 107/2, Masis Highway, Yerevan, Republic of Armenia
maga-ghazaryan@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0619-1311>

J.A. Akopian, D.Sc. of Biological Sciences, Leading Scientific Researcher
A. Takhtajan Institute of Botany NAS RA
1, Acharyan Str., Yerevan, Republic of Armenia
akopian_janna@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1935-8075>

Поступила 21.09.2025
После рецензирования 30.11.2025
Принята 07.12.2025

Received 21.09.2025
Revised 30.11.2025
Accepted 07.12.2025

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1449](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1449)

EDN: [AQIGRO](https://edn.ru/AQIGRO)

UDC 632.93



Winter rye yield depending on seeding rates and precursors in the Central Non-Chernozem Region

A.S. Shkurkina¹, D.V. Vinogradov^{2,3}, T.V. Zubkova¹, K.D. Sazonkin³

¹*Yelets State University Named after I.A. Bunin, Yelets, Russian Federation*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

³*Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev,
Ryazan, Russian Federation*

Abstract

Background. The use of well-designed agrotechnical methods allows you to harvest winter rye, regardless of weather conditions, with minimal resource and labor costs. In addition, the correct choice of precursors and moisture standards on grain crops increases the efficiency of crop development, optimizes the area of nutrition and solar insolation, resistance to pests and diseases. The effectiveness of the choice of technology elements directly depends on the analysis of their application, depending on the requirements of agricultural technology, crop varieties, as well as the level of soil fertility. The issue of increasing the productivity of winter rye in the Central Non-Chernozem region, through the development and improvement of technology elements with subsequent introduction into agricultural production aimed at increasing the production of high-quality grain crops, is undoubtedly an urgent, important and promising area, which determined the implementation of these studies.

The **purpose** is to determine the efficiency of growing and productivity of winter rye depending on the complex action of precursors and the seeding rate in the Central Non-Chernozem region.

Materials and methods. The research was carried out in the period 2021-2024 in the conditions of the Domodedovo district of the Moscow region. Three variants of the precursor were studied: winter wheat (control), peas for grain, spring rapeseed and five variants of crop seeding rates. The dynamics of the development of winter rye plants against the background of the use of various precursors and seeding rates is determined; the crop structure, yield and quality indicators are determined depending on the factors studied; the economic efficiency of the proposed elements of winter rye cultivation

technology is revealed. All the studies were conducted according to generally accepted methods and the methodology of field work as described by B.A. Dospekhov.

Results. The conducted studies have shown high efficiency of placing winter rye crops after leguminous crops, especially peas for grain, as precursors. The optimal seeding rate for winter rye is 3.5–4.0 million seeds per hectare, which ensures consistently high yields. The use of appropriate agrotechnical measures contributes to the achievement of high and reliable grain harvest rates — from 50.1 to 56.5 quintals per hectare, depending on the weather conditions of a particular season. The average yield was 5.29 t/ha with 3.5 million seeds per hectare and 5.35 t/ha with an increase in crop density to 4.0 million seeds per hectare. The results obtained are recommended for practical implementation in order to increase the productivity of winter crops and optimize production costs.

Keywords: winter rye; precursor; seeding rate; grain yield; Non-Chernozem zone

For citation. Shkurkina, A. S., Vinogradov, D. V., Zubkova, T. V., & Sazonkin, K. D. (2026). Winter rye yield depending on seeding rates and precursors in the Central Non-Chernozem Region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 374–387. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1449>

Урожайность озимой ржи в зависимости от норм посева и предшественников в Центральном Нечерноземье

А.С. Шкуркина¹, Д.В. Виноградов^{2,3}, Т.В. Зубкова¹, К.Д. Сазонкин³

¹Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина,
Елец, Российская Федерация

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

³Рязанский государственный агротехнологический университет
имени П.А. Костычева, Рязань, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Применение правильно выстроенных агротехнических методов позволяет получать урожай озимой ржи, не зависимо от погодных условий, с минимальными затратами ресурсов и труда. Кроме этого, правильный выбор предшественников и норм посева на зерновых культурах повышает эффективность развития культуры, оптимизирует площадь питания и солнечной инсоляции, резистентность к вредителям и болезням. Эффективность выбора элементов технологии напрямую зависит от анализа их применения в зависимости от требований агротехнологии, сортов культуры, а также уровня плодородия почвы. Вопрос повышения продуктивности озимой ржи в Центральном Нечерноземье, за счет разработки и совершенство-

вания элементов технологии с последующим внедрением в сельскохозяйственное производство, нацеленное на увеличение получения зерна культуры высокого качества, является, несомненно, актуальным, важным и перспективным направлением, что и определило выполнение настоящих исследований.

Цель – определить эффективность выращивания и продуктивность озимой ржи в зависимости от комплексного действия предшественников и нормы высева в Центральном Нечерноземье.

Материалы и методы. Исследования выполнены в период 2021-2024 годы в условиях Домодедовского района Московская область. Изучено три варианта предшественника: озимая пшеница (контроль), горох на зерно, рапс яровой и пять вариантов норм высева культуры. Определена динамика развития растений озимой ржи на фоне использования различных предшественников и норм высева; определена структура урожая, урожайность и качественные показатели в зависимости от изучаемых факторов; выявить экономическая эффективность предлагаемых элементов технологии выращивания озимой ржи. Все исследования проведены согласно общепринятым методикам, и методике полевого дела в изложении Б.А. Доспехова.

Результаты. Проведенные исследования показали высокую эффективность размещения посевов озимой ржи после зернобобовых культур, особенно гороха на зерно, в качестве предшественников. Оптимальная норма высева озимой ржи составляет 3,5–4,0 млн семян на гектар, что обеспечивает стабильно высокий уровень урожайности. Применение соответствующих агротехнических мероприятий способствует достижению высоких и надежных показателей сбора зерна – от 50,1 до 56,5 центнеров с гектара, в зависимости от погодных условий конкретного сезона. Средний показатель урожайности составил 52,9 ц/га при посеве 3,5 млн семян на гектар и 53,5 ц/га при увеличении плотности посева до 4,0 млн семян на гектар. Полученные результаты рекомендуются для практического внедрения с целью повышения продуктивности озимых культур и оптимизации производственных затрат.

Ключевые слова: озимая рожь; предшественник; норма высева; урожайность зерна; Нечерноземная зона

Для цитирования. Шкуркина, А. С., Виноградов, Д. В., Зубкова, Т. В., & Са- зонкин, К. Д. (2026). Урожайность озимой ржи в зависимости от норм высева и предшественников в Центральном Нечерноземье. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 374–387. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1449>

Introduction

Despite the advantages of winter rye in terms of its economic, morphological, and biological characteristics, there has been a decline in the area sown with this crop in the Russian Federation [1]. At the end of the last century, winter rye

occupied 12-15 million hectares in some years, with the main areas concentrated in the Non-Chernozem, Central Black Earth, and Volga regions. Currently, crops in Russia cover less than 1 million hectares (in 2023, 830 thousand hectares). According to data from regional ministries, in 2024, less than 5,000 hectares were allocated for winter rye in the Moscow region and about 9,000 hectares in the Ryazan region, which is insufficient for this crop and commercial demand for it.

The capacity of winter rye is more stable than that of other crops, especially cereals in the region. Analyzing data on winter rye yields over the past decade in the Non-Chernozem region, we note that yields are still insufficiently high at 2,5-3,5 t/ha, which can be explained by significant direct violations in grain crop production technology.

Choosing a precursor for winter cereals, including winter rye, is a very challenging task in modern crop production. An essential condition for obtaining high yields of winter rye is its placement in crop rotation after the best precursors, which are largely determined by the timing of harvesting, the amount of organic matter left behind, and the phytosanitary background [3; 6; 7]. For the conditions of the Central Non-Chernozem regions, it is recommended to harvest early-maturing crops, such as winter crops for green-cut fodder and perennial grasses, plow to a normal depth, and then keep the soil loose and free of weeds until sowing. After legume-oat mixtures of peas, processing can be carried out in different ways: in wet years, plowing is advisable, in dry years, surface treatment is advisable. After late-harvested row crops, surface treatment should be used primarily [2; 4; 5; 8; 10; 16; 23].

In order to ensure high-quality soil cultivation in occupied fallow fields, it is very important to preserve moisture from excessive evaporation [9]. To this end, the period between the start of harvesting fallow-grown crops and soil cultivation should be as short as possible [13; 15; 17; 20]. Among the techniques that improve the quality of soil cultivation for winter crops in occupied fallow fields, increasing the speed of soil cultivation units deserves attention [11; 14]. Increasing the speed significantly improves soil crumbling, reduces ridging and fluffiness, and also shortens the time required to prepare the soil for sowing [12; 21].

Combined plowing units are crucial for processing after harvesting precursors. When processing with such units, a number of operations are overlapped, better soil cutting quality is ensured, and moisture losses are reduced [18; 19].

Combining proper soil preparation before sowing winter crops with the use of herbicides facilitates weed control in the future.

Measures to improve soil quality and achieve high yields of winter rye also include variety selection, fertilization, choosing the right sowing dates based on soil and climate conditions, and soil cultivation.

Therefore, the aim and objectives of the research were to determine the effectiveness of cultivation and capacity of winter rye depending on the combined effect of precursors and seeding rates in the Central Non-Chernozem Region.

Materials and methods

The research was conducted between 2021 and 2024 at the experimental field of the All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Barybino micro-district, Domodedovo district, Moscow region.

Experimental design: factor A (previous crop in the crop rotation) – three variants: 1) winter wheat (control), 2) grain peas, 3) spring rapeseed; factor B (winter rye seeding rate) – five variants: 1) 2.5 million grains per 1 ha (control), 2) 3.0 million grains per 1 ha, 3) 3.5 million grains per 1 ha, 4) 4.0 million grains per 1 ha, and 5) 4.5 million grains per 1 ha.

Agrotechnical measures in the experiments are generally accepted for the central part of the Non-Chernozem zone. After harvesting the previous crop, disc harrowing to a depth of 12-14 cm; after 1.5 weeks, plowing to a depth of 18-20 cm; after 1 week, pre-sowing cultivation to a depth of 6-8 cm. Sowing is carried out using the continuous row method to a depth of 2-3 cm, with the seeding rate according to the scheme. Sowing time – first ten days of September. After sowing, rolling was carried out. Seed treatment immediately before sowing with Tercia, SC, 2.5 l/t, consumption 10 l/t. The protection system included the use of insecticide and fungicide treatments.

These field studies were conducted on sod-podzolic heavy loam soil of medium cultivation with the following agrochemical characteristics of the plow layer (0–20 cm): soil reaction: pH KCl – 5.46 (moderately acidic); N-NO₃ – 9.6 mg/kg; N-NH₄ – 1.9 mg/kg (low); P₂O₅ – 160 mg/kg (elevated); K₂O – 173 mg/kg (elevated); humus – 2.0–2.2% (low).

The climate of the area is temperate continental. The growing season of 2021/2022 was warm with above-average air temperatures in all months except September and May, and wet in all months except October, March, and June (hydrothermal index of the growing season was 2.71). The growing season of 2022/2023 was relatively warm, with autumn and winter temperatures exceeding the long-term average and close to normal in the spring and summer. Autumn was extremely wet, with a dry August; dry April and moisture deficit in May (hydrothermal index 2.16). The growing season of 2023/2024 was closest to the long-term average, with a very warm and dry September and an excessively wet spring and summer (hydrothermal index 1.76).

Results and discussion

The studies highlight the effect of precursor factors and seeding rates on the overwintering and survival rates of winter rye plants. In different years, the overwintering rate of winter rye ranged from 79.6% to 80.6% and averaged 80.0%, exceeding the control (previous winter wheat) by 2.2 to 3.0 (2.8–3.9%) at LSD_{05} by factor A, which was in the range of 0.48–0.49 and thus determined a significant difference (Fig. 1).

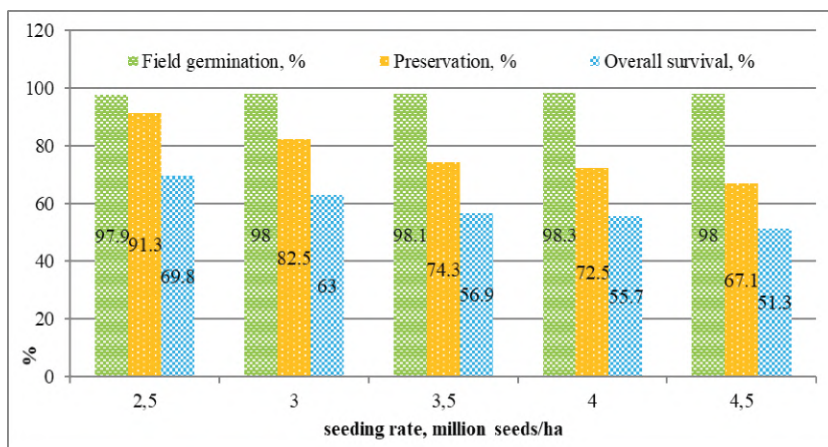


Fig. 1. Field germination, preservation, and overall survival rates depending on factors (example: precursor – winter wheat)

The previous spring rapeseed crop had a significant impact on the overwintering of winter rye, but not in all years, only in 2022 by 0.9 (1.2%) and in 2023 by 1.0 (1.3%). In 2024, the difference between the variant and the control was insignificant, at 0.2 (0.3%). The differences in winter rye overwintering according to the seeding rate factor between all variants and the control did not exceed 1.0% in all years of the study. At LSD_{05} by factor B ranging from 0.61 to 0.63% in different years, the overwintering index significantly exceeded the control (seeding rate of 2.5 million grains per 1 ha) with a difference of 0.7–0.8% only for variants with a seeding rate of 3.5 million grains per 1 ha in 2022 and 2024 and a variant with a seeding rate of 4.0 million grains per 1 ha in 2024.

In terms of the seeding rate for spring-summer preservation, a completely opposite relationship was observed: as the seeding rate increased from the control rate of 2.5 million grains per hectare to a high rate of 4.5 million grains per hectare, the preservation rate fell sharply. On average over three years, the

indicator decreased from 93.0% in the control to 67.0% at a seeding rate of 4.5 million grains per 1 ha. Obviously, the large feeding area of winter rye plants with a low seeding rate and low seeding density served as a reliable protection for the crop from death. On average, increasing the seeding rate from 2.5 to 3.0 million grains per hectare increased plant losses by 9.1 (9.8%), with a seeding rate of 3.5 million grains per hectare, losses increased by 17.3 (18.6%), and with seeding rates of 4.0 and 4.5 million, the decline in survival exceeded 20% and amounted to 22.2% and 28.0%, respectively.

Hence, analysis of the stages of the growing season for winter rye plants in an experiment studying various seeding rates for winter rye with optimal precursors allows us to conclude that in the first half of its development in the fall after sowing, the crop primarily responds to its precursor. With a small mass of developing seedlings, the seeding rate has a negligible effect on the overwintering of winter rye. In autumn, the best conditions for crop preservation are created after grain peas.

The studies present and analyze data on winter rye yields at various seeding rates for winter grain (winter wheat), legumes (grain peas), and oilseeds (spring rapeseed) precursors by year and on average for the study.

In 2022, based on all factors and variants, the lowest winter rye yield in all years of the study was obtained, averaging 4.44 t/ha according to the experiment. Among the precursors studied, the best crop for winter rye was legumes (peas), with an average yield of 4.89 t/ha in 2022. The increase over the control (previous winter wheat) for this variant was significant, amounting to 0.67 t/ha or 15.9% at LSD_{05} by factor A 0.119 t/ha. Spring rapeseed was insignificantly lower than the control by 0.03 t/ha (0.7%).

It is particularly essential to note that only with legumes as the precursor crop was the yield of winter rye higher than 5 t/ha – 5.01 t/ha with a seeding rate of 3.5 million grains per 1 ha and 5.06 t/ha with a seeding rate of 4.0 million grains per 1 ha.

In 2023, the average annual yield of winter rye significantly exceeded the previous year's average by 0.44 t/ha (10.0%), reaching 4.88 t/ha. As in 2022, the best precursor crop for winter rye yields exceeding 5 t/ha was grain peas at all seeding rates except the control rate. The average yield increase compared to the control (winter wheat) was quite significant: 0.53 t/ha or 11.4% at LSD_{05} by factor A 0.129 t/ha.

Although the yield of winter rye in 2024 was the highest in all years of the study – 4.98 t/ha, it only slightly exceeded the average value of the previous year – by 0.1 t/ha (2.0%). The average yield of the most unsuccessful year, 2022, was significantly exceeded in 2024 – by 0.54 t/ha or 12.2% of winter rye grain.

The differences between the field trial variants in 2024 differed slightly from those described in previous years. As expected, the best precursor was legumes, with an average yield of winter rye of 5.46 t/ha and a yield increase of 0.74 t/ha or 15.7% compared to the control precursor winter wheat. Spring rapeseed, unlike in 2022, was comparable, but slightly exceeded the control by 0.03 t/ha (0.6%) at LSD_{05} by factor A 0.126 t/ha. The average winter rye yields over the years, depending on the factors, are presented in Table 1.

Table 1.

**Winter rye yield at different seeding rates for optimal precursors (t/ha),
average for 2022–2024**

A - precursor	B – seeding rate (million grains per 1 ha)					Average for A
	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Winter wheat	4.36	4.44	4.61	4.68	4.53	4.52
Peas	4.99	5.08	5.29	5.35	5.15	5.17
Spring rapeseed	4.45	4.52	4.66	4.74	4.62	4.60
Average for B	4.60	4.68	4.85	4.92	4.77	4.76

LSD_{05} , t/ha, average: AB – 0.278; A – 0.124; B – 0.161.

The average yield of winter rye in field trials over three years was 4.76 t/ha. In terms of the precursor crop factor, legumes (grain peas) significantly exceeded the control (the precursor crop was winter wheat) by an average of 0.65 t/ha (14.4%), showing an average winter rye yield of 5.17 t/ha. Spring rapeseed, with an average winter rye yield of 4.6 t/ha in the study, exceeded the control variant by only 0.08 t/ha (1.8%).

In terms of seeding rate factor, the variant that showed the significant results with an average winter rye yield of 4.92 t/ha and a 0.32 t/ha increase over the control (4.6 t/ha with a seeding rate of 2.5 million grains/ha) (7.0%) was the variant with a seeding rate of 4.0 million grains per hectare. Less dense sowing with a seeding rate of 3.5 million grains/ha was slightly inferior to the best variant, providing an average winter rye yield of 4.85 t/ha and a yield increase of 0.25 t/ha (5.4%) compared to the control.

Dense sowing with a seeding rate of 4.5 million grains/ha also exceeded the control in terms of winter rye yield, however, the average values for the experiment were lower than for the variants presented above – yield 4.77 t/ha; yield increase of 0.17 t/ha (3.7%). Increasing the seeding rate from 2.5 million to 3.0 million grains/ha on average in the study slightly increased the yield by 0.08 t/ha (1.7%).

Conclusion

Thus, for practical application by agricultural producers, it can be confidently recommended to plant winter rye after a legume precursor (grain peas) and to use seeding rates of 3.5 million and 4.0 million grains per hectare. By combining these elements of winter rye cultivation technology, it is possible to obtain high, stable yields ranging from 5.01 t/ha to 5.65 t/ha in different years of the study and an average of 5.29 t/ha at a seeding rate of 3.5 million grains/ha and 5.35 t/ha at a seeding rate of 4.0 million grains/ha.

References

1. Govorov, D. N., Zhiviykh, A. V., & Shchetinin, P. B. (2018). Phytoexpertise and pre-sowing seed treatment as the most important techniques in grain crop cultivation technology. *Zashchita i Karantin Rasteniy*, (8), 12–13.
2. Gulidova, V. A. (2010). *Infected seeds of agricultural crops and their protection* [Monograph]. Yelets State University named after I. A. Bunin. ISBN: 978-5-94809-441-0. EDN: <https://elibrary.ru/QLBVOL>
3. Gulidova, V. A. (2020). *Optimization of the phytosanitary condition of winter wheat crops* [Monograph]. Yelets State University named after I. A. Bunin. ISBN: 978-5-00151-128-1. EDN: <https://elibrary.ru/PBCKXW>
4. Dospekhov, B. A. (2011). *Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results)* [Textbook]. Alyans.
5. Edgington, L. V., Martin, R. A., Bruin, G. C., & Parsons, I. M. (1980). Systemic fungicides: a perspective after 10 years. *Plant Disease*, 64(1), 20–23. <https://doi.org/10.1094/PD-64-19>
6. Evsenina, M. V., & Novikova, A. V. (2021). Improving the conditioning of wheat grain when preparing it for grinding into graded flour. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723(2), 022081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022081>. EDN: <https://elibrary.ru/QTRNSI>
7. Forsberg, G., Kristensen, L., Eibel, P., Titone, P., & Haiti, W. (2003). Sensitivity of cereal seeds to short duration treatment with hot, humid air. *Journal of Plant Disease Protection*, 110(1), 1–16.
8. Gulidova, V. A., & Shchuchka, R. V. (2021). New preparations for winter wheat seeds protection. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 17, 630–635. <https://doi.org/10.37394/232015.2021.17.61>. EDN: <https://elibrary.ru/FCYJNL>
9. Li, J., et al. (2022). Seasonal changes of leaf chlorophyll content as a proxy of photosynthetic capacity in winter wheat and paddy rice. *Ecological Indicators*, 140, 109018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109018>. EDN: <https://elibrary.ru/PJOBQL>

10. Kar, G., Verma, H. N., & Singh, R. (2006). Effects of winter crop and supplemental irrigation on crop yield, water use efficiency and profitability in rainfed rice based cropping system of eastern India. *Agricultural Water Management*, 79(3), 280–292. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.001>
11. Musayev, F., Danilin, S., Zakharova, O., & Rodikov, S. (2020). Agroecological role of biohumus on sod-podzolic soil during irrigation of the rump-timothy grass mixture. *E3S Web of Conferences*, 210, 4003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004003>. EDN: <https://elibrary.ru/XDUVAR>
12. Schroeder, K. L., & Paulitz, T. C. (2006). Root diseases of wheat and barley during the transition from conventional tillage to direct seeding. *Plant Disease*, 90, 1247–1253. <https://doi.org/10.1094/PD-90-1247>
13. Shchuchka, R. V., & Gulidova, V. A. (2021). Methods and results of spring barley plants treatment with growth biostimulants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677, 022103. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/2/022103>. EDN: <https://elibrary.ru/YQFSNB>
14. Stupin, A. S., Lupova, E. I., & Sokolov, A. A. (2021). Increase in efficiency of spring rapeseed production due to modern seed pickers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 624, 012106. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012106>
15. Sun, S., et al. (2019). Seasonal variability in potential and actual yields of winter wheat in China. *Field Crops Research*, 240, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.016>
16. Ushakov, R. N., Ruchkina, A. V., Levin, V. I., Zakharova, O. A., Kostin, Y. V., & Golovina, N. A. (2018). Sustainability of agro-gray soil to pollution and acidification, and its. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.36), 929. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.36.24923>. EDN: <https://elibrary.ru/YCWJBY>
17. Vasileva, V. (2015). Aboveground to root biomass ratios in pea and vetch after treatment with organic fertilizer. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 1(2), 71–74.
18. Vasileva, V., Kertikov, T., & Ilieva, A. (2017). Dry mass yield and amount of fixed nitrogen in some forage legume crops after treatment with organic fertilizer Humus-tim. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, 23(5), 816–819.
19. Vinogradov, D., Lupova, E., Khromtsev, D., & Vasileva, V. (2018). The influence of bio-stimulants on productivity of coriander in the non-chernozem zone of Russia. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(6), 1078–1084. EDN: <https://elibrary.ru/BYPWGD>
20. Vinogradov, D. V., Byshov, N. V., Evtishina, E. V., Lupova, E. I., Tunikov, G. M., & Morozova, N. I. (2018). Peculiarities of growing gold-of-pleasure for oilseeds and

its use in feed production in the non-chernozem zone of Russia. *Amazônia Investiga*, 7(16), 37–45. EDN: <https://elibrary.ru/UDTSUK>

21. Vos, P. Meelis, E., & Ter Keurs, W. J. A. (2000). A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 317–344. <https://doi.org/10.1023/A:1006139412372>. EDN: <https://elibrary.ru/AGNCTT>

Список литературы

1. Говоров, Д. Н., Живых, А. В., & Щетинин, П. Б. (2018). Фитоэкспертиза и предпосевная обработка семян – важнейшие приёмы технологии возделывания зерновых. *Защита и карантин растений*, (8), 12–13.
2. Гулидова, В. А. (2010). *Инфицированные семена сельскохозяйственных культур и их защита* [Монография]. Елецкий гос. ун-т им. И. А. Бунина. ISBN: 978-5-94809-441-0. EDN: <https://elibrary.ru/QLBVOL>
3. Гулидова, В. А. (2020). *Оптимизация фитосанитарного состояния посевов озимой пшеницы* [Монография]. Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина. ISBN: 978-5-00151-128-1. EDN: <https://elibrary.ru/PBCKXW>
4. Доспехов, Б. А. (2011). *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования)* [Учебник]. Альянс.
5. Edgington, L. V., Martin, R. A., Bruin, G. C., & Parsons, I. M. (1980). Systemic fungicides: a perspective after 10 years. *Plant Disease*, 64(1), 20–23. <https://doi.org/10.1094/PD-64-19>
6. Evsenina, M. V., & Novikova, A. V. (2021). Improving the conditioning of wheat grain when preparing it for grinding into graded flour. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723(2), 022081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022081>. EDN: <https://elibrary.ru/QTRNSI>
7. Forsberg, G., Kristensen, L., Eibel, P., Titone, P., & Haiti, W. (2003). Sensitivity of cereal seeds to short duration treatment with hot, humid air. *Journal of Plant Disease Protection*, 110(1), 1–16.
8. Gulidova, V. A., & Shchuchka, R. V. (2021). New preparations for winter wheat seeds protection. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 17, 630–635. <https://doi.org/10.37394/232015.2021.17.61>. EDN: <https://elibrary.ru/FCYJNL>
9. Li, J., et al. (2022). Seasonal changes of leaf chlorophyll content as a proxy of photosynthetic capacity in winter wheat and paddy rice. *Ecological Indicators*, 140, 109018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109018>. EDN: <https://elibrary.ru/PJOBQL>
10. Kar, G., Verma, H. N., & Singh, R. (2006). Effects of winter crop and supplemental irrigation on crop yield, water use efficiency and profitability in rainfed rice based

- cropping system of eastern India. *Agricultural Water Management*, 79(3), 280–292. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.001>
11. Musayev, F., Danilin, S., Zakharova, O., & Rodikov, S. (2020). Agroecological role of biohumus on sod-podzolic soil during irrigation of the rump-timothy grass mixture. *E3S Web of Conferences*, 210, 4003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004003>. EDN: <https://elibrary.ru/XDUVAR>
 12. Schroeder, K. L., & Paulitz, T. C. (2006). Root diseases of wheat and barley during the transition from conventional tillage to direct seeding. *Plant Disease*, 90, 1247–1253. <https://doi.org/10.1094/PD-90-1247>
 13. Shchuchka, R. V., & Gulidova, V. A. (2021). Methods and results of spring barley plants treatment with growth biostimulants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677, 022103. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/2/022103>. EDN: <https://elibrary.ru/YQFSNB>
 14. Stupin, A. S., Lupova, E. I., & Sokolov, A. A. (2021). Increase in efficiency of spring rapeseed production due to modern seed pickers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 624, 012106. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012106>
 15. Sun, S., et al. (2019). Seasonal variability in potential and actual yields of winter wheat in China. *Field Crops Research*, 240, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.016>
 16. Ushakov, R. N., Ruchkina, A. V., Levin, V. I., Zakharova, O. A., Kostin, Y. V., & Golovina, N. A. (2018). Sustainability of agro-gray soil to pollution and acidification, and its. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.36), 929. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.36.24923>. EDN: <https://elibrary.ru/YCWJBY>
 17. Vasileva, V. (2015). Aboveground to root biomass ratios in pea and vetch after treatment with organic fertilizer. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 1(2), 71–74.
 18. Vasileva, V., Kertikov, T., & Ilieva, A. (2017). Dry mass yield and amount of fixed nitrogen in some forage legume crops after treatment with organic fertilizer Humus-tim. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, 23(5), 816–819.
 19. Vinogradov, D., Lupova, E., Khromtsev, D., & Vasileva, V. (2018). The influence of bio-stimulants on productivity of coriander in the non-chernozem zone of Russia. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(6), 1078–1084. EDN: <https://elibrary.ru/BYPWGD>
 20. Vinogradov, D. V., Byshov, N. V., Evtishina, E. V., Lupova, E. I., Tunikov, G. M., & Morozova, N. I. (2018). Peculiarities of growing gold-of-pleasure for oilseeds and its use in feed production in the non-chernozem zone of Russia. *Amazônia Investiga*, 7(16), 37–45. EDN: <https://elibrary.ru/UDTSUK>

21. Vos, P. Meelis, E., & Ter Keurs, W. J. A. (2000). A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 317–344. <https://doi.org/10.1023/A:1006139412372>. EDN: <https://elibrary.ru/AGNCTT>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna S. Shkurkina, PhD Candidate, Department of Agrotechnologies, Agricultural Products Storage and Processing
Yelets State University Named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation
anna.agroeco@mail.ru

Dmitry V. Vinogradov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of General Agriculture and Agroecology; Head of the Department of Agronomy, Agrochemistry and Plant Protection
Lomonosov Moscow State University; Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev
1, Bldg. 12, Leninskie Gory Str., Moscow, 119234, Russian Federation; 1, Kostychev Str., Ryazan, 390044, Russian Federation
vdy-rz@rambler.ru

Tatyana V. Zubkova, Head of the Department of Agrotechnologies, Agricultural Products Storage and Processing, Doctor of Agricultural Sciences
Yelets State University Named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation
ZubkovaTanua@yandex.ru

Kirill D. Sazonkin, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Department of Agronomy and Plant Protection
Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev
1, Kostychev Str., Ryazan, 390044, Russian Federation
kirill.sazonkin@mail.ru

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Шкуркина Анна Сергеевна, аспирант кафедры агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции
Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
anna.agroeco@mail.ru

Виноградов Дмитрий Валериевич, доктор биологических наук, профессор кафедры общего земледелия и агроэкологии; заведующий кафедрой агрономии и защиты растений

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева

Ленинские горы, 1, стр. 12, г. Москва, 119234, Российская Федерация; ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Российская Федерация
vdvrzn@mail.ru

Зубкова Татьяна Владимировна, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
ZubkovaTanua@yandex.ru

Сазонкин Кирилл Дмитриевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрономии и защиты растений

Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева
ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Российская Федерация;
kirill.sazonkin@mail.ru

Поступила 20.10.2025

После рецензирования 30.11.2025

Принята 17.12.2025

Received 20.10.2025

Revised 30.11.2025

Accepted 17.12.2025

Общее земледелие и растениеводство / General Agriculture and Crop Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1527](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1527)

EDN: [BASJL](https://www.edn.ru/BASJL)

УДК 633.34:631.445.4:631.559(571.13)



Формирование урожайности зерна яровой твердой пшеницы в зависимости от различных условий влагообеспеченности и минерального питания

А.Ю. Тимохин, В.С. Юсов, В.В. Михайлов, М.С. Шаповал

ФГБНУ «Омский АНЦ», Омск, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Пшеница и продукты её переработки являются основным источником калорий и питательных веществ в рационе человека. Изучение влияния условий выращивания (климат, влагообеспеченность) и отдельных элементов агротехнологии (система минерального питания) на реализацию высокого генетического потенциала современных сортов твердой пшеницы является актуальным.

Цель – оценить влияние гидротермических условий вегетационного периода и минеральных удобрений на формирование урожайности зерна яровой твердой пшеницы в южной лесостепной зоне Западной Сибири.

Материалы и методы. Экспериментальная работа выполнялась в 2022–2024 гг. на стационарных опытных участках лаборатории полевого кормопроизводства ФГБНУ «Омский АНЦ», расположенных в южно-лесостепной зоне Омской области (Омский район). В схему опыта включались следующие факторы: А – фоны с различным уровнем обеспеченности почвы подвижным фосфором (по Чирикову – средняя, повышенная и высокая); В – дозы фосфорных удобрений (P_0 и P_{60}); С – дозы азотных удобрений (N_0 , N_{30} и N_{60}); D – применение листовой подкормки удобрениями в фазу кущения – без ЛП и ЛП.

Почвенный покров опытного участка представлен лугово-черноземной, среднемошной, среднегумусной, тяжелосуглинистой почвой с нейтральной реакцией среды (рН водной вытяжки 7,0...7,2), содержанием органического углерода в пахотном слое 4,35...4,65 % и мощностью гумусового горизонта 45 см.

Результаты. В ходе исследований установлено, что динамика содержания общей влаги в почве находилась в прямой зависимости от тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода. Засушливые условия и неравномерное поступление

атмосферных осадков приводят к иссушению до 40-60 %НВ не только пахотно-го слоя, но и всего метрового профиля лугово-черноземной почвы, что негативно сказывается на развитии растений пшеницы. Допосевное внесение аммофоса обеспечивало достоверное увеличение урожайности зерна на 24 % с 1,64 до 2,03 т/га, в сочетании с листовой подкормкой – на 46 % с 1,75 до 2,56 т/га. Прибавка урожайности зерна за счет применения азотных удобрений в дозе 60 кг д.в. на га в сочетании с листовой подкормкой достигала 0,50 т/га (26 %). Применение листовой подкормки карбамидом (10 кг/га) в сочетании с жидким аминокислотным удобрением Биостим Зерновой (1 л/га) в фазу кушения твердой пшеницы способствовало достоверному увеличению урожайности с 1,83 до 2,15 т/га или на 17%. Современный сорт яровой твердой пшеницы Омский лазурит отзывчив на улучшение условий минерального питания, что подтверждается увеличением урожайности в 2,6 раза за счет комплексного применения агрохимических средств.

Ключевые слова: твердая пшеница; влажность почвы; минеральные удобрения; листовая подкормка

Для цитирования. Тимохин, А. Ю., Юсов, В. С., Михайлов, В. В., & Шаповал, М. С. (2026). Формирование урожайности зерна яровой твердой пшеницы в зависимости от различных условий влагообеспеченности и минерального питания. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 388–406. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1527>

Formation of grain yield of spring hard wheat depending on various conditions of moisture supply and mineral nutrition

A.Yu. Timokhin, V.S. Yusov, V.V. Mikhailov, M.S. Shapoval

Omsk Agrarian Scientific Center, Omsk, Russian Federation

Abstract

Background. Wheat and its derivatives are the primary source of calories and nutrients in the human diet. Studying the influence of growing conditions (climate, moisture) and individual agricultural practices (mineral nutrition) on realizing the high genetic potential of modern durum wheat varieties is essential.

Purpose. To assess the influence of hydrothermal conditions of the growing season and mineral fertilizers on the formation of grain yield of spring durum wheat in the southern forest-steppe zone of Western Siberia.

Materials and methods. The experimental work was carried out in 2022–2024 at the stationary experimental plots of the field forage production laboratory of the Omsk

Scientific Center, located in the southern forest-steppe zone of the Omsk region (Omsk district). The experimental design included the following factors: A – backgrounds with different levels of soil availability of mobile phosphorus (according to Chirikov – medium, increased, and high); B – doses of phosphorus fertilizers (P0 and P60); C – doses of nitrogen fertilizers (N0, N30, and N60); D – application of foliar feeding with fertilizers during the tillering stage – without FF and FF. The soil cover of the experimental plot is represented by meadow-chnozem, medium-deep, medium-humus, heavy loamy soil with a neutral reaction of the environment (pH of the aqueous extract 7.0...7.2), the content of organic carbon in the arable layer of 4.35...4.65% and the thickness of the humus horizon of 45 cm.

Results. During the research it was established that the dynamics of the total moisture content in the soil was directly dependent on the heat and moisture supply during the growing season. Drought conditions and uneven precipitation lead to drying up to 40–60% of the arable layer, but also the entire meter-thick profile of meadow-chnozem soil, which negatively affects the development of wheat plants. Pre-sowing application of ammophos significantly increased grain yield by 24%, from 1.64 to 2.03 t/ha, while in combination with foliar application, it increased by 46%, from 1.75 to 2.56 t/ha. The increase in grain yields due to the use of nitrogen fertilizers at a dose of 60 kg active ingredient per hectare in combination with foliar application reached 0.50 t/ha (26%). Foliar application of urea (10 kg/ha) in combination with Biostim Zernovoy liquid amino acid fertilizer (1 l/ha) during the tillering phase of durum wheat resulted in a significant yield increase from 1.83 to 2.15 t/ha, or 17%. The modern spring durum wheat variety Omskiy Lazurit responds to improved mineral nutrition conditions, as evidenced by a 2.6-fold increase in yield due to the combined use of agrochemicals.

Keywords: durum wheat; soil moisture; mineral fertilizers; foliar feeding

For citation. Timokhin, A. Yu., Yusov, V. S., Mikhailov, V. V., & Shapoval, M. S. (2026). Formation of grain yield of spring hard wheat depending on various conditions of moisture supply and mineral nutrition. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 388–406. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1527>

Введение

Пшеница и продукты её переработки являются основным источником калорий и питательных веществ в рационе человека. Под пшеницей находится 70% мировых посевных площадей в самых разных почвенно-климатических условиях, это делает её важнейшей зерновой культурой в мире [17; 21]. Основное назначение твёрдой пшеницы – производство макаронных изделий, отличающихся низким гликемическим индексом. В то же время в африканских и ближневосточных странах её применяют для

изготовления булгура, лапши и кускуса, а в России также для получения манной крупы, богатой каротиноидными пигментами (провитамин А), которая используется в детском питании [4].

В России в 2024 году произведено более 2 млн тонн зерна твердой пшеницы, что обусловлено повышенным спросом и увеличением посевных площадей. Наибольший урожай в Сибирском федеральном округе собран в Омской области и Алтайском крае. При этом превалирует зерно твердой пшеницы 4 и 5 классов [7; 9; 14].

В настоящее время возрастает потребность в сортах, характеризующихся высокими урожайными и хозяйственно ценными признаками в сочетании с устойчивостью к биологическим и климатическим стрессовым факторам. Учитывая это, для сельскохозяйственных товаропроизводителей необходимо создавать сорта, отличающиеся высокой экологической адаптивностью [3; 10].

Урожайность и качество зерна твердой пшеницы и продуктов его переработки зависит от различных факторов. Генетический потенциал сорта в значительной степени определяет максимальный уровень его продуктивности [12; 15; 18]. В условиях дефицита элементов минерального питания только систематическое применение в севооборотах агрохимических средств обеспечивает высокую продуктивность пшеницы и влияет на показатели качества зерна [11; 20].

Актуальность исследований обусловлена необходимостью изучения влияния агроэкологических факторов (климат, плодородие почвы) и элементов агротехнологии (в частности, системы минерального питания) на реализацию генетического потенциала современных сортов твердой пшеницы.

Цель исследования – оценить влияние гидротермических условий вегетационного периода и минеральных удобрений на формирование урожайности зерна яровой твердой пшеницы в южной лесостепной зоне Западной Сибири.

Материалы и методы

Экспериментальная работа выполнялась в 2022–2024 гг. на стационарных опытных участках лаборатории полевого кормопроизводства ФГБНУ «Омский АНЦ», расположенных в южно-лесостепной зоне Омской области (Омский район).

Восьмипольный зернотравяной севооборот включал чередование следующих культур: 1. Свербига восточная + коострец безостый + козлятник восточный 14-16-го гг. ж. (выводное поле); 2. Люцерна 1-2-го гг. ж. (выводное поле); 3. Ежа сборная + эспарцет песчаный 3-5-го гг. ж. (выводное

поле); 4. Сорго-суданковый гибрид; 5. Соя; 6. Твердая пшеница; 7. Лен масличный; 8. Ячмень.

Объект исследований – лугово-черноземная почва, яровая твердая пшеница сорта Омский лазурит.

В схему опыта включались следующие факторы:

- фоны с различным уровнем обеспеченности почвы подвижным фосфором (по Чирикову: I – средняя, II и III – повышенная, IV – высокая) – **фактор А**;

- дозы фосфорных удобрений (P_0 и P_{60}) – **фактор В**;

- дозы азотных удобрений (N_0 , N_{30} и N_{60}) – **фактор С**;

- применение листовой подкормки удобрениями в фазу кущения (без ЛП и ЛП) – **фактор D**.

Таким образом, дозы удобрений (азотных и фосфорных) накладывались поперёк заранее сформированных фонов с различной обеспеченностью почвы фосфором. В результате получены комбинации: N_0 , N_{30} , N_{60} , P_{60} , $N_{30}P_{60}$, $N_{60}P_{60}$ в сочетании с листовой подкормкой и без неё.

Исходная дифференциация по обеспеченности фосфором обусловлена разным балансом элемента в соответствующих вариантах опыта.

Площадь делянки – 360 м², учетная – 18 м². Повторность – трехкратная.

Почвенный покров опытного участка представлен лугово-черноземной, среднетяжелой, среднегумусной, тяжелосуглинистой почвой с нейтральной реакцией среды (рН водной вытяжки 7,0...7,2), содержанием органического углерода в пахотном слое 4,35...4,65 % и мощностью гумусового горизонта 45 см.

Обеспеченность почвы элементами минерального питания перед закладкой полевого опыта: $N-NO_3$ (по Грандваль-Ляжу) – средняя, 10,1...10,5 мг/кг; P_2O_5 (по Чирикову) – средняя, 93...99 мг/кг; K_2O (по Чирикову) – очень высокая, 207...230 мг/кг почвы.

Аммофос и аммиачную селитру вносили локально (сеялка СЗП-3,6) весной, до предпосевной культивации. Листовую подкормку (ЛП) карбамидом (10 кг/га) в сочетании с жидким аминокислотным удобрением Биостим Зерновой (1 л/га) проводили в фазу кущения твердой пшеницы.

Зяблевая обработка почвы осенью – безотвальная на глубину 15 см, «Сибиряк» КС-7,4. Закрытие влаги весной на зяблевых фонах – БЗСС-1,0. Срок посев – III декада мая. Для формирования оптимально стеблестоя твердой пшеницы норма высева была рекомендованной для зоны – 6,0 млн всхожих зёрен на гектар [13]. Уборка и учет урожайности зерна проводили прямым комбайнированием (Wintersteiger Classic).

Сорт яровой твердой пшеницы – Омский лазурит. Оригинатор – ФГБ-НУ «Омский АНЦ». Сорт характеризуется комплексом ценных агрономических признаков: стабильной урожайностью, устойчивостью к засухе и полеганию, высокой резистентностью к болезням, а также превосходными показателями качества зерна [6].

Посевы твердой пшеницы обработаны баковой смесью гербицидов Овсюген Экспресс (КЭ), Примадонна (СЭ) и Гранат (ВДГ) в соответствии с регламентом применения препаратов, что позволило эффективно регулировать уровень засоренности в опыте.

Содержание общей влаги в метровом слое почвы определяли методом высушивания. Отбор проб осуществляли в ключевые фенологические фазы: до посева, в основные периоды вегетации и после уборки урожая. Образцы отбирались почвенным буром послойно (с интервалом 10 см до глубины 1 м) в двухкратной повторности.

Оптимальный диапазон влажности почвы соответствует интервалу между влажностью разрыва капилляров (ВРК) и наименьшей влагоёмкостью (НВ). Экспериментально для метрового слоя лугово-чернозёмной почвы стационара были установлены следующие значения: ВРК – 208 мм, НВ – 297 мм [2].

Агрохимический анализ отобранных перед посевом почвенных образцов проводили по общепринятым методикам: ГОСТ26423-85; ГОСТ 26213-91; ГОСТ 26488-85; ГОСТ 26204-91.

Начальный этап вегетационного периода 2022 года проходил в неблагоприятных условиях. Исходный запас общей влаги достигал 220 мм (74 % НВ). Несмотря на то, что за период с мая по август суммарное количество осадков составило 225 мм (109 % от нормы), основная их часть (свыше 90 мм) пришлась на 28-29 июля. Май и первая половина июня характеризовались жаркой и сухой погодой. Аналогичные условия сохранялись в первой и второй декадах июля. В августе и сентябре температура воздуха соответствовала многолетним значениям, а количество осадков составило 56 % и 127 % от нормы соответственно. Гидротермический коэффициент (по методике Г. Т. Селянинова) за период май-август составил 1,02.

В 2023 году средняя температура воздуха достигла 17,8°C, что на 1°C превышает климатическую норму. При этом наблюдался дефицит осадков: выпало 178 мм, что составляет 86 % от среднемноголетнего показателя. Наиболее экстремальные условия зафиксированы в июле: средняя температура составила 22,6°C, превысив норму на 3,2°C. Гидротермический коэффициент (ГТК) за период май-август составил 0,80. Повышенный

температурный фон и недобор осадков оказали негативное влияние на урожайность зерновых культур, тогда как их уборка проходила в неблагоприятных погодных условиях из-за частых осадков.

Вегетационный период 2024 года был наиболее влагообеспеченным. Отмечено повышенное количество осадков и благоприятное весеннее увлажнение почвы. В мае зафиксировано 75 мм осадков (в 2,4 раза выше среднемноголетних значений) при температуре воздуха на 3,1°C ниже климатической нормы. Это осложнило проведение посевной кампании в оптимальные сроки. Повышенное количество осадков отмечалось в июне – 166 мм, особенно во 2 декаде (125,1 мм). В целом за вегетацию, количество осадков составило 334 мм (161% от нормы) при ГТК за май-август – 1,70.

Результаты и обсуждение

Засушливые условия в период вегетации снижают устойчивость зернового производства, причём наиболее пагубное воздействие наблюдается на ранних стадиях развития растений [5]. В условиях климатических изменений критически важно снизить зависимость растениеводства от абиотических факторов, чтобы обеспечить устойчивый рост урожайности в перспективе [8].

Водный режим растений непосредственно определяет проводимость устьиц, формирование листовой поверхности и интенсивность ассимиляции CO₂, поглощение световой энергии и эффективность фотосинтеза [1]. В ходе исследований установлено, что динамика содержания общей влаги в почве напрямую зависит от тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода (рис. 1). В 2022 году из-за малоснежной зимы перед посевом зафиксированы минимальные запасы влаги в пахотном слое. В последующие месяцы здесь отмечался дефицит увлажнения (40...60%НВ), однако в нижележащих горизонтах распределение влаги было равномерным при более высоком её содержании – 60...80%НВ.

Весной 2023 г. запасы влаги в метровом слое были высокими и составляли в среднем 243...261 мм или 82...88% НВ, что позволило развиваться растениям твердой пшеницы в засушливых условиях вегетационного периода. В дальнейшем отмечалось иссушение метрового профиля как следствие низкого остаточного количества влаги в засушливый сезон.

В 2024 г. отмечалось наиболее высокое содержание влаги в изучаемом профиле почвы, он имел стабильное и равномерное увлажнение в течение всего вегетационного периода – более 70%НВ.

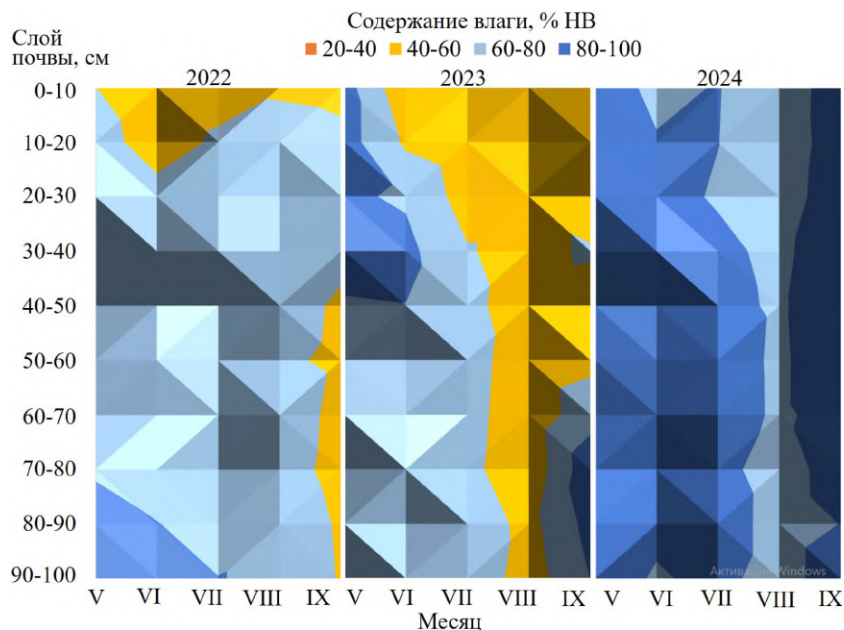


Рис. 1. Изменение содержания влаги в различных слоях почвы в течение вегетационного периода

Fig. 1. Changes in moisture content in various soil layers during the growing season

Сложившиеся гидротермические условия, а также различное содержание доступной влаги в метровой толще почвы и обеспеченность элементами минерального питания оказывали влияние на урожайность зерна твердой пшеницы. Повышенное и высокое содержание P_2O_5 обеспечивало достоверную прибавку зерна пшеницы как в сочетании с листовой подкормкой – с 1,99 до 2,37 т/га или на 19 %, так и без неё – с 1,59 до 2,22 т/га или на 40 % (табл. 1).

Эффективность допосевого внесения фосфора была высокой и достоверной, сбор зерна возрастал на 24 % с 1,64 до 2,03 т/га, при совместном применении с листовой подкормкой – на 46 % с 1,75 до 2,56 т/га. Прибавки урожайности зерна за счет применения азотных удобрений (N_{60}) в сочетании с листовой подкормкой достигали 0,50 т/га или 26 %.

В ходе исследований установлено, что листовая подкормка в период вегетации достоверно повышала урожайность с 1,83 до 2,15 т/га (на 17 %).

На фоне средней обеспеченности подвижным фосфором (фон I), типичной для лугово-чернозёмных почв юга Западной Сибири, применение фосфорных

удобрений (P_{60}) перед посевом способствовало росту урожайности с 1,16 до 1,67 т/га (на 44 %). При совместном внесении P_{60} и N_{60} урожайность достигала 2,02 т/га, что на 74 % превосходит контроль, а при дополнении этой схемы листовой подкормкой продуктивность увеличивалась в 2,3 раза до 2,71 т/га.

Таблица 1.

Урожайность зерна яровой твердой пшеницы в зависимости от условий минерального питания (2022–2024 гг.), т/га

Table 1. Grain Yield of Spring Durum Wheat as a Function of Nutrient Supply (2022–2024), metric tons per hectare

Минеральные удобрения (кг д.в./га)		Фоны по обеспеченности P ₂ O ₅ (А)				Среднее по фактору			
фосфор (В)	азот (С)	I	II	III	IV	D	B	C	
без ЛП (D)									
P ₀	N ₀	1,16	1,49	1,51	1,62	1,83	1,64	1,72	
	N ₃₀	1,28	1,56	1,61	1,76			1,75	
	N ₆₀	1,45	1,91	1,96	2,31		2,03		2,02
P ₆₀	N ₀	1,67	1,94	2,06	2,30				
	N ₃₀	1,97	1,56	1,61	2,65				
	N ₆₀	2,02	1,91	1,96	2,66				
Среднее по фактору А		1,59	1,73	1,79	2,22				
ЛП (D)									
P ₀	N ₀	1,27	1,63	1,66	1,74	2,15	1,75	1,89	
	N ₃₀	1,56	1,55	1,67	2,06			2,17	
	N ₆₀	1,77	1,93	1,89	2,24		2,56		2,39
P ₆₀	N ₀	2,04	2,07	2,24	2,48				
	N ₃₀	2,57	2,58	2,69	2,73				
	N ₆₀	2,71	2,88	2,72	2,96				
Среднее по фактору А		1,99	2,11	2,15	2,37				
НСР ₀₅ : А – 0,13; В – 0,09; С – 0,11; D – 0,09; для частных средних различий – 0,44. Доля влияния факторов, %: А – 16,1; В – 42,1; С – 12,7; D – 11,9; АВ – 1,5; АС – 1,6; АД – 1,1; ВС – 0,3; BD – 5,1; CD – 1,3; ABC – 0,4; ABD – 1,7; ACD – 0,7; BCD – 1,6; ABCD – 1,8.									

Сорт яровой твёрдой пшеницы Омский лазурит продемонстрировал высокую отзывчивость на оптимизацию минерального питания: комплексное воздействие изучаемых факторов увеличивало урожайность в 2,6 раза с 1,16 до 2,96 т/га.

Так как схема опыта по изучению урожайности твердой пшеницы от влагообеспеченности и минерального питания включала в себя большое ко-

личество факторов был применен анализ главных компонент (PCA). Анализ главных компонент – это метод линейного преобразования данных, направленный на уменьшение размерности путём проецирования исходного пространства признаков в новое пространство главных компонент. По сути, PCA выполняет ортогональное преобразование набора коррелированных переменных в набор линейно некоррелированных переменных, называемых главными компонентами [16; 19].

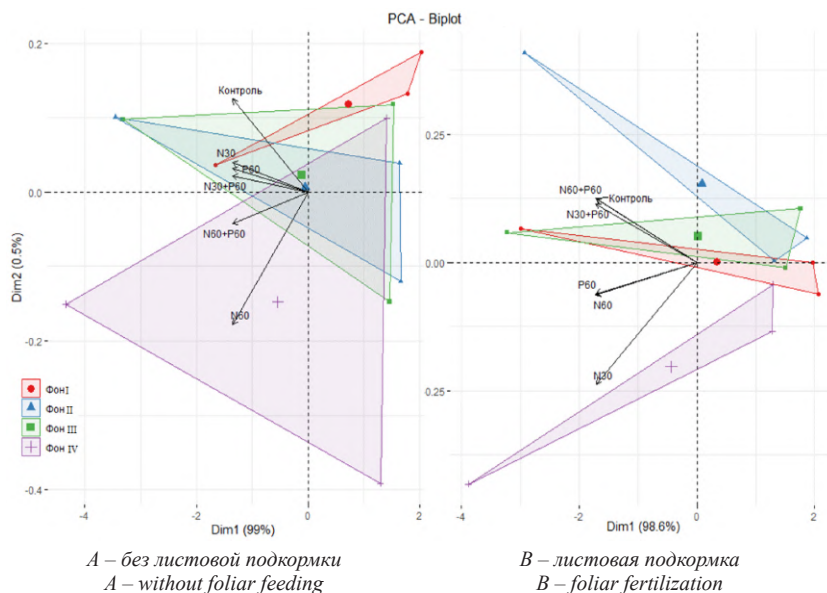


Рис. 2. Анализ главных компонент урожайности в зависимости от фона обеспеченности подвижным фосфором, минеральных удобрений и листовых подкормок. Ось Dim1 показывает вклад в дисперсию первой главной компоненты, Dim2 – вклад в дисперсию второй главной компоненты; треугольник концентрации характеризует достоверность каждой группы.

Fig. 2. Principal component analysis of yield as a function of the background levels of available phosphorus, mineral fertilizers, and foliar fertilizers. The Dim1 axis shows the contribution to the variance of the first principal component, and the Dim2 axis shows the contribution to the variance of the second principal component; the concentration triangle indicates the statistical significance of each group.

Анализ главных компонент урожайности зерна в зависимости от минерального фона и применения подкормок представлен на биплоте, который служит графическим представлением PCA, объединяющим в единый гра-

фик оценки и нагрузки (рис. 2). Оценки – точки данных, спроецированные на основные компоненты, а нагрузки указывают на вклад каждой исходной переменной в основные компоненты, позволяют выявить скрытые закономерности и основные различия между наблюдениями. Первая главная компонента (Dim1=98,6-99,0%) – направление, вдоль которого разброс данных максимален, содержит максимальную информацию о различиях от общей изменчивости. Вторая главная компонента (Dim2 = 0,5%) – перпендикулярна первой и содержит вторую по значимости часть вариативности. При отсутствии листовой подкормки улучшение условий минерального питания существенно увеличивало урожайность (рис. 2А). Применение листовой подкормки максимально увеличило урожайность на фонах с повышенной и высокой обеспеченностью подвижным фосфором (III и IV) в вариантах применения $N_{30}+P_{60}$, $N_{60}+P_{60}$ и на контроле.

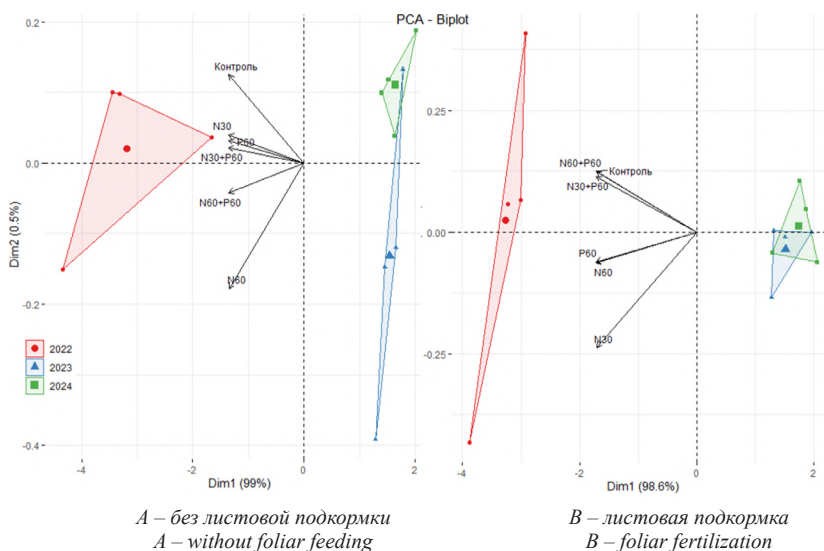


Рис. 3. Анализ главных компонент урожайности по годам в зависимости от внесенных удобрений и листовых подкормок. Ось Dim1 показывает вклад в дисперсию первой главной компоненты, Dim2 – вклад в дисперсию второй главной компоненты; треугольник концентрации характеризует достоверность каждой группы.

Fig. 3. Principal component analysis of yield by year as a function of applied fertilizers and foliar feedings. The Dim1 axis shows the contribution to the variance of the first principal component, and the Dim2 axis shows the contribution to the variance of the second principal component; the concentration triangle indicates the statistical significance of each group.

Оценка влияния погодных условий вегетационного периода на реализацию применяемых удобрений представлена на рисунке 3. Биплот показывает, что в более засушливом 2022 году применение удобрений и подкормок позволило получить большую урожайность твердой пшеницы, при этом применение листовой подкормки увеличивало урожайность на всех вариантах, а без листовой подкормки только при применении $N_{30}+P_{60}$, $N_{60}+P_{60}$, N_{30} , P_{60} .

В годы с чрезмерными ливневыми осадками и недобором эффективных температур применение удобрений оказало негативное влияние на формирование урожайности твердой пшеницы. Происходило затягивание вегетационного периода, формирование большей биомассы растений и полегание стеблестоя.

Заключение

1. Засушливые условия вегетационного периода и отсутствие равномерного поступления атмосферных осадков приводят к иссушению до 40-60 %НВ не только пахотного слоя, но и всего метрового профиля лугово-черноземной почвы, что негативно сказывается на развитии растений пшеницы.

2. Допосевное внесение аммофоса обеспечивает достоверное увеличение урожайности зерна на 24 % с 1,64 до 2,03 т/га, в сочетании с листовой подкормкой – на 46 % с 1,75 до 2,56 т/га. Прибавка урожайности зерна за счет применения азотных удобрений в дозе 60 кг д.в. на га в сочетании с листовой подкормкой достигает 0,50 т/га (26 %).

3. Применение листовой подкормки карбамидом (10 кг/га) в сочетании с жидким аминокислотным удобрением Биостим Зерновой (1 л/га) в фазу кущения твердой пшеницы способствует достоверному увеличению урожайности с 1,83 до 2,15 т/га или на 17%.

4. Современный сорт яровой твердой пшеницы Омский лазурит отзывчив на улучшение условий минерального питания, что подтверждается увеличением урожайности в 2,6 раза за счет комплексного применения агрохимических средств.

5. Анализ главных компонент (РСА) урожайности зерна в зависимости от минерального фона и применения подкормок, а также роль погодных условий вегетационного периода на реализацию применяемых удобрений, подтверждает существенное влияние условий выращивания и изучаемых элементов агротехнологии на реализацию высокого генетического потенциала современных сортов яровой твердой пшеницы.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № FNUN-2025-0001.

Список литературы

1. Барановский, А. В., & Курдюкова, О. Н. (2024). Влагообеспеченность посевов и водопотребление зернового сорго в зависимости от сроков сева. *Земледелие, (1)*, 39–42. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-1-39-42>. EDN: <https://elibrary.ru/YWTWGY>
2. Бойко, В. С., Тимохин, А. Ю., & Якименко, В. Н. (2025). Изменение фосфатного состояния почв лесостепи Западной Сибири при систематическом применении удобрений. *Российская сельскохозяйственная наука, (1)*, 29–33. <https://doi.org/10.31857/S2500262721010075>. EDN: <https://elibrary.ru/QSYHLP>
3. Гапонов, С. Н., Шутарева, Г. И., Цетва, Н. М., Цетва, И. С., Милованов, И. В., Бурмистров, Н. А., Жиганова, Е. С., & Куликова, В. А. (2022). Новый сорт яровой твердой пшеницы Тамара — источник каротиноидных пигментов. *Зерновое хозяйство России, 14(3)*, 51–56. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-81-3-51-56>. EDN: <https://elibrary.ru/NBVMPF>
4. Гапонов, С. Н., Шутарева, Г. И., Цетва, Н. М., Цетва, И. С., Милованов, И. В., Бурмистров, Н. А., Жиганова, Е. С., & Соловова, Н. С. (2024). Экологическая адаптивность сортов яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 185(1)*, 184–190. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-184-190>. EDN: <https://elibrary.ru/QMHXXE>
5. Горянин, О. И., Щербинина, Е. В., & Джангабаев, Б. Ж. (2023). Оптимизация сортовых технологий яровой твердой пшеницы в чернозёмной степи Поволжья. *Достижения науки и техники АПК, 37(3)*, 10–15. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_3_10. EDN: <https://elibrary.ru/KXORMZ>
6. Евдокимов, М. Г., Юсов, В. С., Кирьякова, М. Н., Пахотина, И. В., Мешкова, Л. В., & Глушаков, Д. А. (2023). Омский лазурит — новый сорт твердой яровой пшеницы. *Вестник КрасГАУ, (7)*, 37–46. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-7-37-46>. EDN: <https://elibrary.ru/NFNQLT>
7. Жылкыбаев, Р. С., Жигула, Т. Ю., Шпигель, А. Л., & Потоцкая, И. В. (2025). Формирование урожайности и качества зерна твердой пшеницы в условиях Северного Казахстана. *Аграрный вестник Урала, 25(3)*, 360–370. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-360-370>. EDN: <https://elibrary.ru/KATWJO>
8. Кинчаров, А. И., & Демина, Е. А. (2022). Анализ и краткосрочный прогноз изменения климатических условий в адаптивной селекции яровых зерновых. *Российская сельскохозяйственная наука, (1)*, 23–30. <https://doi.org/10.31857/S2500262722010057>. EDN: <https://elibrary.ru/BFVRFQ>

9. Кравченко, Н. С., Костыленко, О. А., Игнатъева, Н. Г., & Иванисова, А. С. (2024). Сравнение фенотипической изменчивости сортов и линий озимой твердой пшеницы по цветовым характеристикам зерна, крупы и макаронных изделий. *Зерновое хозяйство России*, (1), 33–40. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-90-1-33-40>. EDN: <https://elibrary.ru/WYZRPW>
10. Мальчиков, П. Н., Шаболкина, Е. Н., Мясникова, М. Г., & Пронович, Л. В. (2023). Качество клейковины сортов яровой твердой пшеницы Самарского НИИ-ИСХ и информативность параметров качества. *Достижения науки и техники АПК*, 37(6), 37–43. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_6_37. EDN: <https://elibrary.ru/BNHOZJ>
11. Массалимов, И. А., Шакирзянов, А. Х., & Массалимов, Б. И. (2024). Влияние листовой обработки наночастицами серы на урожайность пшеницы. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(1), 119–143. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-716>. EDN: <https://elibrary.ru/IRQJTG>
12. Розова, М. А., Зиборов, А. И., Усенко, В. И., & Егиазарян, Е. Е. (2019). Реакция сортов яровой твердой пшеницы на удобрения и нормы высева при возделывании по технологии No-till в степной зоне Алтайского края. *Достижения науки и техники АПК*, 33(10), 34–39. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11008>. EDN: <https://elibrary.ru/ENMOVY>
13. ФГБНУ «Омский АНЦ» (2020). *Совершенствование системы производства семян и товарного зерна яровой твердой пшеницы в Омской области: рекомендации*. Омск: Изд-во ИП Макшеевой Е.А., 64 с. EDN: <https://elibrary.ru/GONKNA>
14. Трифонова, А. А., Борис, К. В., Дедова, Л. В., Мальчиков, П. Н., & Кудрявцев, А. М. (2025). Разнообразие отечественных сортов твердой пшеницы по генам синтеза и деградации каротиноидов в зерне. *Вавиловский журнал генетики и селекции*, 29(3), 370–379. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-40>. EDN: <https://elibrary.ru/MKAQBY>
15. Фризен, Ю. В., Некрасова, Е. В., & Гайвас, А. А. (2024). Влияние отдельных элементов агротехнологии на продуктивность твердой пшеницы в южной лесостепи Омской области. *Аграрная наука*, (2), 81–86. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-81-86>. EDN: <https://elibrary.ru/EXXLWQ>
16. Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
17. Ayala-Zepeda, M., Parra-Cota, F. I., Chinchilla-Soto, C., De La Cruz-Torres, E., Ibba, M. I., Estrada-Alvarado, M. I., & de los Santos-Villalobos, S. (2025). 15N-Nitrogen Use Efficiency, Productivity, and Quality of Durum Wheat Integrating Nitro-

- gen Management and an Indigenous Bacterial Inoculant in a Single Growing Season. *Applied Sciences*, 15(3), 1429. <https://doi.org/10.3390/app15031429>. EDN: <https://elibrary.ru/TQMVMJ>
18. Bakshi, M. S., Ahluwalia, G. K., Mandial, D., Khullar, P., Gupta, V., Kumar, H., & Singh, N. (2019). Role of Gluten in Surface Chemistry: Nanometallic Bioconjugation of Hard, Medium, and Soft Wheat Protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(28), 7886–7897. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01015>. EDN: <https://elibrary.ru/RDSWVP>
 19. Bro, R., & Smilde, A. (2024). Principal component analysis. *Analytical methods*, 6, 2812–2831. <https://doi.org/10.1039/C3AY41907J>
 20. Dimitriadi, D., Stylianidis, G. P., Tsirogiannis, I., Chorianopoulou, S. N., & Bouranis, D. L. (2025). Biofortification of Durum Wheat Grain: Interactions Between Micronutrients as Affected by Potential Biofortification Enhancers and Surfactants. *Plants*, 14(24), 3759. <https://doi.org/10.3390/plants14243759>. EDN: <https://elibrary.ru/TOGAHI>
 21. Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. F. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1053196. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1053196>. EDN: <https://elibrary.ru/LHWUHE>

References

1. Baranovsky, A. V., & Kurdyukova, O. N. (2024). Moisture provision of crops and water consumption of grain sorghum depending on sowing dates. *Zemledeliye*, (1), 39–42. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-1-39-42>. EDN: <https://elibrary.ru/YWTWGY>
2. Boyko, V. S., Timokhin, A. Yu., & Yakimenko, V. N. (2025). Changes in the phosphate status of forest-steppe soils of Western Siberia under systematic application of fertilizers. *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*, (1), 29–33. <https://doi.org/10.31857/S2500262721010075>. EDN: <https://elibrary.ru/QSYHLP>
3. Gaponov, S. N., Shutareva, G. I., Tsetva, N. M., Tsetva, I. S., Milovanov, I. V., Burmistrov, N. A., Zhiganova, E. S., & Kulikova, V. A. (2022). New spring durum wheat variety Tamara — a source of carotenoid pigments. *Zernovoe khozyaistvo Rossii*, 14(3), 51–56. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-81-3-51-56>. EDN: <https://elibrary.ru/NBVMPP>
4. Gaponov, S. N., Shutareva, G. I., Tsetva, N. M., Tsetva, I. S., Milovanov, I. V., Burmistrov, N. A., Zhiganova, E. S., & Solovova, N. S. (2024). Ecological adaptability of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties of Saratov breeding. *Trudy po prikladnoi botanike, genetike i selektsii*, 185(1), 184–190. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-184-190>. EDN: <https://elibrary.ru/QMHXXE>

5. Goryanin, O. I., Shcherbinina, E. V., & Dzhangabaev, B. Zh. (2023). Optimization of varietal technologies for spring durum wheat in the chernozem steppe of the Volga region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 37(3), 10–15. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_3_10. EDN: <https://elibrary.ru/KXORMZ>
6. Evdokimov, M. G., Yusov, V. S., Kiryakova, M. N., Pakhotina, I. V., Meshkova, L. V., & Glushakov, D. A. (2023). Omskii lazurit — a new variety of spring durum wheat. *Vestnik KrasGAU*, (7), 37–46. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-7-37-46>. EDN: <https://elibrary.ru/NFNQLT>
7. Zhylykbaev, R. S., Zhigula, T. Yu., Shpigiel, A. L., & Pototskaya, I. V. (2025). Formation of yield and grain quality of durum wheat under conditions of Northern Kazakhstan. *Agrarnyi vestnik Urala*, 25(3), 360–370. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-360-370>. EDN: <https://elibrary.ru/KATWJO>
8. Kincharov, A. I., & Demina, E. A. (2022). Analysis and short-term forecast of climatic conditions changes in adaptive breeding of spring cereals. *Rossiiskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*, (1), 23–30. <https://doi.org/10.31857/S2500262722010057>. EDN: <https://elibrary.ru/BFVRFQ>
9. Kravchenko, N. S., Kostylenko, O. A., Ignatyeva, N. G., & Ivanisova, A. S. (2024). Comparison of phenotypic variability of winter durum wheat varieties and lines by color characteristics of grain, groats, and pasta products. *Zernovoe khozyaystvo Rossii*, (1), 33–40. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-90-1-33-40>. EDN: <https://elibrary.ru/WYZRPW>
10. Malchikov, P. N., Shabolkina, E. N., Myasnikova, M. G., & Pronovich, L. V. (2023). Gluten quality of spring durum wheat varieties from Samara Research Institute of Agriculture and the informativeness of quality parameters. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 37(6), 37–43. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_6_37. EDN: <https://elibrary.ru/BNHOZJ>
11. Massalimov, I. A., Shakirzyanov, A. Kh., & Massalimov, B. I. (2024). Effect of foliar treatment with sulfur nanoparticles on wheat yield. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(1), 119–143. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-716>. EDN: <https://elibrary.ru/IRQJTG>
12. Rozova, M. A., Ziborov, A. I., Usenko, V. I., & Egiazaryan, E. E. (2019). Response of spring durum wheat varieties to fertilizers and seeding rates under No-till technology in the steppe zone of the Altai Territory. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 33(10), 34–39. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11008>. EDN: <https://elibrary.ru/ENMOVY>
13. FGBNU “Omskii ANTs” (2020). *Improvement of the system for production of seeds and commercial grain of spring durum wheat in the Omsk region: Guidelines*. Omsk: Izd-vo IP Makshevoi E.A., 64 p. EDN: <https://elibrary.ru/GOHKHA>

14. Trifonova, A. A., Boris, K. V., Dedova, L. V., Malchikov, P. N., & Kudryavtsev, A. M. (2025). Diversity of domestic durum wheat varieties in genes for synthesis and degradation of carotenoids in grain. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii*, 29(3), 370–379. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-40>. EDN: <https://elibrary.ru/MKAQBY>
15. Frizen, Yu. V., Nekrasova, E. V., & Gaivas, A. A. (2024). Effect of individual elements of agricultural technology on the productivity of durum wheat in the southern forest-steppe of the Omsk region. *Agrarnaya nauka*, (2), 81–86. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-81-86>. EDN: <https://elibrary.ru/EXXLWQ>
16. Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
17. Ayala-Zepeda, M., Parra-Cota, F. I., Chinchilla-Soto, C., De La Cruz-Torres, E., Ibba, M. I., Estrada-Alvarado, M. I., & de los Santos-Villalobos, S. (2025). 15N-Nitrogen Use Efficiency, Productivity, and Quality of Durum Wheat Integrating Nitrogen Management and an Indigenous Bacterial Inoculant in a Single Growing Season. *Applied Sciences*, 15(3), 1429. <https://doi.org/10.3390/app15031429>. EDN: <https://elibrary.ru/TQMVJM>
18. Bakshi, M. S., Ahluwalia, G. K., Mandial, D., Khullar, P., Gupta, V., Kumar, H., & Singh, N. (2019). Role of Gluten in Surface Chemistry: Nanometallic Bioconjugation of Hard, Medium, and Soft Wheat Protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(28), 7886–7897. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01015>. EDN: <https://elibrary.ru/RDSWVP>
19. Bro, R., & Smlde, A. (2024). Principal component analysis. *Analytical methods*, 6, 2812–2831. <https://doi.org/10.1039/C3AY41907J>
20. Dimitriadis, D., Stylianidis, G. P., Tsirogiannis, I., Chorianopoulou, S. N., & Bouranis, D. L. (2025). Biofortification of Durum Wheat Grain: Interactions Between Micronutrients as Affected by Potential Biofortification Enhancers and Surfactants. *Plants*, 14(24), 3759. <https://doi.org/10.3390/plants14243759>. EDN: <https://elibrary.ru/TOGAHI>
21. Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. F. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1053196. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1053196>. EDN: <https://elibrary.ru/LHWUHE>

ВКЛАД АВТОРОВ

Тимохин А.Ю., Юсов В.С.: разработка концепции научной работы, анализ данных, статистическая обработка полученных результатов, статистическая обработка полученных результатов, составление черновика рукописи.

Тимохин А.Ю., Михайлов В.В., Шаповал М.С.: проведение полевых экспериментов, сбор данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Timokhin A.Yu., Yusov V.S.: development of the scientific concept, data analysis, statistical analysis of the results, statistical analysis of the results, drafting the manuscript.

Timokhin A.Yu., Mikhailov V.V., Shapoval M.S.: conduct of the field experiments, data collection.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Тимохин Артем Юрьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»
пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
timokhin@anc55.ru

Юсов Вадим Станиславович, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»
пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
yusov@anc55.ru

Михайлов Вячеслав Владимирович, кандидат биологических наук, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр»
пр. Королева, 26, г. Омск, 644012, Российская Федерация
mikhailov@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

Artem Yu. Timokhin, PhD in Agricultural Sciences, Leading Researcher
Federal State Budgetary Scientific Institution "Omsk Agrarian Scientific Center"
26, Korolev 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

Vadim S. Yusov, Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher

Federal State Budgetary Scientific Institution "Omsk Agrarian Scientific Center"

26, Korolev Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

yusov@anc55.ru

SPIN-code: 2747-8921

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4159-3872>

ResearcherID: AAN-9062-2020

Scopus Author ID: 57197714650

Vyacheslav V. Mikhailov, PhD in Biological Sciences, Researcher

Federal State Budgetary Scientific Institution "Omsk Agrarian Scientific Center"

26, Korolev Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

mikhailov@anc55.ru

SPIN-code: 9423-4622

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2320-231X>

Maxim S. Shapoval, Junior Researcher

Federal State Budgetary Scientific Institution "Omsk Agrarian Scientific Center"

26, Korolev Ave., Omsk, 644012, Russian Federation

ms.shapoval1813@mail.ru

SPIN-code: 3687-8121

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8960-0817>

Поступила 19.12.2025

После рецензирования 20.02.2026

Принята 01.03.2026

Received 19.12.2025

Revised 20.02.2026

Accepted 01.03.2026

Селекция, семеноводство и биотехнология / Breeding, Seed Production, and Biotechnology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1459](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1459)EDN: [BIFTJM](https://www.edn.ru/BIFTJM)

УДК 633.34:631.527:575.174



Молекулярное генотипирование генов *E1-E4* и оценка их прогностической значимости для селекции скороспелых сортов сои (*Glycine max* (L.) Merr)

П.Д. Тимкин, П.М. Линская, А.С. Зажигалкина,
А.П. Галиченко, А.А. Пензин

*Всероссийский научно-исследовательский институт сои, Благовещенск,
Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Создание скороспелых сортов сои, адаптированных к короткому вегетационному периоду северных регионов, является приоритетной задачей современной селекции. Ключевую роль в контроле времени цветения и созревания играют гены фотопериодической чувствительности *E1-E4*.

Цель. Целью данного исследования являлось молекулярное генотипирование коллекции сои по генам *E1-E4* для установления связи между их аллельными состояниями и полевыми характеристиками спелости, а также оценка прогностической ценности этих маркеров для селекции.

Материалы и методы. Коллекция из 46 сортов сои была генотипирована с использованием аллель-специфичных ПЦР- и CAPS-маркеров. Статистический анализ включал расчет частот генотипов, бисериальную корреляцию Пойнта ($r = -0,873$, $p = 0,053$), корреляцию Спирмена ($\rho = -0,873$, $p = 0,0001$), линейную регрессию и метод случайного леса с валидацией 70/30.

Результаты. Установлен дозовый эффект рецессивных аллелей: каждый дополнительный рецессивный аллель снижал группу спелости в среднем на 0,8 пункта (линейный тренд, $R^2 = 0,73$). При наличии 3 рецессивных аллелей доля позднеспелых сортов составляла 0%. Модель случайного леса показала точность прогноза $>85\%$. Наибольший вклад в скороспелость вносил аллель *e3-tr* (сорт Сибириада). Молекулярные маркеры генов *E1-E4* обладают высокой прогностической значимостью для селекции на скороспелость. Критерий отбора ≥ 3 рецессивных аллелей обеспечивает 100% эффективность получения скороспелых форм.

Для селекционной практики рекомендованы сорта-доноры Сибириада (носитель *e3-tr*) и Топаз (ультраскороспелый фенотип).

Ключевые слова: соя; гены спелости E1-E4; молекулярное генотипирование; маркер-опосредованная селекция; дозовый эффект; скороспелость

Для цитирования. Тимкин, П. Д., Линская, П. М., Зажигалкина, А. С., Галиченко, А. П., & Пензин, А. А. (2026). Молекулярное генотипирование генов *E1-E4* и оценка их прогностической значимости для селекции скороспелых сортов сои (*Glycine max* (L.) Merr). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 407–426. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1459>

Molecular genotyping of *E1-E4* genes and assessment of their predictive significance for breeding early-maturing soybean (*Glycine max* (L.) Merr) varieties

P.D. Timkin, P.M. Linskaya, A.S. Zazhigalkina,
A.P. Galichenko, A.A. Penzin

All-Russian Research Institute of Soybeans, Blagoveshchensk, Russian Federation

Abstract

Background. Development of early-maturing soybean varieties adapted to the short growing season of northern regions is a priority task of modern breeding. The photoperiod sensitivity genes *E1-E4* play a key role in controlling flowering and maturation time.

Purpose. The aim of this study was to perform molecular genotyping of a soybean collection for the *E1-E4* genes to establish a connection between their allelic states and field maturity characteristics, as well as to assess the predictive value of these markers for breeding.

Materials and methods. A collection of 46 soybean varieties was genotyped using allele-specific PCR and CAPS markers. Statistical analysis included calculation of genotype frequencies, Point biserial correlation ($r = -0,873$, $p = 0,053$), Spearman's correlation ($\rho = -0,873$, $p = 0,0001$), linear regression, and the Random Forest method with a 70/30 validation.

Results. A dose effect of recessive alleles was established: each additional recessive allele reduced the maturity group by an average of 0,8 points (linear trend, $R^2 = 0,73$). When 3 recessive alleles were present, the proportion of late-maturing varieties was 0%. The Random Forest model showed a prediction accuracy of >85%. The *e3-tr* allele (variety Сибириада) contributed the most to early maturity. Molecular markers of the *E1-E4* genes have high predictive significance for breeding for early maturity. A selection criterion of ≥ 3 recessive alleles ensures 100% efficiency in obtaining early-maturing forms.

For breeding practice, the donor varieties Сибириада (carrier of *e3-tr*) and Топаз (ultra-early phenotype) are recommended.

Keywords: soybean; maturity genes *E1-E4*; molecular genotyping; marker-assisted selection; dose effect; early maturity

For citation. Timkin, P. D., Linskaya, P. M., Zazhigalkina, A. S., Galichenko, A. P., & Penzin, A. A. (2026). Molecular genotyping of *E1-E4* genes and assessment of their predictive significance for breeding early-maturing soybean (*Glycine max* (L.) Merr) varieties. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 407–426. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1459>

Введение

Соя (*Glycine max* (L.) Merr) как фотопериодически чувствительная культура обладает строгой зависимостью продолжительности вегетационного периода от длины светового дня [1]. Гены семейства E (Early), в особенности *E1–E4*, играют ключевую роль в контроле времени цветения и созревания, что определяет возможность адаптации сортов к различным широтам возделывания [2; 3].

Молекулярное маркирование этих генов позволяет перейти от фенотипического отбора к целенаправленному созданию сортов с заданными свойствами спелости [4].

У сои идентифицировано более 12 генов, контролирующих время цветения и созревания, однако наибольший вклад в фотопериодическую реакцию вносят гены *E1, E2, E3 и E4* [5; 6]. Эти гены функционируют в составе сложной сигнальной сети, где *E1* выполняет роль центрального регулятора, а *E3* и *E4* опосредуют восприятие светового сигнала через фитохромы [7].

Ген *E1*, локализованный на хромосоме 6, кодирует транскрипционный фактор В3-домена, который подавляет экспрессию генов цветения *FT* (flowering locus T/локус цветения Т) [2]. Среди его аллельных вариантов функциональный аллель *E1* является сильным репрессором, тогда как *e1-as* приводит к умеренному сокращению вегетационного периода, а *e1-fs* и *e1-nl* представляют собой нонсенс-мутации, вызывающие раннее цветение. Наличие доминантного аллеля *E1* ассоциировано с позднеспелостью, особенно в условиях длинного дня [8; 9].

Ген *E2*, расположенный на хромосоме 10, является ортологом гена *GIGANTEA* арабидопсиса и функционирует как компонент циркадных ритмов, модулируя чувствительность к фотопериоду через взаимодействие с *E1* [10]. Функциональный аллель *E2* обеспечивает нормальную регуляцию, в то время как нонсенс-мутация *e2-ns* приводит к раннему цветению. Эффект *e2-ns* особенно выражен в комбинации с другими рецессивными аллелями [11].

Гены *E3* и *E4*, локализованные на хромосомах 19 и 20 соответственно, кодируют фитохромы А - *GmPhyA3* (*E3*) и *GmPhyA2* (*E4*), которые опо-

средуют восприятие соотношения красного (R) и дальнего красного (FR) света [12]. Механизм их действия заключается в том, что при высоком соотношении R:FR активируется *E3*, а при низком - *E4*, что приводит к индукции экспрессии *E1* и задержке цветения. Функциональные аллели *E3-Ha* и *E4* обеспечивают нормальную фотопериодическую чувствительность, тогда как рецессивные аллели *e3-tr* и *e4-SORE* с потерей функции обеспечивают фотопериодическую нечувствительность [13].

Гены *E1-E4* функционируют в системе эпистатических взаимодействий, образуя иерархическую сеть, где *E1* занимает верхний уровень [14]. В этой сети *E1* подавляет гены цветения непосредственно, *E2* модулирует амплитуду колебаний *E1*, а *E3* и *E4* регулируют экспрессию *E1* в зависимости от световых условий.

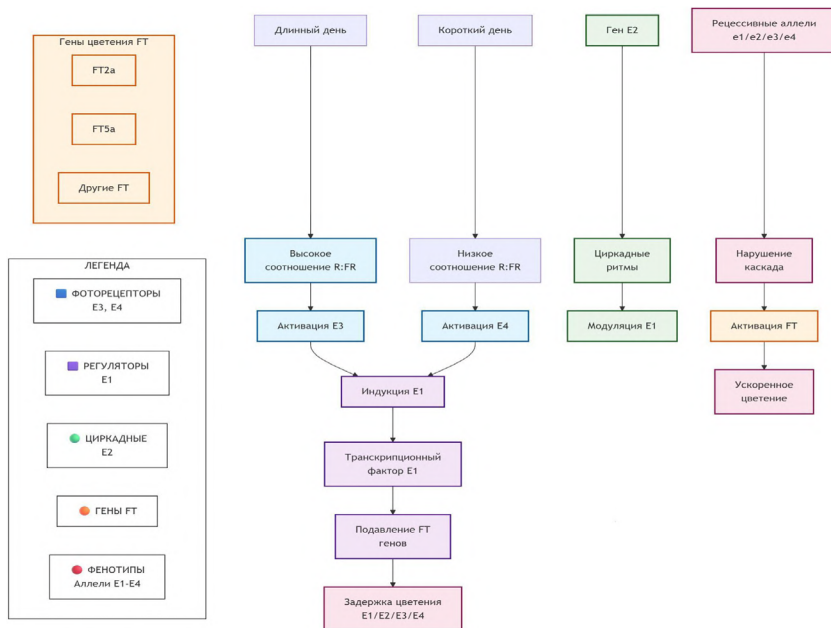


Рис. 1. Общая схема работы генов семейства *E1*, *E2*, *E3*, *E4*

(схема была создана опираясь на работы *E1*: Xia et al., 2012; *E2*: Watanabe et al., 2011; *E3/E4*: Liu et al., 2008; Иерархия *E1*>*E3/E4*>*E2*: Tsubokura et al., 2014; *FT2a/FT5a*: Kong et al., 2010)

Fig. 1. General schematic of the function of genes in the *E1*, *E2*, *E3*, and *E4* families (the schematic was created based on the following studies: *E1*: Xia et al., 2012; *E2*: Watanabe et al., 2011; *E3/E4*: Liu et al., 2008; Hierarchy *E1*>*E3/E4*>*E2*: Tsubokura et al., 2014; *FT2a/FT5a*: Kong et al., 2010)

Функциональное взаимодействие генов *E1–E4* формирует сложную регуляторную иерархию, определяющую фотопериодический ответ сои и, как следствие, её группу спелости. Доминантные аллели *E1*, *E3* и *E4* в сочетании с *E2* формируют фенотип позднеспелости, активируя каскад репрессии генов *FT* в условиях длинного дня. В свою очередь, накопление рецессивных аллелей *e1-as*, *e2-ns*, *e3-tr* и *e4-SORE* последовательно ослабляет фотопериодическую чувствительность, что фенотипически проявляется как сокращение вегетационного периода. Наиболее выраженный эффект наблюдается при сочетании рецессивных аллелей *e3-tr* и *e4-SORE*, которые, нарушая работу фитохромов, делают растение практически нечувствительным к длине светового дня. При этом аллель *e1-as* играет роль модулятора, смягчая реессию *E1*, а *e2-ns* усиливает эффект других рецессивных аллелей через циркадную систему. Таким образом, конкретная комбинация аллелей в локусах *E1–E4* напрямую коррелирует с продолжительностью вегетации, что позволяет не только прогнозировать группу спелости, но и целенаправленно конструировать генотипы, адаптированные к конкретным фотопериодическим условиям (Рис. 1).

Что касается функционального назначения и роли генов *E5–E12* в контроле цветения сои, то современные исследования показывают, что эти гены, наряду с основными *E1–E4*, являются частью сложной генетической сети, контролирующей время цветения и созревания сои – ключевые признаки, определяющие её адаптацию к разным широтам и фотопериоду. Следует отметить, что уникального гена *E5*, по-видимому, не существует, так как было установлено, что эффект, изначально приписываемый *E5*, мог быть результатом непреднамеренного скрещивания и связан с аллелем другого локуса, *E2-dl* [15]. Локусы *E6* и *J*, способствующие раннему цветению в условиях короткого дня, тесно связаны между собой, причём *E6* является ортологом гена *Arabidopsis EARLY FLOWERING 3 (ELF3)*, а белок *J* связывается с промотором гена *E1* – главного репрессора цветения – и подавляет его экспрессию, тем самым снимая блокировку с генов, способствующих цветению [16; 17]. В противоположность им, гены *E7* и *E8* связаны с поздним цветением, где *E7* тесно сцеплен с локусом *E1* на хромосоме 6, а *E8* находится на хромосоме 4, и оба гена задерживают цветение и созревание в условиях длинного дня [15]. Что касается генов *E9* и *E10*, то они были идентифицированы как *GmFT2a* и *GmFT4* соответственно, относящиеся к семейству генов *FLOWERING LOCUS T (FT)*, которые являются мощными активаторами цветения (флорогенами), и их функция противоположна репрессорам, таким как *E1* [17]. Наконец, не-

давно идентифицированный локус *E11*, расположенный на хромосоме 7, способствует цветению в условиях длинного дня [18; 19].

Практическое значение для селекции заключается в том, что комбинации рецессивных аллелей *e1-as*, *e2-ns*, *e3-tr* и *e4-SORE* позволяют создавать сорта с ультраранним типом спелости, адаптированные к северным регионам возделывания [5]. Молекулярное маркирование этих генов значительно ускоряет селекционный процесс, позволяя проводить отбор на ранних этапах онтогенеза.

Целью данного исследования являлось провести молекулярное генотипирование коллекции сои по генам фотопериодической чувствительности *E1*, *E2*, *E3* и *E4* с целью установления связи между их аллельными состояниями и полевыми характеристиками спелости, а также верифицировать прогностическую значимость данных маркеров для использования в селекционных программах.

Материалы и методы

В исследовании использовали 46 сортов сои различного эколого-географического происхождения. На основе полевой оценки, проведённой в соответствии с общепринятой методикой для конкретного региона возделывания, сорта с 1 по 23 классифицировали как скороспелые, а с 24 по 46 – как позднеспелые (Табл. 1). Данная фенотипическая классификация служила референсной для последующих генетических анализов.

Таблица 1.

Сорта и их происхождение
Table 1. Varieties and Their Origins

№	Название сорта	Оригинатор	Период вегетации, дни	№	Название сорта	Оригинатор	Период вегетации, дни
1	Топаз	ВНИИ сои	98	24	Алёна	ВНИИ сои	115
2	Сентябринка	ВНИИ сои	101	25	Селена	ВНИИМК	116
3	1Б-9 (Эос)	КрасГАУ	93	26	Шераза	КВС Русь	119
4	Б-114	КрасГАУ	92	27	Дарья Гу	Амурагрохим	119
5	7-31	КрасГАУ	94	28	№ 1-2014 J 72	КНР	116
6	470	КрасГАУ	89	29	№ 4-2014 J 78	КНР	120
7	Г-23	КрасГАУ	85	30	С 15003	Франция	117
8	30/10/60	КрасГАУ	82	31	Максус	Канада	118

9	A-19	КрасГАУ	85	32	Кассиди	Канада	118
10	Д-70	КрасГАУ	93	33	Саска	Канада	116
11	Ж-87	КрасГАУ	91	34	Каната	Канада	118
12	Заряница	Омский АНЦ, КрасГАУ	94	35	Киото	Канада	121
13	Сибириада	Омский АНЦ	92	36	Кофу	Канада	116
14	Краснооб- ская	СФНЦА РАН	85	37	Опус	Канада	116
15	СибНИ- ИК-9	СФНЦА РАН	92	38	Norpro	США	117
16	R-7	СФНЦА РАН	91	39	Council	США	125
17	Гаринская	СФНЦА РАН	91	40	Parcer	США	121
18	СНК-282	СФНЦА РАН	90	41	NE-1900	США	123
19	СК Артика	СОКО Крас- нодар	93	42	НС Катя	Сербия	116
20	Марева	ФНАЦ ВИМ	94	43	Precose 90	Румыния	124
21	Semu 8001	Германия	94	44	Заря	Болгария	127
22	Vilnesis	Франция	94	45	Алина	Молдова	121
23	Augusta	Польша	94	46	Бонус	ВНИИ сои	115

Геномную ДНК выделяли из 100 мг молодых листьев индивидуальных растений с использованием набора «ДНК-Экстран-3» согласно протоколу производителя. Концентрацию и чистоту препаратов оценивали на спектрофотометре EZDgor. Для дальнейшей работы отбирали образцы с соотношением A260/280 в диапазоне 1,8–2,0.

Генотипирование четырёх основных локусов спелости (*E1*, *E2*, *E3*, *E4*) проводили с использованием аллель-специфичных маркеров. Для гена *E1* применяли раздельные ПЦР с тремя праймерными парами для идентификации аллелей *E1*, *e1-as* и *e1-fs*. Анализ гена *E2* выполняли с помощью CAPS-маркера с последующей рестрикцией PCR-продукта эндонуклеазой *DraI*. Генотипирование гена *E3* проводили в серии ПЦР с тремя разными парами праймеров для детекции аллелей *E3-Ha*, *E3-Mi* и *e3-tr*. Для гена *E4* использовали ПЦР с прямым и двумя обратными праймерами для дифференцировки аллелей *E4* и *e4-SORE-1*. Олигонуклеотидные последовательности для проведения исследования были взяты из научной литературы (Табл. 2).

Таблица 2.

**Последовательности праймеров для идентификации генов
фотопериодической чувствительности у сои**

Table 2. Primer sequences for the identification of photoperiod-sensitive genes in soybeans

Ген	Хромо- сома	Праймеры (5' → 3')	Длина ПЦР-про- дукта (п.н.)	Примечания	Источ- ник
<i>E1</i>	6	F1: CACTCAAATTAAGCCCT- TICA R1: TCCGATCTCAT- CACCTTTCC F2: GGGAGCAGTGT- CAAAAGAAGGA R2: GTGCATTTCCCTTAGITAAT- TAATA F3: GGGAGCAGTGT- CAAAAGAAGGA R3: GTGCATTTCCCTTAGITAAT- TAATA	<i>E1/e1-as/e1- fs</i> : 547 <i>E1/e1-as</i> : 1403	F1R1 - общие для <i>E1</i> , <i>e1-as</i> , <i>e1-fs</i> F2R2 - специ- фичны для <i>E1</i> F3R3 - специ- фичны для <i>e1-as</i>	Watanabe et al. (2011) Perfil'ev et al. (2021)
<i>E2</i>	10	F: GAAGCCCATCAGAGGCAT- GTCTTATT R: AAGCCTATGCCAGCTAGG- TATT	<i>E2</i> : 130 <i>e2-ns</i> : 107 + 23	CAPS-маркер + рестрикция <i>DraI</i>	Xia et al. (2012)
<i>E3</i>	19	F: TGGAGGGTATTGGATGATGC R1: CTAGGCTCGGTGTTTCAG R2: CGGTCAAGAGCCACCATGAG R3: GTCTTACAAGTTCTTTAGGAG	<i>E3-Mi</i> : 1339 <i>E3-Ha</i> : 558 <i>e3-tr</i> : 275	Дифференци- ация по длине ампликона	Watanabe et al. (2009)
<i>E4</i>	20	F: AGACGTAGTGCTAGGGCTAT R1: GCATCTCGCATCACCAGATCA R2: GCTCATCCCTTCAATTTCAG	<i>E4</i> : 1229 <i>e4-SORE-1</i> : 837	Дифференци- ация по длине ампликона	Liu et al. (2008)

ПЦР проводилась по следующему протоколу: предварительная денатурация (95 °C) – 5 мин; 40 циклов: денатурация (95 °C) – 10 сек, гибридизация (55–60 °C) – 20 сек, элонгация (72 °C) – 35 сек; финальная элонгация (72 °C) – 5 мин.

Детекция продуктов амплификации. Результаты ПЦР и рестрикционного анализа анализировали методом электрофореза в 1,5% агарозном геле с окрашиванием бромистым этидием и анализом в системе визуализации Gel Doc Ez Imager (“Bio Rad”). Размер продуктов ПЦР была определена с помощью маркера длин 50 + bp DNA Ladder (Евроген, РФ).

Для статистического анализа данных использовались методы дескриптивной статистики с расчетом частот встречаемости генотипов по

генам E1-E4 и процентного распределения доминантных и рецессивных гомозигот в коллекции сортов, а также группировка данных по категориям спелости с определением средних значений.

Перед анализом проводили кодирование генотипов по ординальной шкале: 0 - рецессивная гомозигота (e/e), 1 - гетерозигота (E/e), 2 - доминантная гомозигота (E/E). На основе индивидуальных баллов генов рассчитывались интегральные индексы: сумма рецессивных аллелей (0-4) и сумма доминантных гомозигот (0-4). Категориальные признаки спелости преобразовывались в числовую шкалу (1-ультраскороспелый, 2-скороспелый, 3-среднеспелый, 4-позднеспелый) и бинарные переменные для классификации.

Корреляционный анализ включал применение бисериальной корреляции Пойнта для оценки связи между количеством аллелей и бинарными признаками спелости, корреляции Спирмена для анализа монотонной связи между количеством рецессивных аллелей и шкалой спелости, и расчет коэффициента детерминации R^2 для оценки объясненной дисперсии.

Регрессионный анализ проводился с помощью линейной регрессии для количественной оценки влияния рецессивных аллелей на спелость и определения силы дозового эффекта через угол наклона регрессионной прямой.

Для прогнозирования принадлежности к группам спелости применялся метод случайного леса с оценкой важности признаков, валидацией модели на обучающей и тестовой выборках (70/30) и оценкой точности классификации.

Анализ дозового эффекта включал построение градиентных шкал, выявление пороговых эффектов и сравнение средних значений между группами с разным генотипическим профилем. Визуализация данных осуществлялась с использованием столбчатых диаграмм, точечных графиков, линейных трендов и точечных диаграмм с цветовой кодировкой (scatter plot).

Во всех анализах уровень значимости составлял $p < 0,05$, а доверительные интервалы рассчитывались через стандартные ошибки регрессионных моделей. Все анализы проводились с использованием Python 3.9 и библиотек `scipy`, `sklearn`, `pandas` с применением стандартных параметров методов.

Результаты и обсуждения

Анализ данных генотипирования 46 сортов и линий сои по четырём основным генам фотопериодической чувствительности (E1, E2, E3, E4) выявил четкие генетические паттерны, связывающие аллельные состояния с группами спелости (Табл.3). Наиболее распространённой комбинацией

цией аллелей среди исследованных образцов оказался *e1as/e2ns/E3-Ha/e4-SORE*. Этот профиль характерен для многих сортов, классифицируемых как скороспелые и среднеспелые (напр., Топаз, Сентябринка, Б-114). Это указывает на то, что рецессивные аллели *e1as* и *e2ns* в сочетании с рецессивным *e4-SORE* являются основой для создания раннеспелых форм в условиях России, даже при наличии доминантного аллеля *E3-Ha*.

Таблица 3.

**Сравнительный анализ аллельного состояния генов *E1-E4*
и групп спелости у сортов сои**

**Table 3. Comparative Analysis of the Allelic Status of the *E1-E4* Genes
and Maturity Groups in Soybean Varieties**

№	Сорт	Ген				Группа спелости сортов по классификации	Группа спелости сортов согласно маркерам
		E1/e1as	E2/e2ns	E3-Ha/e3-tr	E4/e4-SORE		
1	Топаз	e1as	e2ns	E3-Ha	e4-SORE	Ультраскороспелый	Скороспелый
2	Сентябринка	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/ e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
3	1Б-9 (Эос)	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/ e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
4	Б-114	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/ e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
5	7-31	e1as	e2ns	E3-Ha	E4	Скороспелый	Среднеспелый
6	470	e1as	e2ns	E3-Ha	E4	Ультраскороспелый	Среднеспелый
7	Г-23	e1as	E2	E3-Ha	E4/e4-SORE	Ультраскороспелый	Позднеспелый
8	30/10/60	e1as	E2	E3-Ha	E4/ e4-SORE	Ультраскороспелый	Позднеспелый
9	А-19	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/ e4-SORE	Ультраскороспелый	Среднеспелый
10	Д-70	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/ e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
11	Ж-87	E1	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Позднеспелый
12	Заряница	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
13	Сибиряда	e1as	e2ns	e3-tr	E4/e4-SORE	Скороспелый	Скороспелый
14	Краснооб- ская	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Ультраскороспелый	Среднеспелый
15	СибНИИК-9	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
16	Р-7	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
17	Гаринская	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
18	СНК-282	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Ультраскороспелый	Среднеспелый
19	СК Артика	E1	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Позднеспелый
20	Магева	e1as	e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Среднеспелый
21	Semu 8001	e1as	E2	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Позднеспелый
22	Vilnesis	E1	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Позднеспелый
23	Augusta	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Скороспелый	Позднеспелый
24	Алёна	e1as	E2/ e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
25	Селена	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
26	Шераза	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
27	Дарья Гу	E1	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый

28	№ 1-2014 J 72	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
29	№ 4-2014 J 78	E1	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
30	С 15003	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
31	Максус	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
32	Кассиди	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
33	Саска	e1as	E2	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
34	Каната	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
35	Киото	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
36	Кофу	e1as	E2/e2ns	E3-Ha/ e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
37	Опус	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
38	Norpro	e1as	E2/e2ns	e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
39	Council	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
40	Parcer	e1as	E2/e2ns	E3-Ha	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
41	NE-1900	e1as	E2	E3-Ha/ e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
42	НС Катя	e1as	E2/e2ns	E3-Ha/ e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
43	Precose 90	e1as	E2/e2ns	E3-Ha/ e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
44	Заря	e1as	E2/e2ns	E3-Ha/ e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
45	Алина	e1as	E2/e2ns	E3-Ha/ e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый
46	Бонус	e1as	E2/e2ns	E3-Ha/ e3-tr	E4/e4-SORE	Позднеспелый	Позднеспелый

*Примечание: доминантные аллели выделены полужирным шрифтом

*Note: Dominant alleles are highlighted in bold

Для визуальной верификации результатов ПЦР-амплификации и рестрикционного анализа были получены электрофореграммы, подтверждающие специфичность используемых маркеров и позволяющие однозначно идентифицировать аллельные состояния целевых генов (Рисунок 2). На представленных фореграммах четко видны продукты амплификации ожидаемых размеров, соответствующих различным аллельным вариантам генов E1-E4.

Наличие доминантного аллеля *E1* (напр., у сортов Ж-87, СК Арктика, Vilnesis) практически всегда переводит сорт в группу позднеспелых. Это подтверждает его роль как главного репрессора цветения, что согласуется с уже имеющимися литературными данными [20]. Интересный случай представляет сорт Ж-87, имеющий *E1*, но фенотипически отнесенный к скороспелым. Это несоответствие может объясняться эпистатическим подавлением активности *E1* рецессивными аллелями других генов или влиянием модифицирующих факторов [13]. Чтобы окончательно подтвердить

гипотезу для сорта Ж-87, можно провести дополнительный анализ. Глубокое генотипирование на другие гены спелости (например, *E6*, *J*) или секвенирование промоторной области гена *E1* у этого сорта может выявить новые мутации-модификаторы.

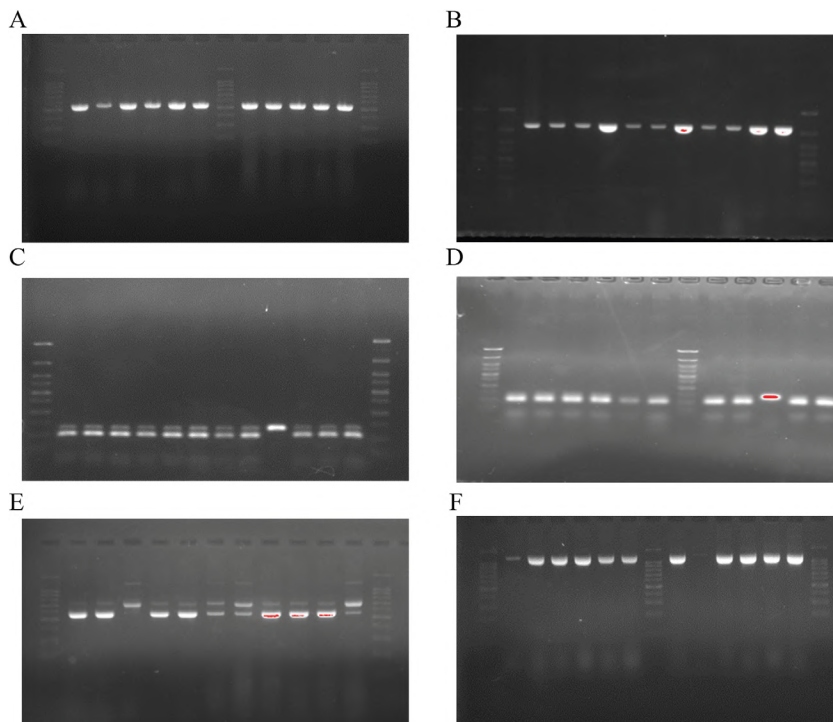


Рис. 2. Электрофореграммы ПЦР-амплификации и рестрикционного анализа генов фотопериодической чувствительности сои

A-B: Детекция аллелей гена *E1* (образцы 13-23 и 35-46); C-D: Анализ гена *E2* (образцы 13-23 и 25-36); E: Генотипирование гена *E3* (образцы 36-46); F: Дифференциация аллелей гена *E4* (образцы 24-35). М - маркер молекулярной массы.

Fig. 2. Electropherograms of PCR amplification and restriction analysis of soybean photoperiod sensitivity genes

A-B: Detection of *E1* gene alleles (samples 13-23 and 35-46); C-D: Analysis of the *E2* gene (samples 13-23 and 25-36); E: Genotyping of the *E3* gene (samples 36-46); F: Differentiation of alleles of the *E4* gene (samples 24-35). M – molecular weight marker.

Доминантный аллель *E2* (напр., у Г-23, 30/10/60, Саска) в комбинации с *E1* и *E3*-На устойчиво ассоциируется с позднеспелостью. Наличие у многих

сортов (Vilnesis, Augusta, Алёна) гетерозиготных состояний по гену *E2* (*E2/e2ns*) указывает на непрерывный процесс расщепления в популяциях. Это предоставляет селекционерам возможность проводить отбор в потомстве на фиксацию желаемого рецессивного аллеля *e2ns* для ускорения созревания.

Рецессивный аллель *e3-tr* демонстрирует сильный эффект ускорения развития. Сорт Сибириада (*e1as/e2ns/e3-tr/E4*) имеет полное соответствие между полевыми оценками (“скороспелый”) и маркерной группой (“скороспелый”). Это делает *e3-tr* ценным аллелем для селекции ультраранних сортов. Маркеры с кодоминантным типом наследования (как для гена *E3*) особенно ценны, так как позволяют напрямую идентифицировать гетерозигот и контролировать передачу целевых аллелей в гибридных поколениях. Это особенно ценно для селекционных программ, нацеленных на быстрое введение целевых аллелей в элитные линии, как это было успешно продемонстрировано в работе Yerzhebayeva et al., 2023 [4].

Значительное число сортов демонстрирует несовпадение группы спелости по традиционной классификации и группы, прогнозируемой по маркерам. Например: Топаз классифицируется как “ультраскороспелый”, но по маркерам отнесен к “скороспелым”. Несколько сортов (СибНИИК-9, Зарница и др.) являются “скороспелыми” по полевым данным, но по маркерам – “среднеспелыми”. Эти расхождения могут объясняться влиянием других, неучтённых в данном анализе генов спелости (*E5-E12*), эпистатическими взаимодействиями, когда комбинация генов даёт неаддитивный эффект, а также погрешностями полевых испытаний, зависящих от конкретных погодных условий. Выявленные расхождения между полевыми и маркерными оценками спелости (например, у сортов Топаз, СибНИИК-9, Зарница) свидетельствуют о комплексном характере генетического контроля признака. Наряду с установленным ключевым влиянием генов *E1-E4*, на продолжительность вегетационного периода, вероятно, оказывают влияние другие генетические факторы, включая неучтённые в данном исследовании локусы (*E5-E12*) и эпистатические взаимодействия между ними. Кроме того, определенный вклад в наблюдаемые несоответствия могли внести погодные условия во время проведения полевых испытаний. Наши данные, как и результаты недавнего масштабного GWAS на 915 линиях сои, свидетельствуют о том, что предсказательная модель, основанная исключительно на генах *E1-E4*, является необходимым, но недостаточным инструментом. Идентификация новых значимых локусов на хромосомах 6 и 20, независимых от основных *E*-генов, указывает на существование обширной генетической сети, контролирующей цветение [21].

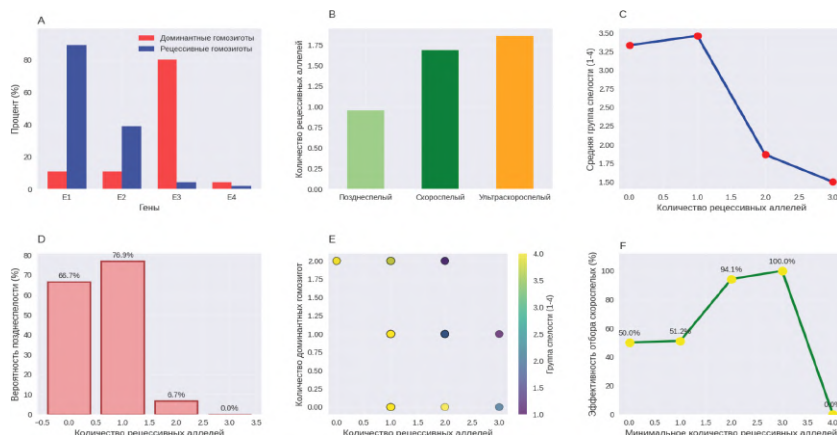


Рис. 3. Анализ влияния генов *E1-E4* на спелость сои: А - Распределение доминантных (Е, красные столбцы) и рецессивных (е, синие столбцы) аллелей генов *E1-E4* в изученной коллекции сортов; В - Градиент рецессивных аллелей по группам спелости: среднее количество рецессивных аллелей последовательно снижается от ультраскороспелых к позднеспелым формам; С - Дозовый эффект рецессивных аллелей: уравнение линейной регрессии $y = -0,8x + [\text{константа}]$ подтверждает, что каждый дополнительный рецессивный аллель снижает номер группы спелости в среднем на 0,8 пункта ($R^2 = 0,73$); D - Вероятность принадлежности к группе позднеспелых сортов в зависимости от количества рецессивных аллелей. Критический порог в 3 аллеля обеспечивает 0% вероятность позднеспелости; E - Пространственное распределение сортов в координатах главных компонент, выявленных методом случайного леса, с цветовой кластеризацией по группам спелости; F - Эффективность отбора скороспелых генотипов в зависимости от порогового значения рецессивных аллелей. Критерий отбора ≥ 3 рецессивных аллелей обеспечивает 100% эффективность.

Fig. 3. Analysis of the effect of the *E1-E4* genes on soybean maturity: А – Distribution of dominant (E, red bars) and recessive (e, blue bars) alleles of the *E1-E4* genes in the studied collection of varieties; В – Gradient of recessive alleles across maturity groups: the average number of recessive alleles decreases progressively from ultra-early-maturing to late-maturing forms; С – Dose effect of recessive alleles: the linear regression equation $y = -0.8x + [\text{constant}]$ confirms that each additional recessive allele reduces the ripening group number by an average of 0.8 points ($R^2 = 0.73$); D – Probability of belonging to the late-maturing group depending on the number of recessive alleles. A critical threshold of 3 alleles results in a 0% probability of late maturity; E – Spatial distribution of varieties in the principal component coordinates identified using the random forest method, with color-coded clustering by ripeness groups; F – Efficiency of selecting early-maturing genotypes as a function of the threshold value for recessive alleles. A selection criterion of ≥ 3 recessive alleles ensures 100% efficiency.

Полученные результаты демонстрируют распределение доминантных (красные столбцы) и рецессивных (синие столбцы) гомозигот по четырем

изученным генам (Рис. 3А). Анализ выявил преобладание доминантных аллелей *E3-Ha* и *E4*, тогда как гены *E1* и *E2* показали более сбалансированное соотношение, что свидетельствует о смещении коллекции в сторону позднеспелых генотипов. Установлена четкая зависимость между количеством рецессивных аллелей и группой спелости (Рис. 3В). Наблюдается последовательный переход к более ранним группам по мере увеличения числа рецессивных аллелей, что визуально подтверждается градиентом от красного (позднеспелые) к зеленому (ультраскороспелые). Количественный анализ подтвердил дозовый эффект рецессивных аллелей на спелость (Рис. 3С). Статистически значимый наклон линии (-0,4 пункта на аллель) и резкое снижение показателя между 2 и 3 аллелями подчеркивают кумулятивный характер их влияния. Критическим порогом определено наличие 3 рецессивных аллелей, при котором вероятность позднеспелости снижается до 0% (Рис. 3D). Данный критерий обладает высокой практической ценностью для селекции, обеспечивая надежный ориентир для отбора перспективных генотипов. Исследование генетического ландшафта коллекции выявило пространственное разделение сортов по скороспелости (Рис. 3Е). Скороспелые формы (синие точки) концентрируются в правом нижнем квадранте с преобладанием рецессивных аллелей, тогда как позднеспелые (красные точки) занимают левый верхний квадрант. Отсутствие образцов в правом верхнем квадранте подтверждает антагонизм между изучаемыми аллелями. Практическая значимость работы подтверждена расчетом эффективности селекции (Рис. 3F). Порог отбора в 3 рецессивных аллеля обеспечивает 100% эффективность, представляя оптимальный баланс между селекционной строгостью и сохранением генетического разнообразия.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило прогностическую значимость молекулярных маркеров генов *E1-E4* для оценки группы спелости у сои. Установлено, что рецессивные аллели *e1as*, *e2ns* и *e4-SORE* формируют генетическую основу скороспелости, тогда как доминантный аллель *E1* является ключевым фактором позднеспелости. Наличие рецессивного аллеля *e3-tr*, как в сорте Сибириада, продемонстрировало сильный эффект и представляет значительный интерес для дальнейшего изучения в качестве донора ультраскороспелости. Выявленные расхождения между полевыми и маркерными данными указывают на участие дополнительных генетических факторов в контроле продолжительности вегетационного периода. Для селекционной практики особый интерес представляют сорта-доноры Сибириада (носитель

e3-tr) и Топаз (ультраскороспелый фенотип), определенные как ценные источники признака раннеспелости. Показана практическая применимость маркеров, в особенности кодоминантного маркера гена *E3*, для эффективного отбора генотипов с целевыми аллелями в селекционных программах.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках темы НИР № 082-2025-0001.

Список литературы / References

1. Sun, Z., Yuan, L., Wang, Y., Fang, R., Lin, X., Li, H., Chen, L., Wu, Y., Huang, X., Kong, F., Liu, B., Lu, S., & Kong, L. (2024). Post-flowering photoperiod sensitivity of soybean in pod-setting responses. *Biology*, 13(11), 868. <https://doi.org/10.3390/biology13110868>. EDN: <https://elibrary.ru/XKDXWQ>
2. Fang, C., Sun, Z., Li, S., Wang, Y., Li, H., Ren, T., Han, S., Li, Y., Li, S., Wu, T., Liu, B., Lu, S., & Kong, L. (2024). Subfunctionalisation and self-repression of duplicated E1 homologues finetunes soybean flowering and adaptation. *Nature Communications*, 15, 6184. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50623-3>. EDN: <https://elibrary.ru/ZVGXTG>
3. Li, J., Li, Y., Agyenim-Boateng, K., Zhang, Y., Liu, Y., & Qi, Z. (2024). Natural variation of domestication-related genes contributed to latitudinal expansion and adaptation in soybean. *BMC Plant Biology*, 24, 651. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05382-0>. EDN: <https://elibrary.ru/OMGNUY>
4. Yerzhebayeva, R., Didorenko, S., Amangeldiyeva, A., Daniyarova, A., Mazkirat, S., Zinchenko, A., & Shavrukov, Y. (2023). Marker-assisted selection for early maturing E loci in soybean yielded prospective breeding lines for high latitudes of Northern Kazakhstan. *Biomolecules*, 13(7), 1146. <https://doi.org/10.3390/biom13071146>. EDN: <https://elibrary.ru/SUJPCI>
5. Xia, Z., Zhai, H., Wu, H., Xu, K., Watanabe, S., & Harada, K. (2021). The synchronized efforts to decipher the molecular basis for soybean maturity loci E1, E2, and E3 that regulate flowering and maturity. *Frontiers in Plant Science*, 12, 632754. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.632754>. EDN: <https://elibrary.ru/XSDZBC>
6. Tsubokura, Y., Watanabe, S., Xia, Z., Kanamori, H., Yamagata, H., Kaga, A., Katayose, Y., Abe, J., Ishimoto, M., & Harada, K. (2014). Natural variation in the genes responsible for maturity loci E1, E2, E3 and E4 in soybean. *Annals of Botany*, 113(3), 429–441. <https://doi.org/10.1093/aob/mct269>
7. Kipshakbayeva, G., Zargar, M., Rysbekova, A., Ashirbekova, I., Tleulina, Z., Aman-tayev, B., Kipshakbayeva, A., Baitelenova, A., Stybayev, G., & Nejad, M. S. (2024). Assessment of the genetic parameters of soybean genotypes for precocity and pro-

- ductivity in the various cultivation conditions. *Heliyon*, 10(16), e36135. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36135>. EDN: <https://elibrary.ru/VVSMPL>
8. Wan, Z., Liu, Y., Guo, D., Fan, R., Liu, Y., Xu, K., Zhu, J., Quan, L., Lu, W., Bai, X., & Zhai, H. (2022). CRISPR/Cas9-mediated targeted mutation of the E1 decreases photoperiod sensitivity, alters stem growth habits, and decreases branch number in soybean. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1066820. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1066820>. EDN: <https://elibrary.ru/RXIVOX>
 9. Zhang, X., Zhai, H., Wang, Y., Tian, J., Chen, S., Chu, S., Xin, D., Wu, X., Zhao, Y., Liu, C., Kong, F., & Liu, B. (2016). Functional conservation and diversification of the soybean maturity gene E1 and its homologs in legumes. *Scientific Reports*, 6, 29548. <https://doi.org/10.1038/srep29548>
 10. Wang, L., Li, H., He, M., Dong, L., Huang, Z., Chen, L., Nan, H., Kong, F., Liu, B., & Zhao, X. (2023). GIGANTEA orthologs, E2 members, redundantly determine photoperiodic flowering and yield in soybean. *Journal of Integrative Plant Biology*, 65(1), 188–202. <https://doi.org/10.1111/jipb.13398>. EDN: <https://elibrary.ru/FDDRSX>
 11. Su, T., Wang, Y., Li, S., Wang, L., Kou, K., Kong, L., Cheng, Q., Dong, L., Liu, B., Kong, F., Lu, S., & Fang, C. (2021). A flowering time locus dependent on E2 in soybean. *Molecular Breeding*, 41(5), 35. <https://doi.org/10.1007/s11032-021-01224-1>. EDN: <https://elibrary.ru/ZNFSFU>
 12. Jiang, B., Nan, H., Gao, Y., Tang, L., Yue, Y., Lu, S., Ma, L., Cao, D., Sun, S., Wang, J., Wu, C., Yuan, X., Hou, W., Kong, F., Han, T., & Liu, B. (2014). Allelic combinations of soybean maturity loci E1, E2, E3 and E4 result in diversity of maturity and adaptation to different latitudes. *PLoS One*, 9(8), e106042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106042>
 13. Fedorina, J. V., Khlestkina, E. K., Seferova, I. V., & Vishnyakova, M. A. (2022). Genetic mechanisms underlying the expansion of soybean *Glycine max* (L.) Merr. cultivation to the north. *Ecological Genetics*, 20(1), 13–30. <https://doi.org/10.17816/ecogen83879>. EDN: <https://elibrary.ru/ILIPDF>
 14. Zheng, N., Guo, Y., Wang, S., Zhang, H., Wang, L., Gao, Y., Xu, M., Wang, W., Liu, W., & Yang, W. (2023). Identification of E1-E4 allele combinations and ecological adaptability of soybean varieties from different geographical origins in China. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1222755. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1222755>. EDN: <https://elibrary.ru/QSAZCV>
 15. Dissanayaka, A., Rodriguez, T. O., Di, S., Yan, F., Githiri, S. M., Rodas, F. R., Abe, J., & Takahashi, R. (2016). Quantitative trait locus mapping of soybean maturity gene E5. *Breeding Science*, 66(3), 407–415. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.15160>
 16. Lv, T., Wang, L., Zhang, C., Liu, S., Wang, J., Lu, S., Fang, C., Kong, L., Li, Y., Li, Y., Hou, X., Liu, B., Kong, F., & Li, X. (2022). Identification of two quantitative genes controlling soybean flowering using bulked-segregant analysis and genetic mapping.

- Frontiers in Plant Science*, 13, 987073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.987073>. EDN: <https://elibrary.ru/IKXNHW>
17. Zhao, C., Takeshima, R., Zhu, J., Xu, M., Sato, M., Watanabe, S., Kanazawa, A., Liu, B., Kong, F., Yamada, T., & Abe, J. (2016). A recessive allele for delayed flowering at the soybean maturity locus E9 is a leaky allele of FT2a, a FLOWERING LOCUS T ortholog. *BMC Plant Biology*, 16, 20. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0704-9>. EDN: <https://elibrary.ru/DYFZFR>
 18. Yang, G., Li, W., Fan, C., Liu, M., Liu, J., Liang, W., Wang, L., Di, S., Fang, C., Li, H., Ding, G., Bi, Y., & Lai, Y. (2022). Genome-wide association study uncovers major genetic loci associated with flowering time in response to active accumulated temperature in wild soybean population. *BMC Genomics*, 23, 749. <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08970-2>. EDN: <https://elibrary.ru/LDBJFF>
 19. Lee, S. H., Choi, C. W., Park, K. M., Jung, W. H., Chun, H. J., Baek, D., Cho, H. M., Jin, B. J., Park, M. S., No, D. H., Lim, L. H., Shim, S. I., Chung, J. I., & Kim, M. C. (2021). Diversification in functions and expressions of soybean FLOWERING LOCUS T genes fine-tunes seasonal flowering. *Frontiers in Plant Science*, 12, 613675. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.613675>. EDN: <https://elibrary.ru/MCPLII>
 20. Xu, M., Yamagishi, N., Zhao, C., Takeshima, R., Kasai, M., Watanabe, S., Kanazawa, A., Yoshikawa, N., Liu, B., Yamada, T., & Abe, J. (2015). The soybean-specific maturity gene E1 family of floral repressors controls night-break responses through down-regulation of FLOWERING LOCUS T orthologs. *Plant Physiology*, 168(4), 1735–1746. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00763>
 21. Mohamedikbal, S., Al-Mamun, H. A., Marsh, J. I., Upadhyaya, S., Danilevicz, M. F., Nguyen, H. T., Valliyodan, B., Mahan, A., Batley, J., & Edwards, D. (2024). Local haplotyping reveals insights into the genetic control of flowering time variation in wild and domesticated soybean. *The Plant Genome*, 17(4), e20528. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20528>. EDN: <https://elibrary.ru/JDTLWN>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Тимкин Павел Дмитриевич, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологии

Всероссийский научно-исследовательский институт сои

ул. Игнатьевское шоссе, 19, г. Благовещенск, 675005, Российская Федерация
tpd@vniisoi.ru

Линская Полина Михайловна, лаборант лаборатории биотехнологии

Всероссийский научно-исследовательский институт сои

ул. Игнатьевское шоссе, 19, г. Благовещенск, 675005, Российская Федерация
elduspaladium@gmail.com

Зажигалкина Ангелина Сергеевна, лаборант лаборатории биотехнологии
Всероссийский научно-исследовательский институт сои
ул. Игнатьевское шоссе, 19, г. Благовещенск, 675005, Российская Федерация
Unicorn66666@icloud.com

Галиченко Анна Петровна, научный сотрудник лаборатории селекции и генетики
Всероссийский научно-исследовательский институт сои
ул. Игнатьевское шоссе, 19, г. Благовещенск, 675005, Российская Федерация
gap@vniiso.ru

Пензин Андрей Андреевич, канд. с-х. наук, заведующий лабораторией биотехнологии
Всероссийский научно-исследовательский институт сои
ул. Игнатьевское шоссе, 19, г. Благовещенск, 675005, Российская Федерация
raa@vniiso.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Pavel D. Timkin, Junior Research Fellow, Biotechnology Laboratory
All-Russian Research Institute of Soybeans
19, Ignatievskoye Shosse, Blagoveshchensk, 675005, Russian Federation
tpd@vniiso.ru
SPIN-code: 2729-2815
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6655-1049>

Polina M. Linskaya, Laboratory Assistant, Biotechnology Laboratory
All-Russian Research Institute of Soybeans
19, Ignatievskoye Shosse, Blagoveshchensk, 675005, Russian Federation
elduspaladium@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9734-8464>

Angelina S. Zazhigalkina, Laboratory Assistant, Biotechnology Laboratory
All-Russian Research Institute of Soybeans
19, Ignatievskoye Shosse, Blagoveshchensk, 675005, Russian Federation
Unicorn66666@icloud.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7285-5806>

Anna P. Galichenko, Research Fellow, Selection and Genetics Laboratory
All-Russian Research Institute of Soybeans
19, Ignatievskoye Shosse, Blagoveshchensk, 675005, Russian Federation

gap@vniisoi.ru

SPIN-code: 5274-8503

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4445-3779>

Andrey A. Penzin, Ph.D. in Agricultural Sciences, Head of Biotechnology Laboratory

All-Russian Research Institute of Soybeans

19, Ignatievskoye Shosse, Blagoveshchensk, 675005, Russian Federation

paa@vniisoi.ru

SPIN-code: 1467-9500

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8578-9818>

ResearcherID: ABA-1128-2020

Поступила 01.10.2025

После рецензирования 10.12.2025

Принята 26.12.2025

Received 01.10.2025

Revised 10.12.2025

Accepted 26.12.2025

**Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений /
Agricultural Chemistry, Soil Science,
Plant Protection and Quarantine**

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1465](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1465)EDN: [ZSBEJT](https://www.edn.ru/ZSBEJT)

UDC 632.955



**Evaluation of the nematicidal effect
of biodegradable polymer-based granules containing
isothiocyanates on *Globodera rostochiensis***

**A.A. Sukhanova¹, K.E. Zabolotnaya¹, A.A. Churakov²,
S.N. Syrtsov¹, E.V. Brilkova¹, A.N. Boyandin¹**

¹*Reshetnev State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation*

²*Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

Abstract

Background. Golden potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*, GPCN) is a dangerous quarantine pest of potato, and efficacy of usual nematicides is often limited. One possible solution is development of formulations with gradual and controlled release of active ingredients by their encapsulation into biodegradable carriers. Isothiocyanates (ITCs) have been previously shown as effective nematicides.

Purpose. The aim of this work was to develop and study granules composed of polycaprolactone (PCL) and bentonite loaded with ITCs (allyl isothiocyanate (AITC), benzyl isothiocyanate (BITC), and 2-phenylethyl isothiocyanate (PEITC)) against GPCN for soil application.

Materials and methods. Granules of poly-ε-caprolactone with bentonite containing ITCs as nematicide agents were obtained by extrusion. The encapsulation efficiency of ITCs was determined by chromatography. Efficacy of the granules against GPCN was assessed *in vitro* by mortality of nematodes and in laboratory soil ecosystem on potato plants of two varieties, 'Krasnoyarsky Ranniy' and 'Innovator', by yield assessment.

Results. *In vitro* experiments confirmed the efficacy of PCL/bentonite/isothiocyanate granules in inhibiting the development of second-stage juveniles (J2) of GPCN. The PCL/(PEITC/bentonite) granules achieved 100% nematode mortality within 48 hours, acting 1 to 2 times faster than those containing BITC or AITC. In soil experiments with

potato plants, treatment with the PCL/(PEITC/bentonite) granules reduced the number of cysts on roots by 4.2–5.0 times relative to the control; a result was comparable to that of the commercial reference product ‘Vydate® 5G’. Application of the PCL/(PEITC/bentonite) granules enhanced the yield of the ‘Innovator’ potato variety.

Keywords: polycaprolactone; bentonite; isothiocyanates; granules; extrusion; nematodes; potato varieties; nematocidal efficacy

For citation. Sukhanova, A. A., Zabolotnaya, K. E., Churakov, A. A., Syrtsov, S. N., Brilkova, E. V., & Boyandin, A. N. (2026). Evaluation of the nematocidal effect of biodegradable polymer-based granules containing isothiocyanates on *Globodera rostochiensis*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 427–453. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1465>

Оценка нематического действия биоразлагаемых полимерных гранул, содержащих изотиоцианаты, на *Globodera rostochiensis*

А.А. Суханова¹, К.Е. Заболотная¹, А.А. Чураков²,
С.Н. Сырцов¹, Е.В. Брилькова¹, А.Н. Бояндин¹

¹Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация

²Красноярский государственный аграрный университет,
Красноярск, Russian Federation

Аннотация

Обоснование. Золотистая картофельная нематода (*Globodera rostochiensis*, ЗКН) – опасный карантинный вредитель картофеля, эффективность обычных нематических в отношении которого зачастую ограничена. Одним из возможных решений является разработка препаратов с постепенным высвобождением активных ингредиентов с помощью их инкапсулирование в биоразлагаемые носители. Изотиоцианаты (ИТЦ) ранее продемонстрировали свою эффективность в качестве нематических.

Цель. Целью данной работы была разработка и исследование гранул почвенного внесения, состоящих из поликапролактона (ПКЛ) и бентонита, нагруженных ИТЦ (аллилизотиоцианатом (АИТЦ), бензилизотиоцианатом (БИТЦ) и 2-фенилэтилизоцианатом (ФЭИТЦ)), для борьбы с ЗКН.

Материалы и методы. Гранулы ПКЛ с бентонитом, содержащие ИТЦ в качестве нематических агентов, были получены методом экструзии. Эффективность инкапсулирования ИТЦ определяли хроматографически. Эффективность гранул против ЗКН оценивали *in vitro* по смертности нематод и в лабораторных условиях

на растениях картофеля двух сортов – «Красноярский ранний» и «Инноватор», – по оценке урожайности.

Результаты. Эксперименты *in vitro* подтвердили эффективность гранул ПКЛ/бентонит/ИТЦ в подавлении развития личинок второй стадии (J2) ЗКН. Гранулы ПКЛ/(ФЭИТЦ/бентонит) обеспечивали 100%-ную гибель нематод в течение 48 часов, действуя до двух раз быстрее гранул, содержащих БИТЦ или АИТЦ. В почвенных экспериментах на картофеле обработка гранулами ПКЛ/(ФЭИТЦ/бентонит) снизила количество цист на корнях в 4,2–5,0 раза по сравнению с контролем; результат был сопоставим с применением коммерческого референтного препарата «Vydate® 5G». Применение гранул ПКЛ/(ФЭИТЦ/бентонит) повысило урожайность картофеля сорта «Инноватор».

Ключевые слова: поликапролактон; бентонит; изотиоцианаты; гранулы; экстрюзия; нематоды; картофель; нематодная активность

Для цитирования. Суханова, А. А., Заболотная, К. Е., Чураков, А. А., Сырцов, С. Н., Брилькова, Е. В., & Бояндин, А. Н. (2026). Оценка нематодного действия биоразлагаемых полимерных гранул, содержащих изотиоцианаты, на *Globodera rostochiensis*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 427–453. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1465>

Introduction

Plant diseases caused by various phytopathogens, such as fungi, bacteria, and nematodes, represent one of the key factors significantly impacting crop yield. Specifically, the golden potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*, GPCN) is a dangerous quarantine pest of potato, capable of causing yield losses ranging from 19% to 90% [2]. The GPCN penetrates plant roots and feeds on cellular contents, disrupting the nutrient uptake process and leading to premature plant death. Despite the use of modern measures to prevent globoderosis, such as chemical treatment with nematicides and agrophytocenotic practices, their efficacy is often limited. Furthermore, they can harm soil microbiota, plants, and animals, leading to adverse environmental consequences [1; 4]. As a result, the use of several chemical nematicides, such as captafol, dazomet, and chloropicrin, has been banned in agriculture across developed countries [7].

Currently, increasing attention is being paid to the development of sustained-release formulations that provide gradual and controlled release of active ingredients. Several strategies for designing such systems have been described in the literature, including the encapsulation of chemical compounds within polymer matrices [5; 19; 21], the synthesis of novel active ingredients guided by the principles of green chemistry [3], and the development of nano- and microcap-

sules [10; 13]. In the development of such complex formulations, crucial factors include efficient methods for encapsulating active ingredients into biodegradable carriers, simplicity of manufacturing, low production cost, and ease of application. These characteristics include high cation exchange capacity, strong adsorption ability, high porosity, and a large specific surface area. For the development of complex nematocidal formulations, the use of bentonite – a natural clay with structural characteristics optimal for the controlled release of active substances – is widely considered. [9; 17; 23] Biodegradable polymers studied for such systems include polylactide [8], chitosan [16], polyhydroxybutyrate [21], gelatin [20], carboxymethyl cellulose [24], polycaprolactone (PCL) [13], among others. Among the listed materials, PCL, the polymer of 6-hydroxycaproic acid, stands out as a promising candidate due to its controllable degradation rates, low melting temperature, and adaptability to various processing methods.

Our previous studies have demonstrated the feasibility of producing PCL/montmorillonite-based granules using extrusion and solution-based technologies, which are used in various fields, including agriculture [19]. Based on the accumulated experience, the extrusion method was selected for this study. This technique proved to be technologically simpler, scalable, and, unlike solution-based methods, did not cause significant changes in the material's crystallinity upon clay addition (with values ranging from 14.2% to 27.7%). Isothiocyanates are among the promising active compounds for encapsulation. Isothiocyanates are sulfur-containing organic compounds extracted from plants of the Brassicaceae family (such as mustard and horseradish), which have been repeatedly shown to exhibit nematocidal activity [14; 15]. However, it should be noted that despite the experiments with various types of isothiocyanates presented in the literature, which are specific to nematode species [6; 12], information on their activity against *Globodera rostochiensis*, widespread in temperate climates, remains limited.

For potato, pre-emergence soil application of sustained-release formulations prevents nematode infection at the early stages of plant development. Pure ITCs have previously shown high efficiency against nematodes [12; 22]. Based on this, we aimed to evaluate the nematocidal efficacy of PCL/bentonite granules loaded with isothiocyanates (allyl isothiocyanate (AITC), benzyl isothiocyanate (BITC), and 2-phenylethyl isothiocyanate (PEITC)) on *Globodera rostochiensis* in vitro and in soil experiments with nematode-susceptible potato varieties.

Materials and methods

Materials. We used the biodegradable polymer polycaprolactone (PCL) from Sigma-Aldrich (USA) with a weight-average molecular weight (M_w) of

80 kDa, a crystallinity degree (Cx) of 52%, and a melting temperature (Tm) of 57 °C. Isothiocyanates (ITCs) – allyl isothiocyanate (AITC), benzyl isothiocyanate (BITC), and 2-phenylethyl isothiocyanate (PEITC) ($\geq 98\%$ purity) – were purchased from Zoranchem (China). Methanol was obtained from OOO AO Reakhim (Russia), and the emulsifier Tween-80 was supplied by OOO NPC Biokompas-C (Russia). Bentonite (Bentonite Company LLC, Moscow, Russia) with a montmorillonite (MMT) content of no less than 70% was used. The nematocidal preparation Vydate® 5G, containing the active substance oxamyl (N,N-dimethyl-2-methylcarbamoyloxyimino-2-(methylthio) acetamide) 50 g/kg, was produced by DuPont de Nemours, France.

Preparation of PCL granules with ITC complexes. Polymer granules based on PCL (Sigma-Aldrich, USA) and bentonite (50 wt % of the polymer) containing ITCs were obtained using a portable single-screw extruder (Best-filaments, Russia) at a melting temperature of 110 °C and a screw speed of 24 rpm, followed by pelletization using a granulator (MCU, China). Encapsulation of ITCs in bentonite was performed according to the previously described method [18] with some modifications. ITCs (2 g) and bentonite (10 g) in a ratio of 1:5 were added to a solution containing Tween 80 (4 g) and methanol (60 ml). The mixture was stirred on a magnetic stirrer at 800 rpm until completely homogenized. Then, the mixture was dried at 67 °C and extruded with PCL using the method described above. The obtained PCL granules with the bentonite-phenethyl isothiocyanate complex were designated as PCL/(PEITC/bentonite); those with the bentonite-benzyl isothiocyanate complex were designated as PCL/(BITC/bentonite); and those with the bentonite-allyl isothiocyanate complex were designated as PCL/(AITC/bentonite).

Determination of ITC encapsulation efficiency. The encapsulation efficiency in the granules was determined using extraction followed by chromatography. One granule with a mass of 20 mg was dissolved in 1 mL of chloroform; and polymer subsequently precipitated using hexane. The supernatant, containing the ITCs, was obtained by centrifugation at 2500 rpm for 10 minutes. The ITC content in the resulting supernatant was determined by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) using an Agilent 6890N/5975C system, operated by MSD ChemStation software (version E.02.02.1431). An Agilent VF-200ms column was installed. was used to operate the instrument. Helium was used as a carrier gas at $1.2 \text{ mL} \times \text{min}^{-1}$ flow rate. The sample was introduced in the splitless mode. The input device and interface temperatures were set to 220 °C and 230 °C, respectively. Operating temperature of the oven: 80 °C for 3 minutes, then heating to 220 °C at $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \times \text{min}^{-1}$ rate, holding the tempera-

ture for 5 minutes. Samples were ionized using electron impact (EI) at 70 eV. The peaks of the ITCs and their retention times were determined from external standard samples in full scan mode (with m/z ranging from 35 to 500). For construction of calibration curves using external standards and the determination of ITC concentrations in the samples, characteristic ions were selectively monitored: m/z 99 for AITC; m/z 91 and 149 for BITC; and m/z 91 and 163 for PEITC. For BITC and PEITC samples, spectra were acquired for both ions and converted into concentration values individually, after which the results were averaged. The encapsulation efficiency (EE) of the granules was calculated using the formula:

$$E_{dep}(\%) = \frac{C_{gd}}{C} \times 100,$$

where C_{gd} is the ITC content in the sample determined by gas chromatography (g/g), and C is the theoretical maximum ITC loading in the granules (g/g).

Determination of the LC_{50} of ITCs for *Globodera rostochiensis*. To assess the toxicity of the isothiocyanates, solutions of the test compounds at a concentration of 0.0125 $\mu\text{L/mL}$, prepared using dimethyl sulfoxide (DMSO) as a solvent, were used. The experiments were conducted in Petri dishes, with four nematodes placed in each dish. At the first stage, 5 mL of potato root diffusate (obtained according to the method of Motlound et al. [11]) and dissected nematode cysts were added to the Petri dishes. These were then incubated at 25 °C in a dark room for 2–3 days until nematode hatching occurred. Then, 10 μL of the solutions containing the test compounds were added to each dish. Petri dishes containing only root diffusate, without any test compounds, were used as controls to assess natural mortality. The counting of live and dead individuals was performed after 5 and 24 hours using a Discovery Atto Polar digital microscope at 40x magnification (Figure 1, A).

Evaluation of the Efficacy of Isothiocyanates (ITCs) and PCL(ITC/Bentonite) Granules *in vitro* Against *Globodera rostochiensis*. Cysts, as well as live (motile) nematodes, were obtained using the method described above (Figure 1, B). Subsequently, once a sufficient number of live nematodes ($n=10$) were present in the Petri dish, PCL(ITC/bentonite) granules were added (1, 2, and 3 granules; ITC concentration expressed as mg ITC per mg of granule) to assess their nematocidal activity. The duration of the experiment was 96 hours and varied depending on the specific ITC, with control time points every 24 hours. A nematode was considered dead if it was immobile and did not respond to a needle prick (Figure 1, C). Subsequently, the percentage of nematode mortality was calculated for all groups for each 24-hour period, and the obtained data were analyzed.

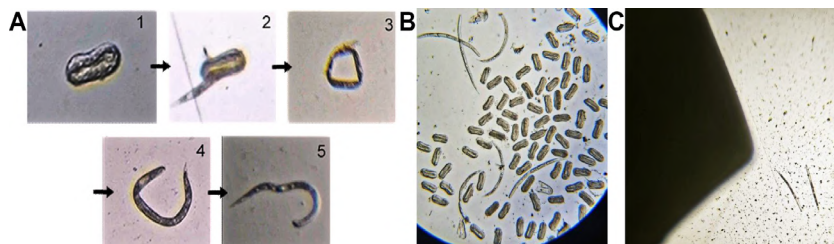


Fig. 1. A. The process of nematode hatching from an egg over 2–3 days:

1 – nematode egg; 2, 3, 4 – nematode uncoiling; 5 – J2 stage nematode.

B. The contents of a cyst after mechanical dissection (prior to the start of the experiment). C. A granule and non-viable nematodes (post-experiment).

Evaluation of the efficacy of PCL/(PEITC/Bentonite) granules in laboratory soil ecosystem experiments on potato plants. The nematicidal activity of the granules was investigated at a research station of Krasnoyarsk State Agrarian University in the Vetluzhanka microdistrict, the city of Krasnoyarsk (coordinates: 56.026720, 92.740338). The experimental groups were divided into the following treatments: 1) Control – intact plants; 2) Plants infected with nematodes (Gro); 3) the commercial nematicide ‘Vydate’; 4) Experimental PCL/PEITC granules – (PCL/(PEITC/bentonite)); 5) Liquid form of PEITC (PEITC).

The vegetation experiment was established in 5 L containers filled with the substrate ‘Agrobalt S’, which is based on high-moor peat with a particle size of 0–20 mm. The solution has a slightly acidic reaction (acidity pH H₂O 5.5–6.6), is enriched with nutrients (nitrogen and phosphorus content of not less than 150 mg/L each, potassium 250 mg/L, and trace elements). The number of replications was 4, with five containers per replication. The treatments were arranged randomly. Two potato varieties susceptible to the golden nematode were used: ‘Krasnoyarsky Ranniy’ and ‘Innovator’. For the experiment, virus-free microplants grown on Murashige and Skoog (MS) medium were used. Plant maintenance consisted of watering as needed and the routine application of fungicides to all treatments to protect against late blight and avoid premature foliage death. To protect against insect vectors of viruses, insecticide treatment was applied. The initial insecticide application was carried out on July 20 with Karate Zeon (CS) at a rate of 0.2 L/Ha. The volume of spray solution applied was 200 L/Ha. On August 6th, spraying was conducted with a tank mixture of Revus Top, SC (0.6 L/Ha) and Karate Zeon, CS (0.2 L/Ha), at a spray volume of 200 L/Ha. The final treatment was

performed on August 19th with Revus Top, SC (0.6 L/Ha). The experiment was assessed on October 1st.

The substrate was inoculated with the pathogen by introducing 30 g of a peat-sand mixture, containing at least 6 cysts per 1 g, into the planting zone of the microplants in each container. Depending on the experimental treatment, the following were added to the planting containers: 18 g of PCL/(PEITC/bentonite) granules, 0.105 g of Vydate (calculated at a rate of 20 kg per hectare potato planting norm), or 200 µL of pure PEITC. In the Gro treatment, only the carrier (with nematodes) was used. The control group consisted of the 'Agrobalt S' peat substrate without the parasite and without nematicidal preparations.

The experiment utilized the species *Globodera rostochiensis* Wollenweber, 1923 – the golden potato cyst nematode, pathotype Ro1, which is highly pathogenic and is a quarantine organism in the Russian Federation.

The research was conducted on the varieties 'Innovator' and 'Krasnoyarsky Ranniy', which are approved for use in Eastern Siberia. The 'Innovator' variety, bred by HZPC HOLLAND B.V., is classified as mid-early and is suitable for French fry production. The tuber is yellow, elongated-oval in shape, with shallow eyes and light- yellow flesh. It holds one of the leading positions in the country for cultivation for processing.

The 'Krasnoyarsky Ranniy' variety was developed by A.G. Lorkh Federal Research Center for Potato in collaboration with Krasnoyarsk State Agrarian University. It is an early-maturing variety, classified as a table potato. It is highly valued in Western and Eastern Siberia for its excellent taste, high marketability, and good storability. The tubers of this variety are yellow with light yellow flesh and eyes ranging from small to medium in size. An assessment of the local weather patterns at the research site and the specific weather conditions during the growing season was also conducted. Upon completion of the experiment, a final assessment and count were performed.

Statistical Analysis of the Results. The data were statistically processed using StatSoft STATISTICA 13. To determine the statistical significance of differences between the experimental treatments for individual indicators, one-way and two-way analysis of variance were employed, followed by a comparison of individual means using Duncan's multiple range test. Spearman's rank correlation was used to calculate correlation coefficients for data distributions that did not conform to normality. Factor analysis was applied to study the relationships between the investigated parameters, using R. Cattell's scree test criterion to determine the number of factors.



Fig. 2. The appearance of the granules: A – PCL/(AITC/bentonite), B – PCL/(BITC/bentonite), C - PCL/(PEITC/bentonite)).

Table 1.

Encapsulation efficiency of the granules

Granule	Efficiency, %	Concentration, mg/mg
PCL/(AITC/bentonite)	0,2±0,02	0,0003±0,00006
PCL/(AITC/bentonite)	25,3±4,7	0,02±0,002
PCL/(PEITC/bentonite)	32,5±3,2	0,03±0,002

Results and discussion

Characteristics of PCL/(Bentonite/PEITC) granules

Filaments of PCL with bentonite and isothiocyanates (PCL/(AITC/bentonite), PCL/(BITC/bentonite), PCL/(PEITC/bentonite)) were obtained by extrusion. The resulting filaments were cut into granules approximately 10 mm in length (weighing about 20 mg) and 1.5–2.0 mm in diameter (Figure 2).

According to Table 1, the lowest encapsulation efficiency was observed for the granules (PCL/(AITC/bentonite)). This may be attributed to the lower molecular weight of AITC (99.15 g/mol) compared to BITC (149.22 g/mol) and PEITC (163.24 g/mol), and consequently, to its higher volatility.

Determination of the lethal concentration of ITCs for *Globodera rostochiensis*

To investigate the nematicidal effect of pure ITCs on *G. rostochiensis* nematodes, the first step involved obtaining a sufficient quantity of live nematodes. It was established that after mechanical damage to the cysts and placing nematode eggs in a root diffusate solution (5 ml in a Petri dish), their hatching occurred within 2–3 days.

A characteristic sign of nematode viability is their S-shaped movement and cyclical coiling/uncoiling, while actual spatial displacement is minimal. In contrast, dead nematodes become less curved and more elongated/straight due to the loss of muscle tone and movement (Figure 3, A).

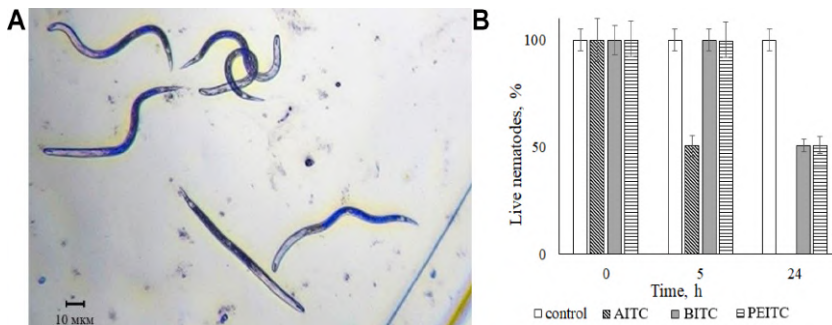


Fig. 3. A: nematodes under the microscope. B: a graph for LC_{50} determination.

The toxicity assessment of pure ITCs against nematodes to determine the lethal concentration (LC_{50}) was conducted using ITC solutions in DMSO at a concentration of 0.0125 $\mu\text{L/mL}$, as this concentration was established as the minimum effective dose in prior studies on the nematicidal activity of ITCs against *Globodera pallida* [22]. AITC demonstrated the highest nematicidal activity among the ITC solutions (Figure 3, B). In the group treated with AITC, 50% nematode mortality was observed after 5 hours. In contrast, in the Petri dishes containing PEITC and BITC solutions, the number of dead nematodes reached 50% only after 24 hours. In the control group, all nematodes remained viable throughout this period.

Evaluation of the efficacy of PCL/(ITC/Bentonite) granules *in vitro* against *Globodera rostochiensis*

The nematicidal effect of the obtained ITC-loaded granules was investigated *in vitro* by incubating them with nematodes in Petri dishes containing a root diffusate solution (5 mL) for 96 hours. The concentration of the active substance (ITC) in 1, 2, and 3 granules was as follows: 0.03, 0.06, and 0.09 mg/mg for PEITC; 0.02, 0.04, and 0.06 mg/mg for BITC; and 0.0003, 0.0006, and 0.0009 mg/mg for AITC.

A 24-hour incubation with a single PCL/(PEITC/bentonite) granule in Petri dishes resulted in 20% nematode mortality. When the number of granules of the same composition was increased to 2 and 3, nematode mortality reached 40% and 70%, respectively. After 48 hours of incubation with the maximum number of PCL/(PEITC/bentonite) granules, 100% nematode mortality was achieved. Simultaneously, incubation with 1–2 granules resulted in 60% to 80% mortality, respectively (Figure 4). After 72 hours, 100% nematode mortality was achieved, regardless of the number of PCL/(PEITC/bentonite) granules used.

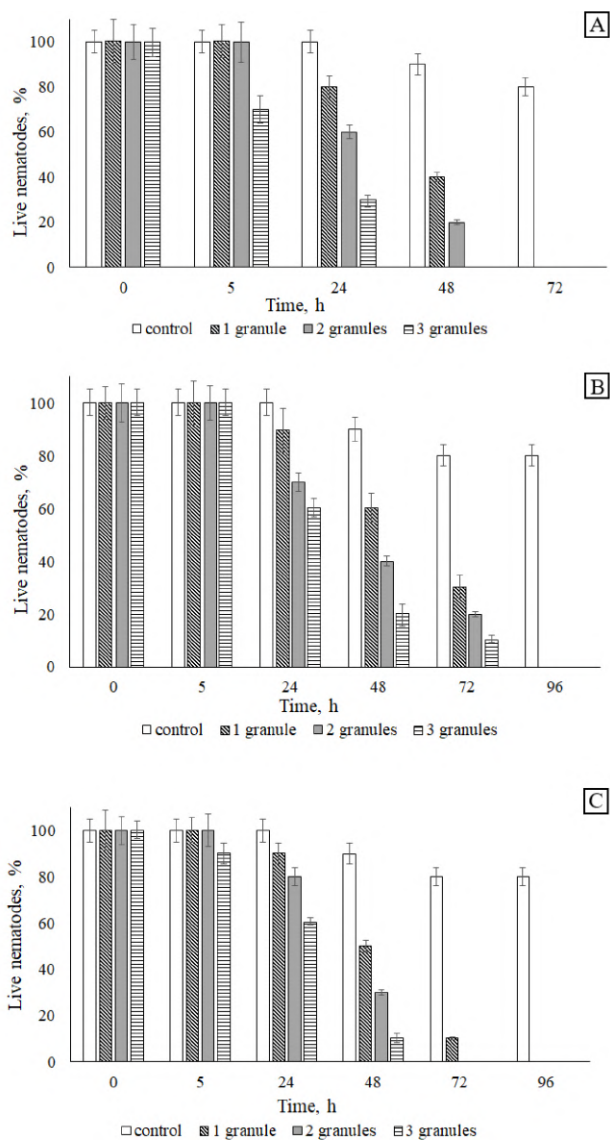


Fig. 4. Amount of live nematodes (%) relative to the number of ITC-loaded granules over time. A – granules with PCL/(AITC/bentonite); B – PCL/(BITC/bentonite); C – PCL/(PEITC/bentonite).

When PCL/(BITC/bentonite) granules were incubated with nematodes in Petri dishes for the first 24 hours, comparable results to those of the PCL/(PEITC/bentonite) granules were obtained. After 24 hours, nematode mortality reached 10% and 20% in Petri dishes containing 1 and 2 PCL/(BITC/bentonite) granules, respectively. However, after 48 hours, nematode mortality increased to 50%, 70%, and 90% upon incubation with 1, 2, and 3 PCL/(BITC/bentonite) granules, respectively. On the third day, in this experimental group, nematode mortality reached 100%. However, upon incubation with a single PCL/(BITC/bentonite) granule, the mortality rate remained at 90%. The less pronounced nematocidal effect of the PCL/(BITC/bentonite) granules, compared to the PCL/(PEITC/bentonite) granules, can be explained by the concentration of the active ingredient itself. The BITC content in the PCL/(BITC/bentonite) granules was 0.02 mg/mg.

Table 2.

Productivity parameters of the 'Krasnoyarsky Ranniy' variety across experimental treatments (mean per planting container)

Treatment	Plant height, cm	Number of stems	Number of tubers	Stem mass, g	Tuber mass, g	Mass per tuber, g	Number of cysts
Control	55,38	1,50	2,25	79,06	88,13	47,19	0,00
Gro	50,81	1,19	1,75	70,63	85,00	50,70	60,56
Vydate	68,13	1,19	1,81	76,25	81,25	56,15	17,94
PCL/(PEITC/bentonite)	51,94	1,25	1,94	54,06	85,00	43,59	17,38
PEITC	34,71	1,29	1,57	77,86	25,71	16,43	64,43
Total	54,41	1,28	1,90	70,77	79,01	46,16	27,96

Table 3.

Productivity parameters of the 'Innovator' variety across experimental treatments (mean per planting container)

Treatment	Plant height, cm	Number of stems	Number of tubers	Stem mass, g	Tuber mass, g	Mass per tuber, g	Number of cysts
Control	40,13	1,40	2,27	65,00	49,33	32,25	0,00
Gro	28,27	1,07	1,53	49,00	38,00	18,38	73,00
Vydate	35,00	1,08	1,08	58,85	32,31	22,88	12,23
PCL/(PEITC/bentonite)	39,92	1,08	3,08	107,08	61,25	20,35	12,00
PEITC	28,78	1,00	1,00	44,44	17,22	11,39	60,78
Total	34,67	1,14	1,83	65,00	40,94	21,93	30,39

Despite the comparable results of the AITC granules to the other two types of granules, PCL/(PEITC/bentonite) and PCL/(BITC/bentonite), on the first day,

the nematode mortality after incubation with PCL/(AITC/bentonite) granules for three days was still only 70%, 80%, and 90% (for 1, 2, and 3 granules, respectively). Indeed, in our earlier LC₅₀ assessment, we established that AITC was the most effective among the ITCs, exhibiting the most pronounced effect on the nematodes. However, due to its high volatility – particularly during the extrusion process – its content in the granules remains extremely low (0.0003 mg/mg in 1 granule) compared to the initial volume for encapsulation. Therefore, for further research, PCL/bentonite granules containing PEITC were selected.

Evaluation of the efficacy of PCL/(PEITC/Bentonite) granules in laboratory soil ecosystems with potato plants

The efficacy of PCL/(PEITC/bentonite)-based granules against *Globodera rostochiensis* was investigated in soil experiments using two potato varieties. Tables 2 and 3 present the results of the assessment of the influence of the developed granules and comparison groups on plant productivity parameters.

The minimum productivity parameters for both potato varieties were obtained in the nematode-infected treatment (Gro) and the liquid PEITC treatment. In the latter case, the liquid PEITC treatment did not have a significant effect on nematode cyst formation. Plant growth inhibition was observed, caused by both the action of the parasite and the potential toxic effect of the compound on the microplants at the initial stage of their growth. In the control group, both varieties exhibited some of the best plant development parameters. This confirms the crop losses caused by parasite infection.

Table 4.

Effect size measures of the studied treatments on the observed parameters of potato plants (p – statistical significance of the effect)

Parameter	Treatment	p	Variety	p	Treatment* Variety	p	Error	p
Plant height	14,2	0,000	27,3	0,000	7,3	0,000	51,3	0,002
Stem mass	2,62	0	0,5	0,439	10,4	0,404	86,5	0,006
Mass per tuber	7,0	0,000	12,4	0,028	2,7	0,017	77,9	0,371
Number of cysts	76,7	0,000	0,0	0,000	1,3	0,864	22,0	0,123
Number of tubers	12,7	0,000	0,074	0,985	6,58	0,042	80,60	0,042

The treatments with the commercial preparation ‘Vydate’ and the experimental PCL/(PEITC/bentonite) granules demonstrated a high nematicidal effect. A slight reduction in productivity may be caused by the toxic effect of the commercial preparation and minor nematode damage.

According to the results of the two-way analysis of variance (ANOVA) (Table 4), individual tuber mass was genetically determined and also depended on the nematicide treatment applied. Only the application of the treatments had a significant influence on the number of cysts (effect strength 76.7%). Plant height was influenced not only by the genetic characteristics of the varieties and the protection treatments, but also by the interaction between genotype and treatment.

It was established that cyst formation on potato roots had a weak negative effect on all studied parameters of plant growth and development. The average tuber mass showed a moderate positive correlation with plant height. It is also worth noting the unusually high positive correlation between total tuber mass and average tuber mass. This is due to the small number of tubers formed in each experimental pot.

Based on the calculation of the t-test for independent samples, a significant difference from the control was established for treatment 2 (nematode infection) in plant height ($t = 2.19$, $p = 0.03$) and number of cysts ($t = -15.78$, $p < 0.001$). For treatment 3 (Vydate), the parameter “number of tubers per plant” significantly exceeded the control value ($t = 2.208$, $p = 0.003$). For the fourth treatment (PCL/ (PEITC/bentonite)), no significant difference from the control was detected. For the fifth treatment (PEITC), significant differences were established for plant height ($t = 4.595$, $p < 0.001$), tuber mass ($t = 4.21$, $p < 0.001$), mass per tuber ($t = 3.946$, $p < 0.001$), and number of tubers ($t = 2.209$, $p = 0.003$). Since the control group was not inoculated with nematodes, all treatment variants differed statistically significantly in the number of cysts on the roots. Therefore, to determine the significant differences between the preparative forms, it is advisable to perform an analysis of variance (ANOVA) without including the control treatment.

According to the results of the two-way analysis of variance (ANOVA), a statistically significant genotype $\times$ treatment interaction was detected for the number of tubers per plant ($F = 4.941$, $p = 0.003$), stem mass ($F = 4.368$, $p = 0.006$), and plant height ($F = 4.886$, $p = 0.003$, Figure 5). Among the treatments using nematicidal formulations (without the control), an analysis of variance (ANOVA) with Scheffé's test for plant height identified 'Vydate' as superior.

Due to the detection of significant variety $\times$ nematicide interaction effects, a one-way analysis of variance (ANOVA) was subsequently performed. For the 'Krasnoyarsky Ranniy' variety, Scheffé's test revealed significant effects for the Vydate treatment compared to the nematode-infected control (Gro) in terms of plant height ($p = 0.019$, Figure 5), as well as for the number of cysts in both the 'Vydate' ($p < 0.001$) and PCL/(PEITC/bentonite) ($p < 0.001$) treatments. For the remaining treatments and the other investigated parameters, the obtained differences fell within the margin of experimental error and are attributed to other factors not studied in this experiment.

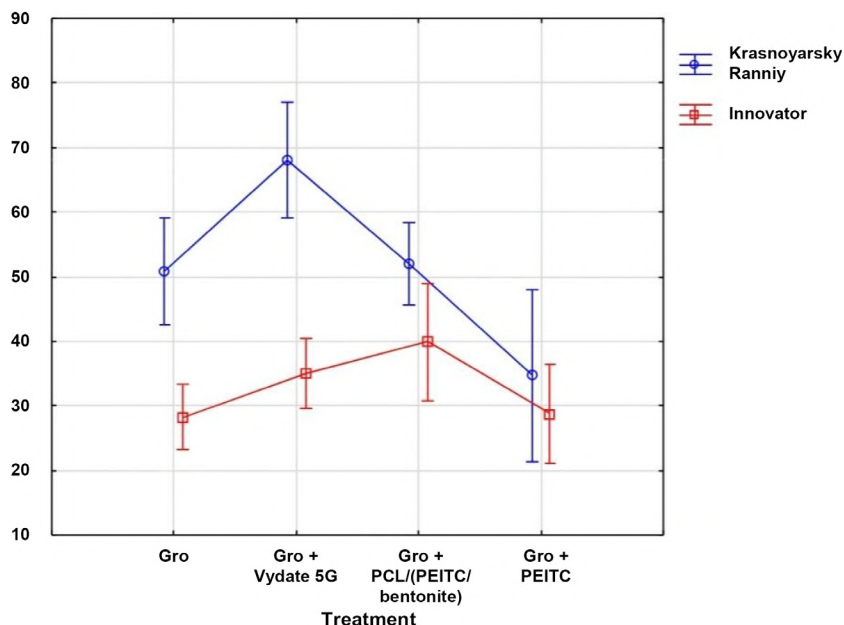


Fig. 5. Plant height (cm) across different experimental treatments. Vertical bars represent the 95% confidence intervals for the mean.

The ‘Innovator’ variety exhibited a different interaction between the studied factors. The influence of the experimental preparation PCL/(PEITC/bentonite) had a highly significant effect on stem mass (p 0.030) and the number of tubers per plant (p 0.003). The commercial preparation ‘Vydate’ (p 0.000), as well as the developed PCL/(PEITC/bentonite) preparation (p 0.000), exhibited a substantial nematocidal effect reducing the number of cysts on roots to the minimum value observed in the experiment (Figure 6). No significant difference in tuber mass per plant was found among the treatments, except for the pair PCL/(PEITC/bentonite) – PEITC (p 0.036). The lowest values for all productivity parameters were observed in the PEITC treatment. This may be attributed to the inhibitory effect of the compound on the microplants and its high initial concentration upon application.

According to the Friedman rank-based analysis of variance, the greatest effect on the yield structure components of the ‘Krasnoyarsky Ranniy’ variety (Table 5) was exerted by ‘Vydate’ and PCL/(PEITC/bentonite). However, for this genotype, the effect of the preparations did not have a statistically signifi-

cant impact on the entire set of studied parameters. For the ‘Innovator’ variety, the experimental preparation PCL/(PEITC/bentonite) played the leading role in shaping productivity and its components. Vydate ranked second in terms of efficacy (Table 6). The calculation of pairwise correlation coefficients for the mean ranks (Table 7) showed no significant relationships between the ‘Krasnoyarsky Ranniy’ and ‘Innovator’ varieties. Similar results were obtained when calculating rank correlation coefficients using Spearman’s method (Table 8).

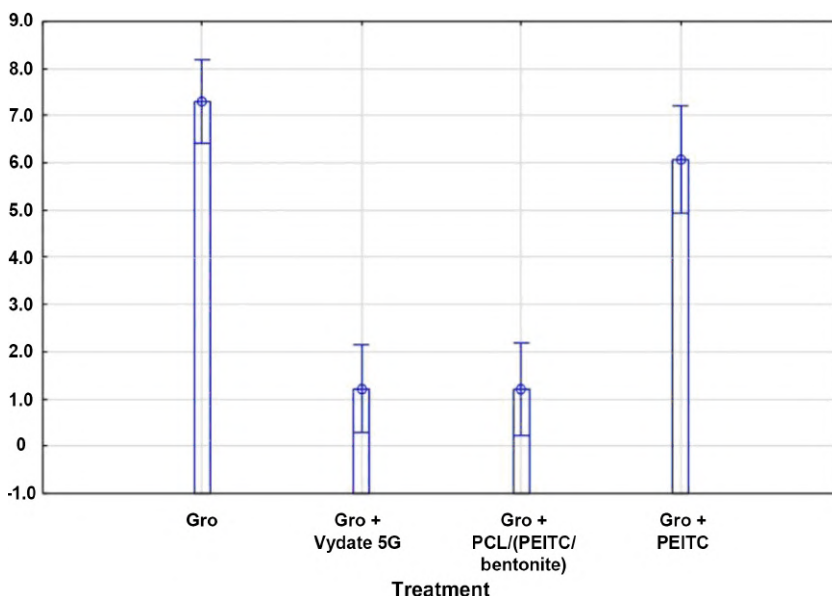


Fig. 6. Number of golden potato cyst nematodes on the roots of the ‘Innovator’ variety across experimental treatments at harvest. Current effect: $F(3.45) = 46.319$, $p=0.000$. Vertical bars represent the 95% confidence intervals for the mean.

Table 5.
Results of the analysis of variance for the ‘Krasnoyarsky Ranniy’ variety data,
 $\chi^2(N = 7, df = 4) = 4.23, p = 0.376$

Variable	Mean rank	Sum of ranks	Mean	Std.dev.
Control	4,00	28,00	39,07	37,93
Gro	2,71	19,00	45,81	32,53
Vydate	3,14	22,00	43,24	35,23
PCL/(PEITC/bentonite)	2,71	19,00	36,45	30,96
PEITC	2,43	17,00	31,71	29,76

Table 6.

**Results of the analysis of variance for the ‘Innovator’ variety data,
 χ^2 (N = 7, df = 4) = 11.89 p = 0.018**

Variable	Mean rank	Sum of ranks	Mean	Std.dev.
Control	4,00	28,00	27,20	26,26
Gro	2,86	20,00	23,35	20,78
Vydate	4,00	28,00	34,97	38,34
PCL/(PEITC/bentonite)	2,57	18,00	29,89	26,01
PEITC	1,57	11,00	23,52	22,56

Table 7.

Correlation coefficients for mean ranks, n = 5, significance level < 0.05

Variable	Krasnoyarsky Ranniy	Innovator
Krasnoyarsky Ranniy	1,000	0,644
Innovator	0,644	1,000

Table 8.

Spearman’s correlation coefficients for mean ranks, significance level < 0.05

Variable	Krasnoyarsky Ranniy	Innovator
Krasnoyarsky Ranniy	1,000	0,711
Innovator	0,711	1,000

Table 9.

Factor analysis (Varimax raw) of the set of traits.

Factor loadings > 0.700 are marked

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Plant height	0,677	-0,068	0,484
Stem mass	0,486	0,510	0,286
Tuber mass	0,812	0,300	0,231
Mass per tuber	0,936	-0,051	-0,025
Number of cysts	-0,153	-0,122	-0,868
Number of stems	0,072	0,843	-0,073
Number of tubers	-0,036	0,733	0,484
Total variance	2,262	1,622	1,365
Proportion of total variance	0,323	0,231	0,195

The absence of a statistically significant difference between the genotypes indicates that the obtained results are due to the impact of the applied treatments. Moreover, the efficacy of the preparation will vary depending on the potato variety. For the ‘Innovator’ variety, preference should be given to the experimental formulation PCL/(PEITC/bentonite).

Factor analysis was applied to study the relationships between the investigated parameters. Based on the primary analysis, three factors with eigenvalues close to or greater than one, were selected for further work. The results are presented in Table 9.

It was established that Factor 1 is associated with such potato plant development parameters as total tuber mass per plant and average mass per tuber. Two parameters were also attributed to Factor 2: the number of stems and tubers per plant. Factor 3 was separately identified with a single trait – the number of nematode cysts on the roots at harvest time. The extracted factors account for 74.9% of the variance. The first factor can be described as “tuber size”. Since potato stems and tubers are directly connected through stolon formation, the second factor can be labeled as “stolon number.” The third factor describes nematode infestation.

Based on the conducted research, it can be stated that there is a variety-specific response of plants to the applied preparations and nematode infection. For the ‘Krasnoyarsky Ranniy’ variety, a substantial effect of the ‘Vydate’ preparation was established on plant height. For the ‘Innovator’ variety, this treatment had a significant influence on stem mass. The experimental preparation PCL/(PEITC/bentonite) had a positive effect on the number of tubers per plant in the ‘Innovator’ variety.

The predominant effect in terms of nematicidal activity was observed for the ‘Vydate’ preparation and the experimental one (PCL/(PEITC/bentonite)). The general view of the plants at harvest is shown in Figure 7.

Conclusion

1. Granules based on polycaprolactone (PCL) and bentonite, loaded with isothiocyanates – allyl isothiocyanate (AITC), benzyl isothiocyanate (BITC), and 2-phenylethyl isothiocyanate (PEITC) – were designed for soil application against the potato cyst nematode.

2. *In vitro* tests confirmed that granules containing PEITC possess a more pronounced nematicidal effect compared to those with BITC and AITC, suppressing the development of second-stage juveniles (J2) of the nematode *Globodera rostochiensis*.

3. In soil experiments, treatment with the granules promotes a reduction in the number of cysts on the roots and is comparable in efficacy to the commercial preparation ‘Vydate’.

4. The application of PCL/(PEITC/bentonite) granules has a positive effect on the yield of the ‘Innovator’ potato variety. The obtained granules are safer than chemical nematicides and could be used as an alternative means for controlling potato cyst nematode in agriculture.



Fig. 7. General view of plants at harvest for the experimental treatments: 1 – ‘Vydate’, 2 – Control, 3 – Gro, 4 – PCL/(PEITC/bentonite), 5 – PEITC.

Sponsorship information. The research was supported by the grant of Russian Science Foundation, project No. 23-16-00184.

References

1. Borisova, E. E., Shuvarin, M. V., Sizova, Y. V., & Zaikin, V. P. (2022). Assessment of the impact of chemical plant protection products and agrotechnologies on environmental objects. *Vestnik NGIEI*, (10), 20–27. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-10-20-27>. EDN: <https://elibrary.ru/NZOXFL>
2. Kochetov, A. V., Gavrilenko, T. A., & Afanasenko, O. S. (2021). New genetic technologies for plant protection against parasitic nematodes. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii*, 25(3), 337–343. <https://doi.org/10.18699/VJ21.037>. EDN: <https://elibrary.ru/YLWUFU>
3. Stepuro, M. F., Mikhnyuk, A. V., Kogotko, L. G., & Grishchenko, I. Yu. (2022). Effect of green manure of sideral crops on productivity and marketability of cucumber fruits and nematode distribution in protected cultivation. *Vestnik Belorusskoy Gosudarstvennoy Sel'skokhozyaystvennoy Akademii*, (4), 139–143.
4. Churikova, A. K., & Nekoval, S. N. (2022). Biological agents and their metabolites in the control of Meloidogyne spp. in vegetable cultivation (review). *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitiye*, 17(3), 175–186. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-3-175-186>. EDN: <https://elibrary.ru/VZFVSY>
5. Boyandin, A. N., Sukhanova, A. A., & Eriletskaya, N. L. (2022). Slow-release agricultural pesticide formulations: State of the art. *Chimica Techno Acta*, 9(2), 202292S10. <https://doi.org/10.15826/chimtech.2022.9.2.S10>.
6. Dahlin, P., & Hallmann, J. (2020). New insights on the role of allyl isothiocyanate in controlling the root knot nematode Meloidogyne hapla. *Plants*, 9(5), 603. <https://doi.org/10.3390/plants9050603>. EDN: <https://elibrary.ru/HFWMPY>

7. Khan, M. R., Majid, S., Mohidin, F. A., & Khan, N. (2011). A new bioprocess to produce low cost powder formulations of biocontrol bacteria and fungi to control fusarial wilt and root-knot nematode of pulses. *Biological Control*, 59(2), 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.04.007>.
8. Lewicka, K., Dobrzynski, P., & Rychter, P. (2020). PLAGA-PEG-PLAGA terpolymer-based carriers of herbicides for potential application in environment-friendly, controlled release systems of agrochemicals. *Materials*, 13(12), 2778. <https://doi.org/10.3390/ma13122778>. EDN: <https://elibrary.ru/XCPRAD>
9. Mahajan, R. (2024). Bio-nanocomposites for controlled agrochemical release. In *Nanocomposites for environmental, energy and agricultural applications* (pp. 1–35). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23079.32163>.
10. Maruyama, T., Ishibashi, Y., Sano, M., Yoshimura, H., & Taguchi, Y. (2024). Simulation and application assessment of the efficacy of fosthiazate-loaded microcapsules against root-knot nematode. *Pest Management Science*, 80(10), 5078–5087. <https://doi.org/10.1002/ps.8231>. EDN: <https://elibrary.ru/QLLESS>
11. Motloun, M. P., Mofokeng, T. G., & Ray, S. S. (2023). Effects of urea loading on soil biodegradation properties of melt-processed polycaprolactone-based composites for potential application in agriculture. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(17), e53505. <https://doi.org/10.1002/app.53505>. EDN: <https://elibrary.ru/TJYEZV>
12. Mwangi, N. G., Stevens, M., Wright, A. J., Edwards, S. G., Hare, M. C., & Back, M. A. (2024). Sensitivity of stubby root nematodes (*Trichodorus* and *Paratrichodorus* spp.) to isothiocyanates associated with Brassicaceae in an in vitro assay. *Nematology*, 26(2), 203–210. <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10302>. EDN: <https://elibrary.ru/MCSCSF>
13. Oliveira, H. C., Stolf-Moreira, R., Martinez, C. B. R., Grillo, R., de Jesus, M. B., & Fraceto, L. F. (2015). Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants. *PLoS ONE*, 10(7), e0132971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132971>.
14. Park, H. W., Kim, H. H., Youn, S. H., Shin, T. S., Bilgrami, A. L., Cho, M. R., & Shin, C. S. (2012). Biological control potentials of insect-parasitic nematode *Rhabditis blumi* (Nematoda: Rhabditida) for major cruciferous vegetable insect pests. *Applied Entomology and Zoology*, 47(4), 389–397. <https://doi.org/10.1007/s13355-012-0131-9>. EDN: <https://elibrary.ru/POTHOJ>
15. Patil, J. A., Kumar, A., Yadav, S., & Verma, K. K. (2020). Nematicidal effect of cruciferous bio-fumigants against the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* infesting okra. *Journal of Nematology*, 52, 1–7. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-080>.
16. Sathiyabama, M., & Muthukumar, S. (2020). Chitosan guar nanoparticle preparation and its in vitro antimicrobial activity towards phytopathogens of rice. *International*

- al Journal of Biological Macromolecules*, 153, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.001>. EDN: <https://elibrary.ru/DAERAN>
17. Singh, G., Ramadass, K., Sooriyakumar, P., Hettithanthri, O., Vithange, M., Bolan, N., Tavakkoli, E., Van Zwieten, L., & Vinu, A. (2022). Nanoporous materials for pesticide formulation and delivery in the agricultural sector. *Journal of Controlled Release*, 343, 187–206. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.01.036>. EDN: <https://elibrary.ru/PUHZMS>
 18. de Souza, A. G., dos Santos, N. M. A., da Silva Torin, R. F., & dos Santos Rosa, D. (2020). Synergic antimicrobial properties of carvacrol essential oil and montmorillonite in biodegradable starch films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1737–1747. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.226>. EDN: <https://elibrary.ru/KVMHTJ>
 19. Sukhanova, A. A., Boyandin, A. N., Ertiletskaya, N. L., & Churakov, A. A. (2024). Obtaining and study of biodegradable granules loaded with oxamyl as eco-friendly preparation for *Globodera rostochiensis* control. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 131(6), 2017–2027. <https://doi.org/10.1007/s41348-024-00945-7>. EDN: <https://elibrary.ru/HAPABM>
 20. Viscusi, G., & Gorrasi, G. (2021). Gelatin beads/hemp hurd as pH sensitive devices for delivery of eugenol as green pesticide. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(11), 3756–3769. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02148-9>. EDN: <https://elibrary.ru/QCFVQD>
 21. Volova, T., Zhila, N., Vinogradova, O., Shumilova, A., Prudnikova, S., & Shishatskaya, E. (2016). Characterization of biodegradable poly-3-hydroxybutyrate films and pellets loaded with the fungicide tebuconazole. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 5243–5254. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5739-1>. EDN: <https://elibrary.ru/WNZVIZ>
 22. Wood, C., Kenyon, D. M., & Cooper, J. M. (2017). Allyl isothiocyanate shows promise as a naturally produced suppressant of the potato cyst nematode, *Globodera pallida*, in biofumigation systems. *Nematology*, 19(4), 389–402. <https://doi.org/10.1163/15685411-00003054>.
 23. Yang, L., Wang, Y., Liang, Y., Deng, H., Wang, J., Dai, Y., Guo, F., Zhou, H., Li, S., & Ding, W. (2024). pH-responsive bentonite nanoclay carriers control the release of benzothiazolinone to restrain bacterial wilt disease. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 198, 105754. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105754>. EDN: <https://elibrary.ru/OIMKOT>
 24. Zhao, M., Zhou, H., Hao, L., Chen, H., & Zhou, X. (2021). Natural rosin modified carboxymethyl cellulose delivery system with lowered toxicity for long-term pest control. *Carbohydrate Polymers*, 259, 117749. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117749>. EDN: <https://elibrary.ru/IWRKME>

Список литературы

1. Борисова, Е. Е., Шуварин, М. В., Сизова, Ю. В., & Заикин, В. П. (2022). Оценка воздействия химических средств защиты растений и агротехнологий на объекты окружающей среды. *Вестник НГИЭИ*, (10), 20–27. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-10-20-27>. EDN: <https://elibrary.ru/NZOXFL>
2. Кочетов, А. В., Гавриленко, Т. А., & Афанасенко, О. С. (2021). Новые генетические технологии защиты растений от паразитических нематод. *Вавиловский журнал генетики и селекции*, 25(3), 337–343. <https://doi.org/10.18699/VJ21.037>. EDN: <https://elibrary.ru/YLWUFU>
3. Степуро, М. Ф., Михнюк, А. В., Коготко, Л. Г., & Грищенко, И. Ю. (2022). Влияние зеленых удобрений сидеральных культур на продуктивность и товарность плодов огурца и распространение нематод в защищенном грунте. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*, (4), 139–143.
4. Чурикова, А. К., & Нековаль, С. Н. (2022). Биологические агенты и их метаболиты в борьбе с *Meloidogyne* spp. при выращивании овощных культур (обзор). *Юг России: экология, развитие*, 17(3), 175–186. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-3-175-186>. EDN: <https://elibrary.ru/VZFVSY>
5. Boyandin, A. N., Sukhanova, A. A., & Ertiletskaya, N. L. (2022). Slow-release agricultural pesticide formulations: State of the art. *Chimica Techno Acta*, 9(2), 202292S10. <https://doi.org/10.15826/chimtech.2022.9.2.S10>.
6. Dahlin, P., & Hallmann, J. (2020). New insights on the role of allyl isothiocyanate in controlling the root knot nematode *Meloidogyne* hapla. *Plants*, 9(5), 603. <https://doi.org/10.3390/plants9050603>. EDN: <https://elibrary.ru/HFWMYP>
7. Khan, M. R., Majid, S., Mohidin, F. A., & Khan, N. (2011). A new bioprocess to produce low cost powder formulations of biocontrol bacteria and fungi to control fusarial wilt and root-knot nematode of pulses. *Biological Control*, 59(2), 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.04.007>.
8. Lewicka, K., Dobrzynski, P., & Rychter, P. (2020). PLAGA-PEG-PLAGA terpolymer-based carriers of herbicides for potential application in environment-friendly, controlled release systems of agrochemicals. *Materials*, 13(12), 2778. <https://doi.org/10.3390/ma13122778>. EDN: <https://elibrary.ru/XCPRAD>
9. Mahajan, R. (2024). Bio-nanocomposites for controlled agrochemical release. In *Nanocomposites for environmental, energy and agricultural applications* (pp. 1–35). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23079.32163>.
10. Maruyama, T., Ishibashi, Y., Sano, M., Yoshimura, H., & Taguchi, Y. (2024). Simulation and application assessment of the efficacy of fosthiazate-loaded microcapsules against root-knot nematode. *Pest Management Science*, 80(10), 5078–5087. <https://doi.org/10.1002/ps.8231>. EDN: <https://elibrary.ru/QLLESS>

11. Motloun, M. P., Mofokeng, T. G., & Ray, S. S. (2023). Effects of urea loading on soil biodegradation properties of melt-processed polycaprolactone-based composites for potential application in agriculture. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(17), e53505. <https://doi.org/10.1002/app.53505>. EDN: <https://elibrary.ru/TJYEZV>
12. Mwangi, N. G., Stevens, M., Wright, A. J., Edwards, S. G., Hare, M. C., & Back, M. A. (2024). Sensitivity of stubby root nematodes (*Trichodorus* and *Paratrichodorus* spp.) to isothiocyanates associated with Brassicaceae in an in vitro assay. *Nematology*, 26(2), 203–210. <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10302>. EDN: <https://elibrary.ru/MCSSCF>
13. Oliveira, H. C., Stolf-Moreira, R., Martinez, C. B. R., Grillo, R., de Jesus, M. B., & Fraceto, L. F. (2015). Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants. *PLoS ONE*, 10(7), e0132971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132971>.
14. Park, H. W., Kim, H. H., Youn, S. H., Shin, T. S., Bilgrami, A. L., Cho, M. R., & Shin, C. S. (2012). Biological control potentials of insect-parasitic nematode *Rhabditis blumi* (Nematoda: Rhabditida) for major cruciferous vegetable insect pests. *Applied Entomology and Zoology*, 47(4), 389–397. <https://doi.org/10.1007/s13355-012-0131-9>. EDN: <https://elibrary.ru/POTHOJ>
15. Patil, J. A., Kumar, A., Yadav, S., & Verma, K. K. (2020). Nematicidal effect of cruciferous bio-fumigants against the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* infesting okra. *Journal of Nematology*, 52, 1–7. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-080>.
16. Sathiyabama, M., & Muthukumar, S. (2020). Chitosan guar nanoparticle preparation and its in vitro antimicrobial activity towards phytopathogens of rice. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.001>. EDN: <https://elibrary.ru/DAERAN>
17. Singh, G., Ramadass, K., Sooriyakumar, P., Hettithanthri, O., Vithange, M., Bolan, N., Tavakkoli, E., Van Zwieten, L., & Vinu, A. (2022). Nanoporous materials for pesticide formulation and delivery in the agricultural sector. *Journal of Controlled Release*, 343, 187–206. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.01.036>. EDN: <https://elibrary.ru/PUHZMS>
18. de Souza, A. G., dos Santos, N. M. A., da Silva Torin, R. F., & dos Santos Rosa, D. (2020). Synergic antimicrobial properties of carvacrol essential oil and montmorillonite in biodegradable starch films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1737–1747. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.226>. EDN: <https://elibrary.ru/KVMHTJ>
19. Sukhanova, A. A., Boyandin, A. N., Eriletskaya, N. L., & Churakov, A. A. (2024). Obtaining and study of biodegradable granules loaded with oxamyl as eco-friendly preparation for *Globodera rostochiensis* control. *Journal of Plant Diseases and*

- Protection*, 131(6), 2017–2027. <https://doi.org/10.1007/s41348-024-00945-7>. EDN: <https://elibrary.ru/HAPABM>
20. Viscusi, G., & Gorrasi, G. (2021). Gelatin beads/hemp hurd as pH sensitive devices for delivery of eugenol as green pesticide. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(11), 3756–3769. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02148-9>. EDN: <https://elibrary.ru/QCFVQD>
21. Volova, T., Zhila, N., Vinogradova, O., Shumilova, A., Prudnikova, S., & Shishatskaya, E. (2016). Characterization of biodegradable poly-3-hydroxybutyrate films and pellets loaded with the fungicide tebuconazole. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 5243–5254. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5739-1>. EDN: <https://elibrary.ru/WNZVIZ>
22. Wood, C., Kenyon, D. M., & Cooper, J. M. (2017). Allyl isothiocyanate shows promise as a naturally produced suppressant of the potato cyst nematode, *Globodera pallida*, in biofumigation systems. *Nematology*, 19(4), 389–402. <https://doi.org/10.1163/15685411-00003054>.
23. Yang, L., Wang, Y., Liang, Y., Deng, H., Wang, J., Dai, Y., Guo, F., Zhou, H., Li, S., & Ding, W. (2024). pH-responsive bentonite nanoclay carriers control the release of benzothiazolinone to restrain bacterial wilt disease. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 198, 105754. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105754>. EDN: <https://elibrary.ru/OIMKOT>
24. Zhao, M., Zhou, H., Hao, L., Chen, H., & Zhou, X. (2021). Natural rosin modified carboxymethyl cellulose delivery system with lowered toxicity for long-term pest control. *Carbohydrate Polymers*, 259, 117749. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117749>. EDN: <https://elibrary.ru/IWRKME>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anna A. Sukhanova, Anatoly N. Boyandin: development of the scientific concept, drafting of the manuscript.

Kristina E. Zabolotnaya: conducting experiments with nematodes, processing the results.

Andrei A. Churakov: conducting the field experiment, processing the results.

Sergei N. Syrtsov, Elena V. Brilkova: preparing the granules, processing the results.

ВКЛАД АВТОРОВ

Суханова А.А., Бояндин А.Н.: разработка концепции научной работы, подготовка текста статьи.

Заболотная К.Е.: проведение экспериментов с нематодами, обработка результатов.

Чураков А.А.: проведение полевого эксперимента, обработка результатов.

Сырцов С.Н., Брилькова Е.В.: изготовление гранул, обработка результатов.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna A. Sukhanova, PhD in Biology, Senior Researcher

Reshetnev State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

shumilova.ann@mail.ru

SPIN-code: 8540-6543

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-1450>

ResearcherID: N-6778-2016

Scopus Author ID: 55916360000

Kristina E. Zabolotnaya, Junior Researcher

Reshetnev State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

zabolotnaya1999@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8788-1012>

Andrei A. Churakov, Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Center for Selection and Seed Production

Krasnoyarsk State Agrarian University

90, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

andchurakov@gmail.com

SPIN-code: 5184-9372

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3150-5541>

Scopus Author ID: 57214220568

Sergei N. Syrtsov, Researcher

Reshetnev State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

kaideil@list.ru

SPIN-code: 1826-0855

Scopus Author ID: 54413114300

Elena V. Brilkova, Researcher

Reshetnev State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

evmorbril@mail.ru

Anatoly N. Boyandin, PhD in Biology, Senior Researcher

Reshetnev State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochoy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
boyandin@biopolymer.pro
SPIN-code: 7990-1174
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9190-2792>
ResearcherID: H-1641-2016
Scopus Author ID: 6507584996

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Анна А. Суханова, канд. биол. наук, старший научный сотрудник

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
пр-кт им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
shumilova.ann@mail.ru

Кристина Е. Заболотная, младший научный сотрудник

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
пр-кт им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
zabolotnaya1999@bk.ru

Андрей А. Чураков, канд. с.-х. наук, руководитель центра селекции и семеноводства

Красноярский государственный аграрный университет
пр. Мира, 90, г. Красноярск, 660049, Российская Федерация
andchurakov@gmail.com

Сергей Н. Сырцов, научный сотрудник

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
пр-кт им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
kaideil@list.ru

Елена В. Брилькова, научный сотрудник

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

пр-кт им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
evmorbril@mail.ru

Анатолий Н. Бояндин, канд. биол. наук, старший научный сотрудник

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
пр-кт им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
boyandin@biopolymer.pro

Поступила 13.10.2025

После рецензирования 25.12.2025

Принята 20.01.2026

Received 13.10.2025

Revised 25.12.2025

Accepted 20.01.2026

Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры / Horticulture, Vegetable Growing, Viticulture, and Medicinal Crops

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1530](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1530)

EDN: [WYFKYP](https://www.edn.ru/WYFKYP)

УДК 635.82



Изучение влияния состава субстрата на химический состав плодовых тел съедобных грибов

А.В. Третьякова, О.В. Прокудина, А.С. Мягкова,
Р.В. Симонов, Г.В. Песцов

Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,
Тула, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Сбалансированное соотношение углерода и азота (C:N) в субстрате для выращивания съедобных грибов является одним из ключевых факторов, который определяет скорость роста мицелия, морфогенез и плодоношение. Известно, что избыточное содержание углерода ограничивает синтез белков и ферментов, а недостаток азота замедляет развитие мицелия. Использование органических добавок, богатых азотом, например, зерновую пивную дробину, позволяет регулировать соотношение C:N в субстрате, улучшая его питательные свойства, а также изменять биохимический состав грибов, увеличивая содержание белков, жиров и минеральных веществ.

Цель. Изучить влияние изменения соотношения углерода и азота в субстрате при добавлении зерновой пивной дробины на химический состав плодовых тел съедобных грибов *Pleurotus ostreatus* (вешенка обыкновенная) и *Flammulina velutipes* (эноки).

Материалы и методы. В качестве основы субстрата использовали пшеничную солому, в которую добавляли 5% пшеничных отрубей (эталон) и зерновую пивную дробину в различных концентрациях. Определяли содержание углерода и азота в субстрате для расчёта соотношения C:N и химический состав плодовых тел (белок, жиры, углеводы, минеральные вещества). Количество азота определяли на CHN-анализаторе SDCHN636 фирмы Sundry. Содержание жиров определяли методом Сокслета. Количество золы определяли весовым методом. Количество

углеводов определяли, как разность (Углеводы = 100 - (Белок+Жиры+Зола)). Все измерения проводили в 5-ти кратной повторности, результаты обрабатывали статистически, используя пакет прикладных программ Microsoft Excel.

Результаты. Для гриба *Pleurotus ostreatus* (вешенка обыкновенная) при выращивании на субстрате с добавлением 10% зерновой пивной дробины отмечали увеличение содержания белка с 6,1 г до 12,7 г. и минеральных веществ с 3,7 г до 6,5 г. При этом содержание углеводов снижалось с 88,1 г до 78,5 г, что отражает перераспределение углерода в сторону синтеза белков. У гриба *Flammulina velutipes* (эноки) наблюдали аналогичную закономерность, на субстрате с добавлением 10% пивной дробины содержание белка возрастало с 7,0 г до 10,1 г, жиров с 2,9 г до 3,3 г, а золы с 4,19 г до 4,23 г. При этом содержание углеводов снижалось с 85,91 г до 82,37 г, что также указывает на усиление азотного обмена. Таким образом, добавление 10% зерновой пивной дробины в субстрат на основе пшеничной соломы способствует формированию плодовых тел со сбалансированным химическим составом.

Ключевые слова: *Pleurotus ostreatus*; *Flammulina velutipes*; пивная дробина; соотношение C:N; белок; субстрат; химический состав

Для цитирования. Третьякова, А. В., Прокудина, О. В., Мягкова, А. С., Симонов, Р. В., & Песцов, Г. В. (2026). Изучение влияния состава субстрата на химический состав плодовых тел съедобных грибов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 454–468. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1530>

Study of the effect of substrate composition on the chemical composition of fruit bodies of edible mushrooms

A.V. Tretyakova, O.V. Prokudina, A.S. Myagkova,
R.V. Simonov, G.V. Pestsov

Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation

Abstract

Background. A balanced carbon-to-nitrogen ratio (C:N) in the substrate for cultivation of edible mushrooms is one of the key factors that determines the rate of mycelial growth, morphogenesis and fruiting. It is known that excessive carbon content limits the synthesis of proteins and enzymes, while nitrogen deficiency retards mycelial development. The use of organic nitrogen-rich additives, for example grain brewer pellets, makes it possible to regulate the substrate C:N ratio, improve its nutritional properties, and alter the biochemical composition of mushrooms, increasing the contents of protein, lipids and mineral substances. Terminology for certain substrate additives and related terms was used in accordance with the user's provided translation file.

Purpose. To investigate the effect of changing the carbon-to-nitrogen ratio in the substrate by addition of grain brewer pellets on the chemical composition of the fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom) and *Flammulina velutipes* (enoki).

Materials and methods. Wheat straw was used as the main substrate, with addition of 5% wheat bran (reference) and grain brewer pellets at various concentrations. Carbon and nitrogen contents in the substrate were determined to calculate the C:N ratio, and the chemical composition of the fruiting bodies was determined (protein, lipids, carbohydrates, mineral substances). Nitrogen content was determined using a CHN analyzer SDCHN636 (Sundy). Lipid content was determined by the Soxhlet method. Ash content was determined gravimetrically. Carbohydrate content was calculated by difference (Carbohydrates = 100 – (Protein + Lipids + Ash)). All measurements were performed in quintuplicate, and the results were processed statistically using Microsoft Excel software.

Results. For *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom), when cultivated on substrate with the addition of 10% grain brewer pellets, protein content increased from 6.1 g to 12.7 g, and mineral substances increased from 3.7 g to 6.5 g. At the same time, carbohydrate content decreased from 88.1 g to 78.5 g, which reflects a redistribution of carbon toward protein synthesis. For *Flammulina velutipes* (enoki) a similar pattern was observed: on substrate with 10% grain brewer pellets protein content increased from 7.0 g to 10.1 g, lipids from 2.9 g to 3.3 g, and ash from 4.19 g to 4.23 g. Carbohydrate content decreased from 85.91 g to 82.37 g, which also indicates enhanced nitrogenous metabolism. Thus, addition of 10% grain brewer pellets to a wheat straw-based substrate contributes to formation of fruiting bodies with a balanced chemical composition.

Keywords: *Pleurotus ostreatus*; *Flammulina velutipes*; grain brewer pellets; carbon-to-nitrogen ratio; substrate; protein; chemical composition

For citation. Tretyakova, A. V., Prokudina, O. V., Myagkova, A. S., Simonov, R. V., & Pestov, G. V. (2026). Study of the effect of substrate composition on the chemical composition of fruit bodies of edible mushrooms. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 454–468. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1530>

Введение

В современной прикладной микологии и биотехнологии съедобные грибы рассматриваются не только как пищевой, но и как функциональный продукт благодаря сбалансированному химическому составу. В состав плодовых тел грибов входят белки, углеводы, липиды, витамины, макро- и микроэлементы, а также специфические биологические активные вещества (β-глюканы, полифенолы, стеролы и др.) [4]. Химический состав плодовых тел варьируется в зависимости от вида гриба, условий выращивания, стадии плодоношения и состава субстрата. Изменения в химическом составе влияют на питательную

ценность и функциональные свойства (например, иммуномодуляция, антиоксидантная активность) плодовых тел съедобных грибов.

В литературе описывается, что добавление азотосодержащих компонентов (мочевина, отруби, пивная дробина и др.) в субстрат для выращивания съедобных грибов приводит к росту общего содержания азота и, как следствие, к увеличению количества сырого протеина в плодовых телах, например, для родов *Pleurotus*, *Agaricus* и др. Количество накопленного плодовыми телами азота зависит от формы, дозы и момента его внесения. Умеренное обогащение субстрата повышает урожайность и увеличивает количество белка в плодовых телах, а чрезмерное внесение добавок, наоборот, может подавлять образование плодовых тел или ухудшать их качество [7; 16-18].

Важным критерием выбора компонентов субстрата является количество углерода (C), азота (N) и их соотношение (C:N). Углерод в субстрате входит в состав целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, других органических соединений, которые служат основным источником энергии и строительным материалом для мицелия грибов. Азот необходим грибам для синтеза белков, нуклеиновых кислот, ферментов и других азотсодержащих соединений, а также для роста мицелия и формирования плодовых тел. Если один из этих элементов в субстрате содержится в недостаточном количестве, например, мало азота или наоборот много азота или недостаточно углерода, то рост мицелия и плодообразование грибов может замедляться [9; 14].

Соотношение углерода к азоту (C:N) показывает определённый баланс между источником углерода и источником азота в субстрате. При соблюдении рекомендованного соотношения C:N обеспечивается достаточное количество энергии из углерода для активного роста мицелия и образования плодовых тел и достаточное количество азота для формирования мицелиальной биомассы [6; 13]. В литературных данных показано, что разные виды грибов требуют определённого соотношения C:N. Для гриба *Flammulina velutipes* рекомендуется соотношение углерода к азоту (C:N) как 27:1 [12]. Для гриба *Pleurotus ostreatus* рекомендуется использовать соотношение C:N примерно 30:1 [5; 15]. Использование субстратов с рекомендованным соотношением углерода к азоту обеспечивает более высокую урожайность и лучшую питательную ценность плодовых тел.

Материалы и методы

Для изучения влияния состава субстрата на химический состав плодовых тел съедобных грибов использовали вид *Pleurotus ostreatus* (вешенка обыкновенная) штамм 135 (ВКПМ F-813) и *Flammulina velutipes* (эноки, зимний

опенок) штамм 562 (ВКПМ F-562) из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» ГосНИИгенетика. В качестве основы для субстрата использовали пшеничную солому, в качестве добавок использовали пшеничные отруби 5% от массы субстрата (эталон) и зерновую пивную дробину в концентрациях 10%, 20% и 30%.

Для определения питательной ценности субстрата и подбора его состава для выращивания плодовых тел съедобных грибов изучали содержание азота и углерода с последующим расчетом их соотношения (C:N). Субстраты высушивали в сушильном шкафу при температуре 100°C до постоянной массы. Далее высушенные субстраты измельчали до размера частиц 1-2 мм. Определение массовой доли углерода (C) и азота (N) в образцах проводили на CHN-анализаторе SDCHN636 фирмы Sundy. Газовый анализатор SDCHN636 (Sundy, КНР) предназначен для одновременного определения массовой доли углерода (C), водорода (H) и азота (N) в различных образцах органического и неорганического происхождения. Принцип работы прибора основан на полном высокотемпературном сжигании навески в атмосфере кислорода и последующем анализе газообразных продуктов реакции с использованием детекторов по теплопроводности (TCD) и инфракрасного излучения (IR). В качестве газов используются: кислород – газ-окислитель; гелий – газ-носитель; азот – приводной газ для системы подачи. Программное обеспечение позволяет автоматически рассчитывать результаты, вести калибровку по стандартным образцам, составлять отчёты и контролировать качество анализа в ходе серии.

Соотношение углерода к азоту вычисляли как отношение процентного содержания углерода к процентному содержанию азота по формуле:

$$C:N = \frac{\%C}{\%N}$$

где: C:N - соотношение углерода к азоту, C – количество углерода, N количество азота [1, 11].

Исследование химического состава плодовых тел включало определение содержания белков, жиров, углеводов, золы в сухом веществе. Высушивание плодовых тел проводили по следующей методике: свежие плодовые тела помещали в тигли и проводили сушку при температуре 100°C до постоянной массы в сушильном шкафу.

Содержание белка рассчитывали по коэффициенту преобразования (количество N × на коэффициент 4,38). Литературные данные указывают, что использование общего коэффициента 6,25 завышает истинное содержание белка в плодовых телах, поскольку часть азота в грибах содержится в небелковых соединениях. Поэтому рекомендуется использовать коэф-

фициент – 4,38 [8; 10]. Количество азота определяли в плодовых телах на CHN-анализаторе SDCHN636 фирмы Sundry. Содержание жиров определяли методом Сокслета с использованием растворителя (1:2 этанол:ацетон) [2]. Для определения содержания золы навеску высушенного образца помещали в муфельную печь и прокаливали при 700°C до получения белого остатка (золы). Содержание золы рассчитывали, как отношение массы остатка к массе сухого вещества [3]. Количество углеводов определяли, как разность:

$$\text{Углеводов} = 100 - (\text{Белка} + \text{Жиры} + \text{Золы})$$

Все измерения проводили в 3-х кратной повторности. Результат приводили в пересчёте на 100 г сухого вещества. Полученные данные статистически обрабатывали, используя пакет прикладных программ Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

На первом этапе научно-исследовательской работы было определено содержание углерода (C) и азота (N), а также рассчитано их соотношение (C:N). Данный показатель является одним из ключевых и характеризует питательную ценность субстрата и его пригодность для культивирования съедобных грибов. Полученные данные позволяют оценить влияние внесения зерновой пивной дробины в различных концентрациях на изменение углеродно-азотного баланса субстратов и обосновать количество внесения зерновой пивной дробины в субстрат на основе соломы для развития мицелия и образования плодовых тел. Результаты анализа углеродно-азотного состава и их соотношения в различных субстратах представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Анализ углеродно-азотного состава субстратов
Table 1. Analysis of the Carbon-Nitrogen Composition of Substrates

№	Субстраты	Углерод (C), %	Азот (N), %	Соотношение углерода к азоту (C:N)
1	Пивная дробина	47,6±0,95	8,2±0,14	5,8:1
2	Солома	44,5±0,63	0,8±0,11	56,5:1
3	Солома + отруби пшеничные 5%	49,0±0,68	1,4±0,02	34,9:1
4	Солома + зерновая пивная дробина 10%	49,0±0,62	1,5±0,01	32,7:1
5	Солома + зерновая пивная дробина 20%	49,0±0,62	1,8±0,01	27,2:1
6	Солома + зерновая пивная дробина 30%	47,5±0,89	2,6±0,10	18,6:1

Анализ данных таблицы 1 показал, что добавление азотсодержащих компонентов влияет на соотношение C:N, которое определяет питательную ценность субстрата, обеспечивает условия для активного развития мицелия и образования плодовых тел грибов. Субстрат из нативной зерновой пивной дробины характеризуется низким соотношением углерода к азоту (5,8:1), что свидетельствует о высоком содержании белковых соединений. Использование зерновой пивной дробины в качестве самостоятельного субстрата для получения плодовых тел съедобных грибов может привести к избыточному накоплению аммиачного азота и замедлению плодообразования. Субстрат из пшеничной соломы, имеющий соотношение C:N 56,5:1, характеризуется низким содержанием азота и нуждается во внесении органических добавок для улучшения его питательной ценности.

Добавление зерновой пивной дробины в количестве 10-20% к соломе позволило достичь оптимального соотношения углерода к азоту (27-33:1), что соответствует физиологическим потребностям большинства культивируемых базидиомицетов. При таких значениях обеспечивается активное развитие вегетативного мицелия и формирование плодовых тел грибов *P. ostreatus* и *F. velutipes*. Увеличение количества зерновой пивной дробины до 30 %, приводит к снижению соотношения C:N до 18,6:1, что может вызывать усиление микробиологической активности субстрата и повышать вероятность его самонагревания в период инкубации.

Таким образом, для культивирования плодовых тел съедобных грибов вида *P. ostreatus* и вида *F. velutipes* необходимо использовать субстраты с соотношением C:N в пределах 25-35:1, наиболее подходящим является субстрат, содержащий 10-20% пивной дробины, обеспечивающий соотношение углерода к азоту 27,2-32,7:1. Полученные результаты согласуются с литературными данными, указывающими на важность поддержания соотношения C:N для стабильного роста и развития мицелия, а также высокой урожайности плодовых тел.

На следующем этапе научно-исследовательской работы был проведен анализ и сравнение химического состава плодовых тел грибов, которые были получены на субстрате из пшеничной соломы с добавлением 5% пшеничных отрубей (контроль) и на субстрате из пшеничной соломы с добавлением 10% зерновой пивной дробины, так как такой субстрат не только обладает оптимальным соотношением углерода к азоту, но и, по предварительным данным, обеспечивает более высокую урожайность плодовых тел изучаемых видов грибов. Результаты изучения химического состава приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Анализ химического состава плодовых тел грибов *Pleurotus ostreatus* и *Flammulina velutipes* в пересчете на 100 г сухого вещества

Table 2. Analysis of the chemical composition of the fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus* and *Flammulina velutipes*, expressed per 100 g of dry matter

Субстрат	Соотношение углерода к азоту (C:N)	Белок, г	Жиры, г	Зола, г	Углево-ды, г
<i>Pleurotus ostreatus</i>					
Солома + отруби 5% (контроль)	30,7:1	6,1±0,10	2,1±0,13	3,7±0,10	88,1±0,12
Солома + пивная дробина 10%	15,6:1	12,7±0,30	2,3±0,10	6,5±0,13	78,5±0,20
<i>Flammulina velutipes</i>					
Солома + отруби 5% (контроль)	27,4:1	7,0±0,10	2,9±0,15	4,19±0,10	85,91±0,12
Солома + пивная дробина 10%	20,0:1	10,1±0,30	3,3±0,11	4,23±0,13	82,37±0,15

Результаты представленные в таблице 2 показывают, что химический состав плодовых тел грибов *P. ostreatus* и *F. velutipes* связан с содержанием углерода, азота и их соотношением (C:N) в субстрате. Использование субстратов с правильно подобранным соотношением углерода и азота позволило получить плодовые тела с более высоким содержанием целевых органических компонентов (белковых соединений).

В плодовых телах гриба *P. ostreatus*, выращенных на субстрате из соломы с добавлением 10 % пивной дробины наблюдается снижение соотношения C:N до 15,6:1 с 30,7:1 (контроль), что связано с увеличением содержания белка – с 6,1 г до 12,7 г. Это свидетельствует о том, что добавление зерновой пивной дробины, повышает доступность азота для мицелия и стимулирует синтез белковых соединений в плодовых телах. Содержание жиров в плодовых телах изменяется незначительно – 2,3 г (2,1 г – контроль). Небольшое увеличение свидетельствует о том, что при изменении содержания азота и углерода в субстрате, липидный синтез в плодовых телах остаётся относительно стабильным. Количество минеральных веществ (зола) в плодовых телах гриба *P. ostreatus*, выращенных на субстрате из соломы с добавлением 10 % пивной дробины увеличивается до 6,5 г, а в контроле – 3,7 г, что свидетельствует о более активном накоплении минеральных элементов в плодовых телах при увеличении содержания азота в субстрате. Снижение доли углеводов в плодовых телах с 88,1 г до 78,5 г указывает на перераспределение углеродных

ресурсов из углеводного метаболизма в синтез белковых компонентов. Это метаболическая реакция грибов на повышение доступности азота в субстрате.

Анализируя данные таблицы 2 можно сделать вывод, что снижение соотношения C:N в плодовых телах гриба вешенки обыкновенной за счёт добавления 10 % пивной дробины в субстрат способствует увеличению содержания белка и минеральных веществ в плодовых телах, перераспределению углерода с синтеза углеводов на синтез белков. Таким образом, добавление азотсодержащих компонентов в субстраты для культивирования плодовых тел, является эффективным способом повышения пищевой ценности плодовых тел гриба *P. ostreatus*.

Для гриба *F. velutipes* (эноки) также прослеживается зависимость химического состава плодовых тел от соотношения углерода к азоту (C:N) в субстрате. В плодовых телах эноки наблюдается снижение соотношения C:N с 27,4:1 (солома + 5 % отрубей) до 20,0:1 (солома + 10 % пивной дробины) из-за увеличения содержания белка с 7,0 г до 10,1 г. Это указывает на то, что добавление 10% зерновой пивной дробины в субстрат для культивирования плодовых тел, повышает доступность азота для мицелия и стимулирует образование белка в плодовых телах. Содержание жиров увеличивается с 2,9 г до 3,3 г, что отражает более активное протекание липидного обмена при увеличении доли азота в субстрате. Доля золы в плодовых телах гриба *F. velutipes* увеличивается незначительно – с 4,19 г до 4,23 г, что свидетельствует о стабильном, но более эффективном накоплении минеральных элементов в плодовых телах при увеличении азотного питания. Содержание углеводов снижается с 85,91 г до 82,37 г, что отражает перераспределение углеродных ресурсов из углеводного обмена в синтез белков. Изменение соотношение C:N в плодовых телах эноки за счёт добавления 10 % пивной дробины в питательный субстрат приводит к увеличению белковой массы, умеренному росту содержания жиров и минеральных веществ, а также к перераспределению углерода на синтез белковых соединений. Таким образом, регулирование соотношения C:N в субстрате с помощью азотсодержащих добавок повышает пищевую ценность в плодовых телах гриба *F. velutipes*.

Заключение

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что химический состав плодовых тел съедобных грибов вида *P. ostreatus* и вида *F. velutipes* зависит от соотношения углерода к азоту (C:N) в питательном субстрате. Увеличение азота в субстрате из-за добавления 10% зерновой пивной дробины, приводит к увеличению белка, перераспределению углерода, изменению липидного и минерального состава плодовых тел. У гриба *P. ostreatus* наблю-

дается повышение содержания белка с 6,1 г до 12,7 г, а у гриба *F. velutipes* с 7,0 г до 10,1 г. Это свидетельствует о более эффективном усвоении азота и активном синтезе белков в плодовых телах при рекомендованном соотношении C:N. Содержание углеводов у вида *P. ostreatus* снижается с 88,1 г до 78,5 г, а у вида *F. velutipes* с 85,91 г до 82,37 г, что демонстрирует перераспределение углеродных ресурсов из углеводного обмена в синтез белков. Содержание жиров в плодовых телах изменяется незначительно, а количество минеральных веществ увеличивается, что указывает на накопление макро- и микроэлементов. Таким образом, регулирование соотношения C:N в субстрате с помощью зерновой пивной дробины позволяет повысить пищевую ценность плодовых тел, увеличивая количество белка, что является важным фактором для производства съедобных грибов. Добавление 10% пивной дробины в субстрат на основе пшеничной соломы обеспечивает увеличение количества белка в плодовых телах, и повышает минеральную ценность продукции, что делает этот подход перспективным для практического грибоводства.

Список литературы

1. Квиткина, А. К., Журавлева, А. И., Дударева, Д. М., & Быховец, С. С. (2020). Влияние соотношения углерода к азоту (C/N) на минерализацию и трансформацию лигнина: модельный подход. *Экология урбанизированных территорий*, (2), 30–40. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2020-12030>. EDN: <https://elibrary.ru/GJIMDF>
2. Болдырева, О. И., & Мозгунова, Е. М. (2012). *Методы исследования пищевых продуктов: методические указания к лабораторным работам*. Оренбургский государственный университет.
3. ГОСТ 15113.8-77. (1977). Концентраты пищевые. Методы определения золы. Стандарт.
4. Третьякова, А. В., Прокудина, О. В., Мягкова, А. С., & Песцов, Г. В. (2025). Химический состав плодовых тел гриба *Lentinula edodes* (шиитаке). В *Современные тенденции и практические решения в науке: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции* (с. 316). Международный центр «Новые научные исследования».
5. Okere, S. E., Onyekachi, O. P., Offor, M. O., Nwokoji, E. M., Ekpe, I. I., & Anyanwu, N. J. (2021). Effects of different carbon/nitrogen ratios on yield and bioconversion efficiency of *Pleurotus ostreatus* cultivated on cassava peels and sawdust-based substrate. *NJB*, 34(1), 117–124.
6. İnce, G., Soylu, M., & Çömlekçioglu, N. (2024). Effects of cultivation substrate composition on biological productivity and quality parameters of *Ganoderma lucidum*. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 28(2), 235–247. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1440438>.

7. Carrasco, J., Zied, D. C., Pardo, J. E., & Pardo-Giménez, A. (2018). Supplementation in mushroom crops and its impact on yield and quality. *AMB Express*, 8(146). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0678-0>. EDN: <https://elibrary.ru/VVEEUM>
8. Chang, S. T., & Miles, P. G. (2004). *Mushrooms: Cultivation, nutritional value, medicinal effect, and environmental impact* (2nd ed.). CRC Press.
9. Bellettini, M. B., Fiorda, F. A., Maieves, H. A., Teixeira, G. L., Ávila, S., Hornung, P. S., Júnior, A. M., & Ribani, R. H. (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633–646. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
10. Crisan, E. V., & Sands, A. (1978). Nutritional value of edible mushrooms. In S. T. Chang & W. A. Hayes (Eds.), *The biology and cultivation of edible mushrooms* (pp. 137–165). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-168050-3.50012-8>.
11. Cueva, M. B. R., Hernández, A., & Ruiz, Z. (2017). Influence of C/N ratio on productivity and the protein contents of *Pleurotus ostreatus* grown in different residue mixtures. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49, 331–344.
12. Han, J., Sun, R., Huang, C., Xie, H., Gao, X., Yao, Q., Yang, P., Li, J., & Gong, Z. (2024). Effects of different carbon and nitrogen ratios on yield, nutritional value, and amino acid contents of *Flammulina velutipes*. *Life*, 14(5), 598. <https://doi.org/10.3390/life14050598>.
13. Gea, F. J., Suárez-Villanueva, V., & Navarro, M. J. (2022). Carbon and nitrogen dynamics during composting and their influence on *Agaricus bisporus* production. *Biology*, 11(4), 569. <https://doi.org/10.3390/biology11040569>. EDN: <https://elibrary.ru/YISKWB>
14. Song, B., Ye, J., Sossah, F.L. et al. Assessing the effects of different agro-residue as substrates on growth cycle and yield of *Grifola frondosa* and statistical optimization of substrate components using simplex-lattice design. *AMB Expr* 8, 46 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0565-8>
15. El-Ramady, H., Abdalla, N., Fawzy, Z., Badgar, K., Llanaj, X., Törös, G., Hajdú, P., Eid, Y., & Prokisch, J. (2022). Green Biotechnology of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): A Sustainable Strategy for Myco-Remediation and Bio-Fermentation. *Sustainability*, 14(6), 3667. <https://doi.org/10.3390/su14063667>
16. Nunes, M. D., da Luz, J. M. R., Paes, S. A., Ribeiro, J. J., de Cássia, M., & Kasuya, M. C. M. (2012). Nitrogen supplementation on the productivity and the chemical composition of oyster mushroom. *Journal of Food Research*, 1(2), 113–119. <https://doi.org/10.5539/jfr.v1n2p113>.
17. Sassine, Y. N., Bkaily, G., Hachem, M., Salloum, L., Frenn, D., & Jreijiry, J. (2021). Nano-urea effects on *Pleurotus ostreatus* nutritional value depending on the dose and timing of application. *Scientific Reports*, 11, Article 4275. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85191-9>. EDN: <https://elibrary.ru/KJXDRM>

18. Sassine, Y. N., Bkaily, G., Hachem, M., Salloum, L., Frenn, D., & Jreijiry, J. (2022). Changes in *Pleurotus ostreatus* nutritional value and heavy metal profile as a result of supplementation with nano-additive. *Scientific Information Forum*, 1(1), Article 12. <https://doi.org/10.48130/SIF-2022-0012>.

References

1. Kvitkina, A. K., Zhuravleva, A. I., Dudareva, D. M., & Bykhovets, S. S. (2020). Influence of the carbon-to-nitrogen ratio (C/N) on mineralization and transformation of lignin: A model approach. *Ecology of Urbanized Territories*, (2), 30–40. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2020-12030>. EDN: <https://elibrary.ru/GJIMDF>
2. Boldyreva, O. I., & Mozgunova, E. M. (2012). *Methods for the study of food products: Methodological guidelines for laboratory work*. Orenburg State University.
3. GOST 15113.8-77. (1977). Food concentrates. Methods for determination of ash. Standart.
4. Tretyakova, A. V., Prokudina, O. V., Myagkova, A. S., & Pestsov, G. V. (2025). Chemical composition of fruiting bodies of the fungus *Lentinula edodes* (shiitake). In *Modern trends and practical solutions in science: Collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference* (p. 316). International Center «New Scientific Research».
5. Okere, S. E., Onyekachi, O. P., Offor, M. O., Nwokoji, E. M., Ekpe, I. I., & Anyanwu, N. J. (2021). Effects of different carbon/nitrogen ratios on yield and bioconversion efficiency of *Pleurotus ostreatus* cultivated on cassava peels and sawdust-based substrate. *NJB*, 34(1), 117–124.
6. İnce, G., Soylu, M., & Çömlekçioglu, N. (2024). Effects of cultivation substrate composition on biological productivity and quality parameters of *Ganoderma lucidum*. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 28(2), 235–247. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1440438>.
7. Carrasco, J., Zied, D. C., Pardo, J. E., & Pardo-Giménez, A. (2018). Supplementation in mushroom crops and its impact on yield and quality. *AMB Express*, 8(146). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0678-0>. EDN: <https://elibrary.ru/VVEEUM>
8. Chang, S. T., & Miles, P. G. (2004). *Mushrooms: Cultivation, nutritional value, medicinal effect, and environmental impact* (2nd ed.). CRC Press.
9. Bellettini, M. B., Fiorda, F. A., Maieves, H. A., Teixeira, G. L., Ávila, S., Hornung, P. S., Júnior, A. M., & Ribani, R. H. (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633–646. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
10. Crisan, E. V., & Sands, A. (1978). Nutritional value of edible mushrooms. In S. T. Chang & W. A. Hayes (Eds.), *The biology and cultivation of edible mushrooms* (pp. 137–165). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-168050-3.50012-8>.

11. Cueva, M. B. R., Hernández, A., & Ruiz, Z. (2017). Influence of C/N ratio on productivity and the protein contents of *Pleurotus ostreatus* grown in different residue mixtures. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49, 331–344.
12. Han, J., Sun, R., Huang, C., Xie, H., Gao, X., Yao, Q., Yang, P., Li, J., & Gong, Z. (2024). Effects of different carbon and nitrogen ratios on yield, nutritional value, and amino acid contents of *Flammulina velutipes*. *Life*, 14(5), 598. <https://doi.org/10.3390/life14050598>.
13. Gea, F. J., Suárez-Villanueva, V., & Navarro, M. J. (2022). Carbon and nitrogen dynamics during composting and their influence on *Agaricus bisporus* production. *Biology*, 11(4), 569. <https://doi.org/10.3390/biology11040569>. EDN: <https://elibrary.ru/YISKWB>
14. Song, B., Ye, J., Sossah, F.L. et al. Assessing the effects of different agro-residue as substrates on growth cycle and yield of *Grifola frondosa* and statistical optimization of substrate components using simplex-lattice design. *AMB Expr* 8, 46 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0565-8>
15. El-Ramady, H., Abdalla, N., Fawzy, Z., Badgar, K., Llanaj, X., Törös, G., Hajdú, P., Eid, Y., & Prokisch, J. (2022). Green Biotechnology of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): A Sustainable Strategy for Myco-Remediation and Bio-Fermentation. *Sustainability*, 14(6), 3667. <https://doi.org/10.3390/su14063667>
16. Nunes, M. D., da Luz, J. M. R., Paes, S. A., Ribeiro, J. J., de Cássia, M., & Kasuya, M. C. M. (2012). Nitrogen supplementation on the productivity and the chemical composition of oyster mushroom. *Journal of Food Research*, 1(2), 113–119. <https://doi.org/10.5539/jfr.v1n2p113>.
17. Sassine, Y. N., Bkaily, G., Hachem, M., Salloum, L., Frenn, D., & Jreijiry, J. (2021). Nano-urea effects on *Pleurotus ostreatus* nutritional value depending on the dose and timing of application. *Scientific Reports*, 11, Article 4275. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85191-9>. EDN: <https://elibrary.ru/KJXDRM>
18. Sassine, Y. N., Bkaily, G., Hachem, M., Salloum, L., Frenn, D., & Jreijiry, J. (2022). Changes in *Pleurotus ostreatus* nutritional value and heavy metal profile as a result of supplementation with nano-additive. *Scientific Information Forum*, 1(1), Article 12. <https://doi.org/10.48130/SIF-2022-0012>.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Третьякова Анастасия Валерьевна, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий научно-исследовательского института химических, фармацевтических и биотехнологий им. профессора С.С. Гитиса
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
glazynovaanastasiya@gmail.com*

Прокудина Ольга Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий научно-исследовательского института химических, фармацевтических и биотехнологий им. профессора С.С. Гитиса
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
prokudinaolga11@gmail.com*

Мягкова Анастасия Сергеевна, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий научно-исследовательского института химических, фармацевтических и биотехнологий им. профессора С.С. Гитиса
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
myagkovanastasia@gmail.com*

Симонов Роман Викторович, научный сотрудник сектора аналитических исследований научно-исследовательского института химических, фармацевтических и биотехнологий им. профессора С.С. Гитиса
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
tulalse2020@mail.ru*

Песцов Георгий Вячеславович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий лабораторией биотехнологий научно-исследовательского института химических, фармацевтических и биотехнологий им. профессора С.С. Гитиса
*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация
georgypestsov@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anastasia V. Tretyakova, Research Assistant Laboratory of Biotechnologies of the Scientific Research Institute of Chemical, Pharmaceutical and Biotechnologies named after Professor S.S. Gitis
*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation
glazynovaanastasiya@gmail.com
SPIN-code: 5486-0434
ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6125-1206>
Scopus Author ID: 57113765800*

Olga V. Prokudina, Research Assistant Laboratory of Biotechnologies of the Scientific Research Institute of Chemical, Pharmaceutical and Biotechnologies named after Professor S.S. Gitis

*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation
prokudinaolga11@gmail.com*

SPIN-code: 9582-5520

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0003-1092>

Scopus Author ID: 58114609300

Anastasia S. Myagkova, Research Assistant Laboratory of Biotechnologies of the Scientific Research Institute of Chemical, Pharmaceutical and Biotechnologies named after Professor S.S. Gitis

*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation
myagkovanastasia@gmail.com*

SPIN-code: 6415-9331

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-7690-2281>

Roman V. Simonov, Researcher of the Sector of Analytical Research Biotechnologies of the Scientific Research Institute of Chemical, Pharmaceutical and Biotechnologies named after Professor S.S. Gitis

*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation
tulalse2020@mail.ru*

SPIN-code: 3655-2676

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8337-8147>

Georgiy V. Pestsov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the laboratory of Biotechnologies of the Scientific Research Institute of Chemical, Pharmaceutical and Biotechnologies named after Professor S.S. Gitis

*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125, Lenin Ave., Tula, 300026, Russian Federation
georgypestsov@gmail.com*

SPIN-code: 8908-7112

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3877-0102>

Scopus Author ID: 57209299598

Поступила 26.12.2025

После рецензирования 20.02.2026

Принята 26.02.2026

Received 26.12.2025

Revised 20.02.2026

Accepted 26.02.2026

**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: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1439](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1439)EDN: [XKDJJR](https://www.edn.ru/XKDJJR)

УДК 581.5



**Естественные ареалы видов рода *Populus* spp. в южных
регионах Кыргызстана: фенологические особенности
и перспективы использования в городском озеленении**

Р.Р. Абсатаров¹, Б.Н. Шамшиев²

¹*Ошский государственный педагогический университет
имени А. Мырсабекова, Ош, Кыргызская Республика*

²*Ошский технологический университет имени М. Адышева,
Ош, Кыргызская Республика*

Аннотация

Обоснование. В данной работе рассматриваются основные виды деревьев рода тополь, произрастающие в южных регионах Кыргызстана, их экологические особенности и географическое распространение. Тополь – быстрорастущие, светолюбивые и влаголюбивые деревья. Они особенно распространены в долинах рек, ирригационных бассейнах и городских зеленых зонах. Относительно теплый климат южных регионов (Ошской, Джалал-Абадской, Баткенской областей) создает благоприятные условия для выращивания ряда видов тополей. Помимо естественно произрастающих в этих регионах тополей, существует также множество видов, выращиваемых в культуре.

Целью исследования является определение видового состава представителей рода *Populus* spp. семейства Salicaceae Mirb, распространенных в южных регионах Кыргызстана. Определить их закономерности сезонного ритма в условиях города Ош.

Материалы и методы. Статья подготовлена на основе результатов полевых исследований, проведенных в южных регионах Кыргызстана, и фенологических наблюдений за видами тополей в городских зеленых зонах города Ош. Феноло-

гические наблюдения продолжались в течение пяти лет общепринятых методах фенологических исследований по Н. Е. Булыгину.

Результаты. В южных регионах Кыргызстана естественно произрастают 5 видов тополей, что подчеркивает их важность для биоразнообразия и экосистемных процессов. Проведён мониторинг сезонных изменений фенологических фаз местных видов тополей на зелёных зонах города Ош. Сделано анализ влияния климатических факторов, загрязнения воздуха и стрессовых условий города на динамику фенологических изменений. Результаты исследования могут быть полезны ученым, специалистам по охране природы, лесному хозяйству и садоводству.

Ключевые слова: фенофазы; тополь; урбанизированная среда; фенология; климатические изменения

Для цитирования. Абсатаров, Р. Р., & Шамшиев, Б. Н. (2026). Естественные ареалы видов рода *Populus* spp. в южных регионах Кыргызстана: фенологические особенности и перспективы использования в городском озеленении. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 469–483. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1439>

Natural habitats of *Populus* spp. species in the southern regions of Kyrgyzstan: phenological features and prospects for urban landscaping

R.R. Absatarov¹, B.N. Shamshiev²

¹*Osh State Pedagogical University named after A. Myrsabekov, Osh, Kyrgyz Republic*

²*Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyz Republic*

Abstract

Background. The distribution of tree species within the genus *Populus* (poplars) is a complex and multifaceted topic requiring further research. Poplars are key components of biodiversity and ecosystems, and studying their distribution helps us understand the processes of formation and conservation of wildlife. Research on the distribution and phenology of poplars in urban environments is of significant practical importance for forestry, nature conservation, and landscape design. Poplars are widely used in landscaping urban parks, restoring riverbanks, and protected areas. Furthermore, they are valuable tree species used in forestry and the national economy.

Purpose. The aim of this study is to identify the species composition of representatives of the genus *Populus* spp. (family Salicaceae Mirb) found in the southern regions of Kyrgyzstan and to determine their patterns of seasonal rhythm in the urban conditions of Osh City.

Materials and methods. The article is based on the results of field studies conducted in the southern regions of Kyrgyzstan and phenological observations of poplar species in the urban green zones of Osh City. Phenological observations were carried out over a five-year period using conventional methods of phenological research according to N. E. Bulygin.

Results. 5 species of poplars grow naturally in the southern regions of Kyrgyzstan, which underlines their importance for biodiversity and ecosystem processes. Seasonal changes in the phenological phases of local poplar species in the green areas of Osh city were monitored. The analysis of the influence of climatic factors, air pollution and stressful conditions of the city on the dynamics of phenological changes is made. The results of the study can be useful to scientists, specialists in nature conservation, forestry and horticulture.

Keywords: phenophases; *Populus*; urban environment; phenology; climate change

For citation. Absatarov, R. R., & Shamshiev, B. N. (2026). Natural habitats of *Populus* spp. species in the southern regions of Kyrgyzstan: phenological features and prospects for urban landscaping. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 469–483. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1439>

Введение

Естественные ареалы рода *Populus* spp. распространены в умеренном поясе северного полушария и заходят на север достигая до пределов древесной растительности. А южная граница захватывает Северную Африку, Персию, Гималаи, горы Южного Китая, Калифорнию, Новую Мексику и Флориду [2; 5; 9; 11; 13]. Легкость размножения, высокая скорость роста и неприхотливость обеспечили тополям популярность как декоративному и ветрозащитному растению. Гибридные формы тополей широко размножается в Канаде, США, Италии, Нидерландах, Венгрии, Великобритании, Швеции, Исландии и других странах с целью создания новых сортов с характеристиками, адаптированными к местным условиям. За последние десятилетия в северной части Европы было выращено более 4500 га. гибридной осины [15]. Ввиду быстрого роста и продуктивности тополя могут быть использованы в народном хозяйстве для различных целей; для разведения в полезащитном лесоразведении в зоне орошаемого земледелия для выращивания строевого леса и древесины промышленного значения, древесины для различных поделок, для озеленения населенных мест.

Китайские ученые, исследовавшие естественные ареалы распространения *Populus Pruinosa Schrenk*, отметили, что повышение температуры может заставить растительность мигрировать в высокоширотные и вы-

сокогорные районы [18]. Побеги, почки и листья тополя является своего рода уникальным источником природных соединений. Они являются неисчерпаемым сырьем для производства биологически активных веществ из-за естественного возобновления. Эфирные масла и флавоноиды приготовленные из почек тополя обладают высокой биологической активностью [6]. В литературе имеются сведения о перспективности использования почек и листьев тополя в качестве источника для получения эффективных антибактериальных и противогрибковых лекарственных средств, белкового и про витаминные концентраты [8].

Южный регион Кыргызстана – Ошская, Джалал-Абадская и Баткенская области – является одним из наиболее благоприятных в природно-климатическом отношении регионов страны для выращивания самых разнообразных форм растений. Здесь теплый климат, обилие рек и водных источников, а также разнообразные ландшафты, такие как долины и предгорья, создают благоприятные условия для произрастания ряда естественных и культурных видов тополя. Влажность почвы и обилие света в южном регионе способствуют интенсивному росту тополей, что делает их ценными деревьями в ландшафтном дизайне, озеленении и хозяйственных целях. Правильное определение видов тополей и изучение их ареала имеют большое практическое значение для развития лесного хозяйства региона, сохранения биоразнообразия и эффективного планирования озеленительных работ.

Наши исследования способствуют достижению следующих Целей устойчивого развития, принятых Организацией Объединенных Наций в 2015 году:

- Цель 11: Устойчивые города и поселения;
- Цель 13: Борьба с изменением климата;
- Цель 15: Сохранение экосистем суши
- Цель 17: Укрепление средств осуществления и активизация работы в рамках Глобального партнерства в интересах устойчивого развития

Целью наших исследований явилось выявление видового состава пространственных представителей рода *Populus* spp. семейства *Salicaceae* Mirb. на территории южного региона Кыргызстана. Определить их закономерности сезонного ритма в условиях города Ош.

Для достижения поставленных целей ставились следующие задачи:

- изучить распространенные виды тополей на Юге Кыргызстана;
- произвести идентификацию видов тополей на Юге Кыргызстана;
- ввести фенологические наблюдения за сезонным развитием тополей в городских условиях.

Материалы и методы

Сбор гербарного материала проводилась во время полевой практики студентов естественно-географического факультета Ошского государственного педагогического университета. Также авторы совершили полевые экспедиции и выявили растения рода *Populus* spp., естественно произрастающие в южных регионах Кыргызстана. Полевой материал был собран в течение 2019-2024 гг. в Ошской и Джалалабадских областей. Для определения видов тополей была использовано дихотомический принцип построения таблиц определителя [3; 4; 7]. Кроме этого была использовано открытый онлайн определитель растений: «Растения мира онлайн. При поддержке Королевских ботанических садов Кью» [20].

Фенологические наблюдения проводились в течение 2019-2024 гг. по общепринятыми фенологическими методами. Фенологические наблюдения продолжались в течение пяти лет, при этом особое внимание уделялось фазам деревьев, таким как бутонизация, цветение, плодоношение и опадение листьев. Фенологические наблюдения проводились в зеленых зонах города Ош.

Результаты и обсуждение

Род *Populus* spp. делится на следующие 6 секций: *Turanga*, *Leucoides*, *Leuce*, *Aigeiros*, *Abaso* и *Tasamahasa*, представленных до 95 видов. В регионах южного Кыргызстана естественно произрастают 5 видов:

1. *Populus pruinosa* Schrenk. (Тополь сизый, или Туранга сизолиственная) - вид лиственных деревьев из рода Тополь (*Populus*) семейства Ивовые (*Salicaceae*), секция *Turanga*. *P. pruinosa* Schrenk. отнесен Международным союзом охраны природы (МСОП) к категории «Близкий к уязвимому» (NT), поскольку он может оказаться под угрозой исчезновения в ближайшем будущем, но в настоящее время не соответствует статусу вида, находящегося под угрозой исчезновения. *P. pruinosa* Schrenk. встречается в предгорных зонах ферганской долины, по речным притокам низовьев рек Нарын и Кара-Дарья. Растет одиночно или очень небольшими группами по галечниковым иногда засоленным местам. Не переносит пересыхания почвы. Цветет в марте-апреле. Плодоносит в июле-августе. Общее распространение: Средняя Азия, Китай, Иран.

2. *Populus talassica* Kom. (Тополь таласский) - вид лиственных деревьев из рода Тополь (*Populus*) семейства Ивовые (*Salicaceae*), секция *Tasamahasa*. Широко распространен в Алайском, Ферганском, Таласском и Чаткальском хребтах. Растет одиночно небольшими рощами по берегам

рек Чаткал, Алабука, Беш-Таш, Көгарт, Гулчө. Цветет в мае. Плодоносит в июне. Общее распространение: Эндемик Средней Азии.

3. *Populus bolleana Lauche*. (Тополь Болле, тополь туркестанский) - вид лиственных деревьев из рода Тополь (*Populus*) семейства Ивовые (*Salicaceae*), секция *Turanga*. Встречается по склонам гор и по долинам южных рек в низовьях рек Кара-Дарьи и Нарына. Широко распространен в орехово-плодовых лесах по равнинам и в предгорьях. Цветет в апрель-мае, плодоносит в июне. Общее распространение: Средняя Азия, Китай, Иран.

4. *Populus usbekistanica Kom.* (Тополь узбекский) - вид лиственных деревьев из рода Тополь (*Populus*) семейства Ивовые (*Salicaceae*), среднеазиатский вид, относящийся к секции *Aigeiros*. Встречается в долинах горных рек и по каменистым склонам на высоте 1200-2500 м н.у.м., по реке Гульча в местностях Сопу-Коргон. На северных склонах Алайского и верховья реки Сох Туркестанского хребтов. Цветет в апреле, плодоносит в мае. Общее распространение: Эндемик Средней Азии.

5. *Populus macrocarpa (Schrenk) Pavlov & Lipsch.* (Тополь крупноплодный) - вид лиственных деревьев из рода Тополь (*Populus*) семейства Ивовые (*Salicaceae*), среднеазиатский вид, относящийся к секции *Tasamahaca*. Встречается по долинам рек и по щебнистым горным склонам Ферганы и Алая. Цветет в апреле, плодоносит в апреле-мае. Общее распространение: Эндемик Средней Азии.

Тополя обладают зимо- и морозостойкостью. Это часто связано с историей развития и формирования видов в соответствующих экологических условиях. О зимостойкости тополей свидетельствует прежде всего обширность их ареала по географическому и вертикальному поясу. Однако не все виды характеризуются большой морозостойкостью слабо она выражена у видов *P. macrocarpa (Schrenk) Pavlov & Lipsch.*, *P. bolleana Lauche.*, *P. usbekistanica Kom.*, у них наблюдаются повреждения частей от поздневесенних или раннее осенних заморозков [9].

Тополя размножаются преимущественно вегетативно. Однако при таком размножении понижается качество древесины, долговечность и устойчивость к вредителям и болезням. В настоящее время ставится вопрос о необходимости семенного размножения с целью биологического обновления. Семена разных видов тополей в природных условиях созревают одновременно. Созревание семян *P. bolleana Lauche.*, *P. usbekistanica Kom.*, *P. pruinosa Schrenk.* происходит в апреле-мае, а у туранговых в июле что совпадает со спадом паводковых вод и тем самым создаются благоприятные условия для их рассеивания и прорастания, то есть для естественного возобновления. Корнеотпры-

сковое размножение наблюдается у видов *P. usbekistanica* Kom., *P. macrocarpa* (Schrenk) Pavlov & Lipsch., *P. bolleana* и др. Приживаемость одревесневших черенков Тополя Болле-65-70%, Узбекстанского -80-85% и Густолиственно-го-95% [9]. Такая высокая приживаемость и легкая укореняемость тополей объясняется их биологическими особенностями, выработанными исторически в условиях обитания средней влажности. Тополя в общем растут быстро выносят небольшое почвенное засоление. Благодаря быстрому росту и продуктивности они широко применяются в практике лесхозов.

В городе Ош тополя выращивали в условиях культуры вели наблюдения над ходом роста цветением и плодоношением. Мы проводили опыты по выращиванию тополей из семян при этом определяли процент всхожести семян длительность их жизнеспособности и влияние на их температурные условия. Было установлено что сеянцы туранговых тополей появляются в основном за счет укоренения проростков во время паводков. Сеянцы из семян появляются только на илистых береговых почвах или же на островных отмелях.

Нами выявлены и изучены сроки цветения и продолжительность его время созревания плодов. В результате было установлено несоответствие сроков цветения у различных видов. Эти данные могут быть положены в основу разработки методов проведения гибридизационной работы между перспективными видами в частности между видами секции - туранга белых и черных тополей. Изучено вегетативное размножение и условия, способствующие ему. Выявлены причины стерильности раннее старение растений. В результате опытов мы пришли к выводу, что тополя быстро стареют и подвергаются заболеванию в виду того, что они в основном размножаются черенками и корневыми отпрысками. В связи с этим создание коллекция тычиночных поколением крайне необходимо. При семенном обновлении увеличивается долговечность дерева растут быстрее и становятся устойчивыми к заражению вредителями улучшается качество древесины.

Особенно интересны виды туранговых тополей которые пригодны для озеленения засоленных земель. Они в достаточной степени солевыносливы и хорошо растут на этих почвах. Кроме того, нужно отметить что виды солевыносливой туранговые тополя высоко ценятся для гибридизационной работы в целях создания быстрорастущих солевыносливых гибридных форм тополей [15].

Фенологические исследования являются важным инструментом оценки адаптации древесных пород к городским условиям. Тополя (*Populus* spp.) широко используются в озеленении городов благодаря их быстрому росту, устойчивости к загрязнению и способности к поглощению углекис-

лого газа. Однако условия городской среды могут влиять на их развитие, изменяя продолжительность и сроки наступления фенологических фаз. Наступления фенологических фаз связаны с метеорологическими условиями. Метеоусловия г. Ош представлены на рисунке 1 в виде графиков.

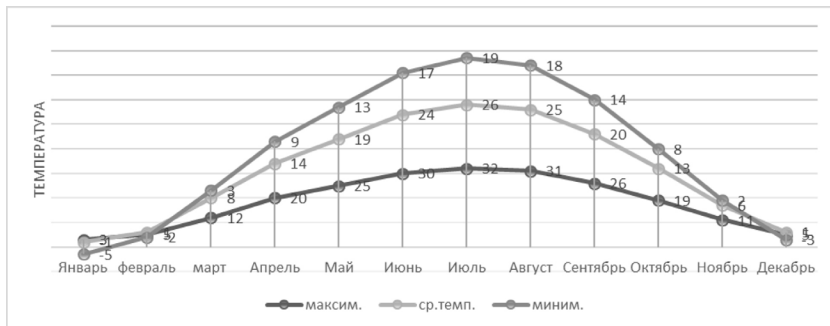


Рис. 1. Распределение максимальной, средней и минимальной температуры г. Ош в течение года.

Fig. 1. Distribution of maximum, average, and minimum temperatures in Osh throughout the year.

Климат города жаркий и сухой летом и холодный зимой. Температура воздуха обычно колеблется от -5°C до 32°C в течение всего года. Иногда она бывает ниже -11°C или выше 35°C . Города и связанные с ними городские тепловые острова являются идеальными естественными лабораториями для оценки реакции фенологии растений на условия потепления [1].

Изучая влияние городов на фенологию растений, была обнаружено значительное продвижение в фенологических фазах развития листьев, цветения и плодоношения при более высокой степени урбанизации, тогда как для фенологических фаз старения листьев наблюдалась значительная задержка. Фенологическим изменениям наблюдалось повышение температуры воздуха при более высокой степени урбанизации. Это повышение было наибольшим в периоды развития листьев, цветения и плодоношения и наименьшим в период старения листьев [14].

Фенология растительности изучает этапы жизненного цикла растений и их адаптацию к климатическим изменениям, что делает ее одним из самых интуитивно понятных и чувствительных биологических показателей климатических изменений. Фенологические сдвиги, изменения в сроках периодических событий жизненного цикла, стали одним из самых ярких проявлений и ценным биоиндикатором потепления климата. Фенология в основном обусловлена температурой, поскольку она не только может вы-

ступать в качестве ограничивающего фактора, как и другие экологические факторы, но и влияет на основные биохимические процессы. Повышение температуры приводит к ускорению вегетации городской растительности.

Анализируя архивные данные о климатических показателях, мы видим, что средняя температура в г. Ош за последние 100 лет выросла на 0,7 градуса (рис. 2). В городе бывают годы, когда вегетационный период длится до 8 месяцев (235-240 дней), вегетационный период начинается календарно, с началом месяца март и заканчивается в конце ноября [1].

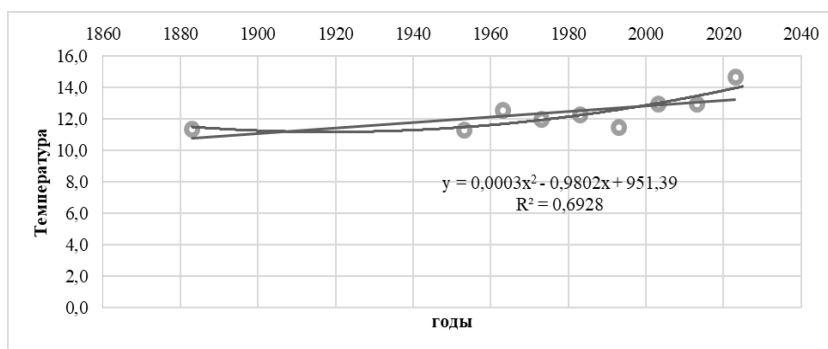


Рис. 1. Повышение средней температуры в городе Ош за последние 100 лет

Fig. 2. Rise in the average temperature in the city of Osh over the past 100 years

Поскольку наша планета однозначно нагревается и будет продолжать нагреваться, понимание и прогнозирование того, как фенология реагирует на повышение температуры, имеет решающее значение для будущих путей структуры экосистемы и функционирования.

Таблица 1.

Фенофазы деревьев рода *Populus* в г. Ош

Table 1. Phenological phases of *Populus* trees in Osh

№	Виды	Вегетационный период		Распускание листьев		Цветение		Созревание		листопад	
		начало	конец	начало	конец	начало	конец	начало	конец	начало	конец
1	<i>P. pruinosa</i> Schrenk.	20-25/02	15-20/11	22-27/02	27/02-10/03	27/02-4/03	8-16/03	25/07	10/08	6/10	17/11
2	<i>P. bolleana</i> Lauche.	19-23/02	13-19/11	13-22/02	25/02, 08/03	29/02, 02/03	10-12/03	15/06	25/06	8/10	13/11
3	<i>P. macrocarpa</i>	15-24/02	8-11/11	18-26/03	22-30/03	20-28/03	26/03-01/04	22-30/03	26-03/04	01/10	12/11
4	<i>P. usbekistanica</i> Kom.	29/03 – 06/04	10-14/11	3-9/04	9-15/04	5-13/04	10-18/04	7-16/04	10-20/04	13/10	10/11

Анализ полученных данных показывает, полученной в результате собственных исследований, можно отметить, что период вегетации исследуемых видов начинается в конце февраля и в начале марта. Набухание почек, начинается наступлении дневной $+12^{\circ}\text{C}$ и ночной $+3^{\circ}\text{C}$ положительной температур.

P. pruinosa Schrenk. и *P. bolleana* Lauche зацветает в начале марта, одновременно с распусканием листьев. Цветет с 4 по 10 апреля течение 6-7 дней. Плоды созревают в конце июля.

P. usbekistanica Kom. по сравнению другими видами тополей вегетация начинается поздно, но заканчивает одинаково. Цветение начинается первой декаде апреля.

Заключение

- По южному региону Кыргызстана было идентифицировано 5 видов тополей, которых, естественными ареалами является Туркестано-Алайский, Фергано-Алайский, Фергано-Чаткальский и Чаткальские лесорастительные районы.

- Результаты проведенных опытов показывают, что, тополя быстро стареют и подвергаются заболеванию в виду того, что они в основном размножаются черенками и корневыми отпрысками. В связи с этим создание коллекция тычиночных поколением крайне необходимо. При семенном обновлении увеличивается долговечность деревья растут быстрее и становятся устойчивыми к заражению вредителями улучшается качество древесины.

- Виды тополей туранговых секции пригодны для озеленения засоленных земель. Они в достаточной степени солевыносливы и хорошо растут на этих почвах. Кроме того, нужно отметить что виды солевыносливой туранговых тополя высоко ценятся для гибридизационной работы в целях создания быстрорастущих солевыносливых гибридных форм тополей.

- Фенология растительности очень чувствительна к изменению климата в крайне городских условиях, таким образом, является наилучшим индикатором изменения климата, а также важным индикатором функционирования городской экосистемы. Основные фенологические фазы тополей в Оше: Пробуждение почек – конец февраля – начало марта (из-за теплого климата). Распускание листьев – середина–конец марта. Цветение (серёжки) – март–апрель: Мужские особи – выделяют пыльцу. Женские – образуют семена (позже пух). Образование и разлёт пуха – май–июнь (если есть женские деревья). Активный рост листвы – апрель–сентябрь.

Пожелтение листьев – октябрь–ноябрь. Листопад – ноябрь (может затянуться до декабря в тёплые годы). Особенности в городе Ош: Раннее начало вегетации из-за мягких зим и быстрого прогрева воздуха. Жаркое лето может ускорять некоторые фазы (например, ранний листопад при засухе).

Информация о конфликте интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Информация о спонсорстве. Научное исследование проведено при поддержке научного гранта Министерства образования и науки Кыргызской Республики (грант МОиН КР №240013).

Список литературы

1. Абсатаров, Р. Р., Жусупали Уулу, Т., & Мамасадык Уулу, А. (2024). Фенофазы видов рода *Salix* в условиях города Ош. *Бюллетень науки и практики*, 10(11), 51–57. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/06>. EDN: <https://elibrary.ru/MQGYAW>
2. Богданов, П. Л. (1965). *Тополь и их культура*. Россия, Москва.
3. Булыгин, Н. Е. (1979). *Фенологические наблюдения над древесными растениями: пособие по проведению учебно-научных исследований*. Л.: ЛТА.
4. Елагин, И. Н., & Лобанов, А. И. (1979). *Атлас-определитель фенологических фаз растений*. Москва: Наука.
5. Комаров, В. А. (1934). Тополь СССР. *Ботанический журнал СССР*, 19(5), 220–250.
6. Мамаева, О. О., & Исаева, Е. В. (2022). Утилизация листьев тополя (*Populus balsamifera* L.) методом биоконверсии. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*, 15(1), 102–109. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0275>. EDN: <https://elibrary.ru/ERMRC5>
7. *Определитель растений Средней Азии*. (1968–1993). (Тт. 1–10). Ташкент: Издательство Фан.
8. Поляков, В. В., & Адекенов, С. М. (1999). *Биологически активные соединения растений Populus L. и препараты на их основе*. Алматы: Гылым.
9. Усманов, А. У. (1966). *Дикие и культурные тополи Средней Азии* (Автореф. докт. биол. наук). Ташкент. EDN: <https://elibrary.ru/ZMDKWR>
10. Absatarov, R., Mamasadyk Uulu, A., & Samieva, J. (2024). Main representatives of the natural origin of the Genus *Salix* L. in the southern regions of Kyrgyzstan. *E3S Web of Conferences*, 537, 05005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453705005>. EDN: <https://elibrary.ru/STIDX1>

11. Dickmann, D. I., & Kuzovkina, J. (2008). *Poplars and willows in the world*, Chapter 2. Poplars and willows of the world, with emphasis on silviculturally important species. International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment.
12. Dimeyeva, L., Islamgulova, A., Permitina, V., Ussen, K., Kerdyashkin, A., Tsychu-yeva, N., Salmukhanbetova, Z., Kurmantayeva, A., Iskakov, R., Imanalinova, A., & Kaliyev, B. (2023). Plant Diversity and Distribution Patterns of *Populus pruinosa* Schrenk (Salicaceae) Floodplain Forests in Kazakhstan. *Diversity*, 15(7), 797. <https://doi.org/10.3390/d15070797>. EDN: <https://elibrary.ru/HXZWKD>
13. Liu, X., Wang, Z., Wang, W., Huang, Q., Zeng, Y., Jin, Y., Li, H., Du, S., & Zhang, J. (2022). Origin and evolutionary history of *Populus* (Salicaceae): Further insights based on divergence time and biogeographic analyses. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1031087. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1031087>. EDN: <https://elibrary.ru/SVRUXI>
14. Meng, L., Mao, J., Zhou, Y., Richardson, A. D., Lee, X., Thornton, P. E., & Jia, G. (2020). Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(8), 4228–4233. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911171117>. EDN: <https://elibrary.ru/ZYGORL>
15. Tullus, A., Rytter, L., Tullus, T., Tullus, H., Weih, M., & Tullus, H. (2012). Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L., *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(1), 10–29. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628949>. EDN: <https://elibrary.ru/PLFDUF>
16. Turdiyev, T., Kovalchuk, I., Madenova, A., & others. (2025). Restoring populations of *Populus pruinosa* Schrenk through biotechnology. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 61(2), 207–218. <https://doi.org/10.1007/s11627-024-10490-5>. EDN: <https://elibrary.ru/OSTZXE>
17. Vesselova, P., Makhmudova, K., Kudabayeva, G., Osmonali, B., & Mikhalev, V. (2022). Current Growth Conditions of *Populus Diversifolia* Schrenk and *Populus Pruinosa* Schrenk in the Syr-Darya Valley. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 22(4), 425–438. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2022.425.438>. EDN: <https://elibrary.ru/TSSVQM>
18. Wang, Z. J., Gai, Z. S., Yang, T. G., Zhai, J. T., Wu, Z. H., Guo, X. F., & Li, Z. J. (2023). Prediction of the distribution area and environmental variables of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* in China based on the optimized MaxEnt model. *Applied Ecology & Environmental Research*, 21(4), Article 13003. https://doi.org/10.15666/aeer/2104_13003. EDN: <https://elibrary.ru/WCBSKR>
19. Wohlfahrt, G., Tomelleri, E., & Hammerle, A. (2019). The urban imprint on plant phenology. *Nature Ecology & Evolution*, 3(12), 1668–1674. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1007-1>. EDN: <https://elibrary.ru/JDLXTQ>

20. World Checklist of Vascular Plants (WCVP). (2024). Royal Botanic Gardens, Kew. Retrieved May 21, 2024, from <http://sftp.kew.org/pub/data-repositories/WCVP>

References

1. Absatarov, R. R., Zhusupali Uulu, T., & Mamasadyk Uulu, A. (2024). Phenophases of species of the genus *Salix* in the conditions of the city of Osh. *Bulletin of Science and Practice*, 10(11), 51–57. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/06>. EDN: <https://elibrary.ru/MQGYAW>
2. Bogdanov, P. L. (1965). *Poplars and their cultivation*. Moscow, Russia.
3. Bulygin, N. E. (1979). *Phenological observations of woody plants: A guide for conducting educational and scientific research*. Leningrad: LTA.
4. Elagin, I. N., & Lobanov, A. I. (1979). *Atlas-guide for identifying phenological phases of plants*. Moscow: Nauka.
5. Komarov, V. A. (1934). Poplars of the USSR. *Botanical Journal of the USSR*, 19(5), 220–250.
6. Mamaeva, O. O., & Isaeva, E. V. (2022). Utilization of poplar leaves (*Populus balsamifera* L.) by bioconversion. *Journal of Siberian Federal University. Series: Chemistry*, 15(1), 102–109. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0275>. EDN: <https://elibrary.ru/ERMRC5>
7. *Key to plants of Central Asia*. (1968–1993). (Vols. 1–10). Tashkent: Fan.
8. Polyakov, V. V., & Adekenov, S. M. (1999). *Biologically active compounds of Populus L. plants and preparations based on them*. Almaty: Gylm.
9. Usmanov, A. U. (1966). *Wild and cultivated poplars of Central Asia* (Abstract of doctoral dissertation, biological sciences). Tashkent. EDN: <https://elibrary.ru/ZMDKWR>
10. Absatarov, R., Mamasadyk Uulu, A., & Samieva, J. (2024). Main representatives of the natural origin of the Genus *Salix* L. in the southern regions of Kyrgyzstan. *E3S Web of Conferences*, 537, 05005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453705005>. EDN: <https://elibrary.ru/STIDXI>
11. Dickmann, D. I., & Kuzovkina, J. (2008). *Poplars and willows in the world*, Chapter 2. Poplars and willows of the world, with emphasis on silviculturally important species. International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment.
12. Dimeyeva, L., Islamgulova, A., Permitina, V., Ussen, K., Kerdyashkin, A., Tsychu-yeva, N., Salmukhanbetova, Z., Kurmantayeva, A., Iskakov, R., Imanalinova, A., & Kaliyev, B. (2023). Plant Diversity and Distribution Patterns of *Populus pruinos-a* Schrenk (Salicaceae) Floodplain Forests in Kazakhstan. *Diversity*, 15(7), 797. <https://doi.org/10.3390/d15070797>. EDN: <https://elibrary.ru/HXZWKD>
13. Liu, X., Wang, Z., Wang, W., Huang, Q., Zeng, Y., Jin, Y., Li, H., Du, S., & Zhang, J. (2022). Origin and evolutionary history of *Populus* (Salicaceae): Further insights

- based on divergence time and biogeographic analyses. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1031087. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1031087>. EDN: <https://elibrary.ru/SVRUXI>
14. Meng, L., Mao, J., Zhou, Y., Richardson, A. D., Lee, X., Thornton, P. E., & Jia, G. (2020). Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(8), 4228–4233. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911171117>. EDN: <https://elibrary.ru/ZYGORL>
 15. Tullus, A., Rytter, L., Tullus, T., Tullus, H., Weih, M., & Tullus, H. (2012). Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L., *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(1), 10–29. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628949>. EDN: <https://elibrary.ru/PLFDUF>
 16. Turdiyev, T., Kovalchuk, I., Madenova, A., & others. (2025). Restoring populations of *Populus pruinosa* Schrenk through biotechnology. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 61(2), 207–218. <https://doi.org/10.1007/s11627-024-10490-5>. EDN: <https://elibrary.ru/OSTZXE>
 17. Vesselova, P., Makhmudova, K., Kudabayeva, G., Osmonali, B., & Mikhalev, V. (2022). Current Growth Conditions of *Populus Diversifolia* Schrenk and *Populus Pruinosa* Schrenk in the Syr-Darya Valley. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 22(4), 425–438. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2022.425.438>. EDN: <https://elibrary.ru/TSSVQM>
 18. Wang, Z. J., Gai, Z. S., Yang, T. G., Zhai, J. T., Wu, Z. H., Guo, X. F., & Li, Z. J. (2023). Prediction of the distribution area and environmental variables of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* in China based on the optimized MaxEnt model. *Applied Ecology & Environmental Research*, 21(4), Article 13003. https://doi.org/10.15666/aeer/2104_13003. EDN: <https://elibrary.ru/WCBSKR>
 19. Wohlfahrt, G., Tomelleri, E., & Hammerle, A. (2019). The urban imprint on plant phenology. *Nature Ecology & Evolution*, 3(12), 1668–1674. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1007-1>. EDN: <https://elibrary.ru/JDLXTQ>
 20. World Checklist of Vascular Plants (WCVP). (2024). Royal Botanic Gardens, Kew. Retrieved May 21, 2024, from <http://sftp.kew.org/pub/data-repositories/WCVP>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Абсатаров Равшанбек Ракманалиевич, кандидат биологических наук, доцент, проректор по науке
Ошский государственный педагогический университет имени А. Мырсабекова
ул. Исанова, 73, г. Ош, 723500, Кыргызская Республика
rrr_51@mail.ru

Шамшиев Бакытбек Нуркамбарович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры экологии и охраны окружающей среды
Ошский технологический университет имени М. Адышева
ул. Исанова, 81, г. Ош, 723500, Кыргызская Республика
shamshiev@list.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ravshanbek R. Absatarov, PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Science
Osh State Pedagogical University named after A. Myrsabekov
73, Isanova Str., Osh, 723500, Kyrgyz Republic
rrr_51@mail.ru
SPIN-code: 5968-7553
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3894-9468>
Scopus Author ID: 59189194300
Academia.edu: <https://independent.academia.edu/РавшанбекАбсатаров>

Bakytbek N. Shamshiev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection
Osh Technological University named after M. Adyshev
81, Isanova Str., Osh, 723500, Kyrgyz Republic
shamshiev@list.ru
SPIN-code: 7082-3525
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8648-4446>

Поступила 12.09.2025

После рецензирования 25.12.2025

Принята 14.01.2026

Received 12.09.2025

Revised 25.12.2025

Accepted 14.01.2026

**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: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1523](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1523)

EDN: YOFTVC

УДК 630



**Исследования состояния вырубок
в Могочинском лесничестве Забайкальского края**

**А.В. Шемякина, Д.А. Голубев, Д.В. Павлов,
К.Е. Гула, Н.А. Каюмов**

*Федеральное бюджетное учреждение
«Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»,
Хабаровск, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Представлены материалы исследований по естественному возобновлению леса на сплошных вырубках в условиях многолетней мерзлоты в Забайкальском крае. Исследование актуально в связи с распространением негативного влияния лесохозяйственной деятельности на мерзлотных почвах.

Цель. Оценка естественного лесовозобновления древесных пород после сплошной вырубки в Могочинском лесничестве Забайкальского края.

Материалы и методы. Исследования по естественному лесовосстановлению и повреждению напочвенного покрова проводились в Могочинском лесничестве Забайкальского края. Обследованы сплошнолесосечные вырубки в березовых и лиственничных насаждениях. Подсчет подроста проводили на учетных площадках площадью 2×2 м в соответствии с общепринятой классификацией деления подроста по высоте на три категории крупности. Всего на каждой лесосеке закладывалось по 25 пробных площадок.

Результаты. В ходе исследований обследованы вырубки разной давности в Давендинском и Могочинском участковых лесничествах Могочинского лесничества Забайкальского края. На обследованных лесосеках преобладает смешанный лиственно-хвойный подрост. Лиственные породы береза (*Betula L.*), ива (*Salix L.*),

осина (*Populus L.*), ольха (*Alnus Hill.*), в основном, появились после рубки. Лиственница (*Larix Mill.*) представлена сохраненным подростом и подростом, появившимся после рубки.

Заключение. На большинстве обследованных участках сплошнолесосечных рубок было отмечено хорошее естественное возобновление и формирование молодого поколения леса, кроме участков, захламленных брошенной древесиной и крупными порубочными остатками. Для минимизации термокарстовых явлений при проведении рубок в мерзлотных лесных районах необходимо максимальное сохранение живого напочвенного покрова, лесной подстилки, курстарничкового яруса, которые выполняют роль термоизолятора и препятствуют оттаиванию глубоких слоев почвы.

Ключевые слова: Забайкальский край; естественное лесовосстановление; вырубка; подрост; оценка

Для цитирования. Шемякина, А. В., Голубев, Д. А., Павлов, Д. В., Гула, К. Е., & Каюмов, Н. А. (2026). Исследования состояния вырубок в Могочинском лесничестве Забайкальского края. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 484–502. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1523>

Studies of the state of logging in the Mogochinsky forestry of the Trans-Baikal Territory

A.V. Shemyakina, D.A. Golubev, D.V. Pavlov,
K.E. Gula, N.A. Kayumov

Far East Forestry Research Institute, Khabarovsk, Russian Federation

Abstract

Background. Research materials on the natural regeneration of forests in continuous deforestation under permafrost conditions in the Trans-Baikal Territory are presented. The study is relevant due to the spread of the negative impact of forestry activities on permafrost soils.

Purpose. Assessment of natural reforestation of tree species after continuous logging in the Mogochinsky forestry of the Trans-Baikal Territory.

Materials and methods. Studies on natural reforestation and damage to the ground cover were conducted in the Mogochinsky forestry Department of the Trans-Baikal Territory. Continuous-cutting cuttings in birch and larch plantations were examined. The undergrowth was counted on accounting sites with an area of 2x2 m in accordance with the generally accepted classification of the division of undergrowth in height into three categories of size. In total, 25 test sites were laid on each cutting area.

Results. In the course of the research, logging of various ages in the Davdinsky and Mogochinsky district forestry districts of the Mogochinsky forestry District of the Trans-Baikal Territory was examined. The surveyed cutting areas are dominated by mixed deciduous and coniferous undergrowth. Hardwoods *Betula L.*, *Salix L.*, *Populus L.*, *Alnus Hill.*, mostly appeared after logging. The *Larix Mill.* is represented by a preserved juvenile and a juvenile that appeared after logging.

Conclusion. In most of the surveyed areas of continuous logging, good natural regeneration and the formation of a younger generation of forests were noted, except for areas littered with abandoned timber and large felling residues. To minimize thermokarst phenomena during logging in permafrost forest areas, it is necessary to maximize the preservation of living ground cover, forest litter, and shrub layer, which act as a thermal insulator and prevent thawing of deep soil layers.

Keywords: Zabaykalsky Krai; natural reforestation; deforestation; undergrowth; assessment

For citation. Shemyakina, A. V., Golubev, D. A., Pavlov, D. V., Gula, K. E., & Kayumov, N. A. (2026). Studies of the state of logging in the Mogochinsky forestry of the Trans-Baikal Territory. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 484–502. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1523>

Введение

Лесные насаждения мерзлотно-таежных лесных районах в условиях многолетней мерзлоты играют огромную роль в защите и сохранении мерзлоты. В ходе освоения заготовки древесины происходит нарушение хода естественных процессов в природных показателях лесов многолетней мерзлоты. С ходом лесозаготовок повышается температура воздуха и почвы, увеличивается их влажность, и как следствие, начинают таять подземные льды – происходит развитие карстового процесса. Данный процесс способствует развитию водной и ветровой эрозии почв, ведет к полному (частичному) минеральному и органическому истощению [10].

При заготовке древесины в зимний период лесная техника в районах Крайнего Севера работать не может из-за экстремально низких температур, которые не выдерживают металл и гидравлики машин [2]. Поэтому период устойчивого проведения лесосечных работ и вывозки заготовленной древесины сравнительно невелик. Переходы температуры окружающего воздуха от отрицательных к положительным значениям, характерные для резко континентального климата останавливают лесозаготовительный процесс на большей части лесосек из-за оттаивания мерзлых почвогрунтов [1].

М.Е. Рудов, О.А. Куницкая и др. (2020) отмечают, что в процессе эксплуатации трелевочных систем необходимо считаться с тем, что мерзлый почвогрунт представляет из себя сложную многокомпонентную среду [19].

Рядом авторов (С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев и др. (2019) - участников научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Якутской государственной сельскохозяйственной академии в ходе исследований установлено, что на определенных глубинах при условии податливости формируется первичное ядро уплотнения почвогрунта. В случае, если компоненты поля напряжений на больших глубинах обеспечивают выполнение принятых критериев разрушения мерзлого почвогрунта, то ядро уплотнения будет перемещаться вниз и под действием трелевочной системы, почвогрунт получит дополнительное уплотнение [11; 21]. Процесс погружения ядра уплотнения сопровождается понижением температуры, что в свою очередь обуславливает рост прочности и модуля упругости. Переуплотнение лесных почвогрунтов приводит к негативным последствиям, а именно - в угнетении корневой системы оставляемых на доращивание деревьев при выборочных рубках, существенному снижению скорости последующего лесовосстановления [3; 7].

Мнения по вопросам лесохозяйственной деятельности в мерзлотных районах разделились. Одни исследователи отмечают негативное воздействие технологических факторов на процессы естественного восстановления, другие – благоприятное [4-6; 9; 12-18; 20; 22]. Поскольку на последствия рубок влияют множество факторов, то и не существует универсального подхода к организации заготовки древесины в северных лесах [15].

Цель исследования – оценка естественного лесовозобновления древесных пород после сплошной вырубki в Могочинском лесничестве Забайкальского края.

Материалы и методы

Работы по оценке и состоянию естественного возобновления на вырубках проведены в 2025 г. в Давендинском (кварталы 315 (выдел 36) и 141 (выдел 21)) и Могочинском (кварталы 147 (выделы 9, 11, 12, 19) и 516 (выдел 40) участковых лесничествах Могочинского лесничества Забайкальского края.

ПП-1. Обследованы участки № 1.1 и № 1.2. Могочинское лесничество, Давендинское участковое лесничество Забайкальского края, квартал 315, выдел 36. Сплошная рубка 2019 г. Площадь участка – 6,6 га. Состав насаждений – 7Б2Ос1Л. Общий запас – 501 м³. Бонитет – IV. Полнота – 0,3. Механизированные рубки и минерализация не проводились. Основные лесосечные работы проводились в зимнее время с применением ручного труда – бензопил.

ПП-2. Обследованы участки № 2.1 и № 2.2. Могочинское лесничество, Давендинское участковое лесничество Забайкальского края, квартал 141, выдел 21. Сплошная рубка 2019 г. Площадь участка – 14,4 га. Состав насаждений – 4Б4Ос2Л. Общий запас – 1365 м³. Бонитет – IV. Полнота – 0,5. Механизированные рубки и минерализация не проводились. Основные лесосечные работы проводились в зимнее время с применением ручного труда – бензопил.

Таблица 1.

Характеристика лесных участков**Table 1. Characteristics of Forest Plots**

№ пробной площади	Участковое лесничество, квартал, выдел	Площадь лесосеки, га	Год рубки	Характеристика древостоя до рубки		
				состав	запас, м ³ /га	полнота
ПП 1.1; ПП 1.2	Давендинское, кв. 315, выд. 36	6,6	2019	7Б2Ос1Л	76	0,3
ПП 2.1; ПП 2.2	Давендинское, кв. 141, выд. 21	14,4	2019	4Б4Ос2Л	95	0,5
ПП 3.1; ПП 3.2	Могочинское, кв. 147, выд. 9, 11, 12, 19	6,32	2019	7ЛЗБб	51	0,6
ПП 4.1; ПП 4.2	Могочинское, кв. 516, выд. 40	12,6	2020	8Л2Бб+С	41	0,4

ПП-3. Обследованы участки № 3.1 и № 3.2. Могочинское участковое лесничество, Могочинское участковое лесничество Забайкальского края, квартал 147, выдела 9, 11, 12, 19). Сплошная рубка 2019 г. Площадь участка – 6,32 га. Состав насаждений – 7ЛЗБ. Общий запас – 298 м³. Бонитет – IV. Полнота – 0.6. Механизированные рубки не проводились. Основные лесосечные работы проводились в зимнее время с применением ручного труда – бензопил. Минерализация проводилась.

ПП-4. Обследованы участки № 4.1 и № 4.2. Могочинское лесничество, Могочинское участковое лесничество Забайкальского края, квартал 516, выдел 40. Сплошная рубка 2020 г. Площадь участка – 12,6 га. Состав насаждений – 8Л2Б+С. Общий запас – 520 м³. Бонитет – IV. Полнота – 0,4. Механизированные рубки и минерализация не проводились. Основные лесосечные работы проводились в зимнее время с применением ручного труда – бензопил.

Сплошнолесосечные рубки проводились в березовых и лиственничных насаждениях с применением бензомоторных пил при валке деревьев и тракторов с чокерной оснасткой при трелевке древесины. Заготовка древесины проводилась в зимнее время (табл. 1).

Результаты

Могочинское лесничество организовано в границах бывшего Могочинского и Тунгиро-Олёкминского лесхозов. Расположено в северо-восточной части Забайкальского края на территории муниципальных образований «Могочинский район» и «Тунгиро-Олёкминский район». Относится к Забайкальскому горно-мерзлотному лесному району. Общая площадь – 6730,04 тыс. га [8].

На обследованных лесосеках преобладает смешанный лиственно-хвойный подрост. Лиственные породы береза белая (*Betula* L.), ива (*Salix* L.), осина (*Populus* L.), ольха (*Alnus* Hill.), в основном, появились после рубки. Лиственница (*Larix* Mill.) представлена сохранным подростом и подростом, появившимся после рубки.

На участке № 1.1 в составе жизнеспособного подроста доминирует ива 6,7 тыс. шт./га. лиственницы – 4 тыс. шт./га, что достаточно для формирования лиственничного древостоя (рис. 1-2).

На лесосеках преобладает средний подрост – 6,2 шт./га. Встречаемость подроста лиственницы – 16 %; березы – 12 %; ивы – 64 %. На исследованном участке № 1.1 после рубки 2019 года сохранился густой мелкий подрост лиственницы (9,2 тыс. шт./га), березы (1,3 тыс. шт./га) и ивы (9,2 тыс. шт./га).

На участке № 1.2 после сплошной рубки 2019 года появился жизнеспособный мелкий подрост лиственницы в количестве 3,8 тыс. шт./га. Встречаемость подроста лиственницы – 28 %; березы – 16 %; ивы – 36 %. На участках № 1.1 и 1.2 на долю жизнеспособного подроста приходится 50 % и соответственно 82,3 % (участок № 1.2) от общего количества подроста.



Рис. 1. Вырубка 2019 года.

Количество подроста 20,1 тыс. шт./га, состав 7Ив2Л1Бб. (Участок № 1.1)

Fig. 1. 2019 harvest. Number of young trees: 20,100 per hectare; composition: 7Iv2L1Bb. (Plot No. 1.1)



Рис. 2. Естественное

лесовосстановление на сплошной вырубке 2019 года. Количество подроста 10,2 тыс. шт./га, состав 5Ив4Л1Бб (Участок № 1.2.)

Fig. 2. Natural reforestation on a clear-cut area from 2019. Number of saplings: 10,200 per hectare; species composition: 5Iv4L1Bb (Plot No. 1.2.)

На участке № 2.1 после рубки 2019 года доминирует крупный жизнеспособный подрост: береза – 5,9 тыс. шт./га; ольха – 1,4 тыс. шт./га. Встречаемость подроста березы 36 %; ольхи – 16 % (рис. 3). На участке № 2.2. формируется смешанный молодняк, доминирует береза. Доля здорового подроста 97 % от общего количества подроста. Подрост березы представлен крупными экземплярами в количестве 1,8 тыс. шт./га; ольхи – 1,2 тыс. шт./га. Встречаемость подроста неравномерная (береза – 16 %; ольха – 16 %) (рис. 4).



Рис. 3. Вырубка 2019 года с

сохранным подростом 8,0 тыс. шт./га, состав 8Бб2Ол. (Участок № 2.1)

Fig. 3. 2019 harvest with retained young growth of 8,000 trees/ha, composition 8Bb2Ol. (Plot No. 2.1)



Рис. 4. Подрост, сформированный

после сплошной вырубке 2019 года, 3,6 тыс. шт./га, состав 6Бб4Ол. (Участок № 2.2)

Fig. 4. Young stand formed after the 2019 clear-cut, 3,600 trees/ha, composition 6Bb4Ol. (Plot No. 2.2)

На участке П.П 3.1 в Могочинском участковом лесничестве после рубки 2018 года преобладает средней крупности подрост березы и лиственницы в количестве: береза – 1,9 тыс. шт./га; ива – 0,2 тыс. шт./га; лиственница – 1,3 тыс. шт./га; осина – 0,4 тыс. шт./га; ольха – 0,2 тыс. шт./га. Формируется смешанный лиственничный молодняк. Подрост лиственницы равномерно представлен мелкими и средними экземплярами. Встречаемость подроста березы – 68 %; лиственницы 56 % (рис. 5, табл. 2). На участке № 3.2 появился жизнеспособный мелкий подрост лиственницы в количестве 1,1 тыс. шт./га; березы – 1,3 тыс. шт./га; осины – 0,2 тыс. шт./га. Весь подрост жизнеспособный. Преобладает средней крупности подрост (7,0 тыс. шт./га). Встречаемость равномерная у лиственницы – 60 %; березы – 64% (рис. 6).



Рис. 5. Сплошная вырубка 2019 года. Количество подроста 8,7 тыс. шт./га, состав 4Бб3Л1Ив1Ос1Ол. (Участок № 3.1)

Fig. 5. Clear-cut in 2019. Number of young trees: 8,700 per hectare. Composition: 4Bb3L1Iv1Os1Ol. (Plot No. 3.1)



Рис. 6. Вырубка 2019 года, подрост 10,1 тыс. шт./га, состав 4Бб4Л1Ив1Ос. (Участок № 3.2)

Fig. 6. 2019 harvest, young stand: 10,100 trees/ha, composition: 4Bb4L1Iv1Os. (Plot No. 3.2)

На участке № 4.1 в составе подроста встречается лиственница (1,2 тыс. шт./га); береза (14,2 тыс. шт./га); ольха (2,8 тыс. шт./га). Подрост лиственницы представлен преимущественно мелкой крупности экземплярами в количестве 0,9 тыс. шт./га. Подрост распределен равномерно по категориям крупности: средний – 4,8 тыс. шт./га; крупный – 4,5 тыс. шт./га. Встречаемость березы – 96 %; лиственницы – 32 %. На долю жизнеспособного подроста приходится 99,4 % от общего числа всего подроста на участке.

На участке № 4.2 преобладает крупный подрост в количестве 8,6 тыс. шт./га. Встречаемость подроста сосны – 12 %; березы – 68 %; ольхи – 20 %; осины – 44 %; лиственницы – 12 %. Подрост сосны (*Pinus* L.) мелкий – 0,5 тыс. шт./га; лиственницы – 0,4 тыс. шт./га. Доля жизнеспособного подро-

ста составляет 97,2 % от общего количества учетного подроста (табл. 3). На всех рассматриваемых лесных участках преобладает здоровый подрост – от 80 до 98 %, кроме пробной площадки № 1.1, где количество жизнеспособного подроста составляло 49 %.

Таблица 2.

Характеристика естественного лесовосстановления на вырубках пробных площадей ПП-1 (№ 1.1 и № 1.2) и ПП-2 (№ 2.1 и № 2.2) в Могочинском лесничестве Забайкальского края

Table 2. Characteristics of Natural Regrowth on the Cleared Areas of Test Plots PP-1 (Nos. 1.1 and 1.2) and PP-2 (Nos. 2.1 and 2.2) in the Mogochinsky Forest District of the Trans-Baikal Region

ПП (год рубки)	Порода	Состав, %	Встречаемость, %	Количество подроста	Распределение по состоянию, шт./га			Распределение по категориям крупности, шт./ га								
					Жизнеспособный	Сомнительный	Нежизнеспособный	Жизнеспособный			Сомнительный			Нежизнеспособный		
								Мелкий, менее 0,5 м	Средний 0,6-1,5 м	Крупный, свыше 1,5 м	Мелкий, менее 0,5 м	Средний 0,6-1,5 м	Крупный, свыше 1,5 м	Мелкий, менее 0,5 м	Средний 0,6-1,5 м	Крупный, свыше 1,5 м
ПП-1 №1.1 (2019)	Береза	6	12	1300	800	200	300	500	300	0	0	0	200	0	0	300
	Ива	48	64	9600	6700	500	2400	300	5700	700	0	100	400	0	0	2400
	Лиственница	46	16	9200	2500	3800	2900	1100	200	1200	0	200	3600	0	1100	1800
	Итого	100	-	20100	10000	4500	5600	1900	6200	1900	0	300	4200	0	1100	4500
ПП-1 №1.2 (2019)	Лиственница	41	28	4200	4000	200	0	3800	200	0	200	0	0	0	0	0
	Ива	35	36	3600	2600	1000	0	0	1000	1600	200	800	0	0	0	0
	Береза	24	16	2400	1800	0	600	200	1500	100	0	0	0	0	0	600
	Итого	100	-	10200	8400	1200	600	4000	2700	1700	400	800	0	0	0	600
ПП-2 № 2.1 (2019)	Береза	80	36	6400	6400	0	0	200	300	5900	0	0	0	0	0	0
	Ольха	20	16	1600	1500	100	0	0	100	1400	0	0	100	0	0	0
	Итого	1000	-	8000	7900	100	0	200	400	7300	0	0	100	0	0	0
ПП-2 № 2.2 (2019)	Береза	67	16	2400	2300	100	0	300	200	1800	0	100	0	0	0	0
	Ольха	33	8	1200	1200	0	0	0	0	1200	0	0	0	0	0	0
	Итого	100	-	3600	3500	100	0	300	200	3000	0	100	0	0	0	0

На лесных участках № 3.2 и 4.2 отмечено 100 % содержание возобновляемого жизнеспособного подроста (рис. 7).

При анализе высотной структуры подроста выявлены различия.

На лесных участках № 2.1; 2.2 и 4.2 преобладает крупный подрост, свыше 1,5 м. На участках № 1.1; 3.1; 3.2; 4.1 преобладает средний подрост размером 0,6-1,5 м (рисунок 24).

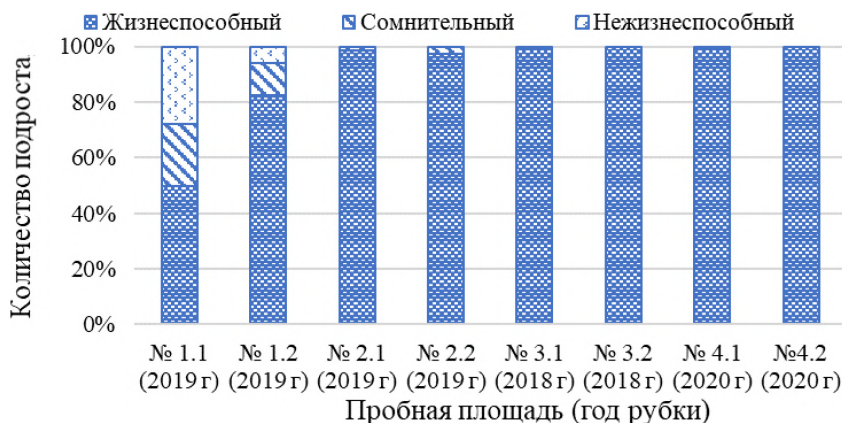


Рис. 7. Структура подроста по состоянию, %

Fig. 7. Stand structure by condition, %

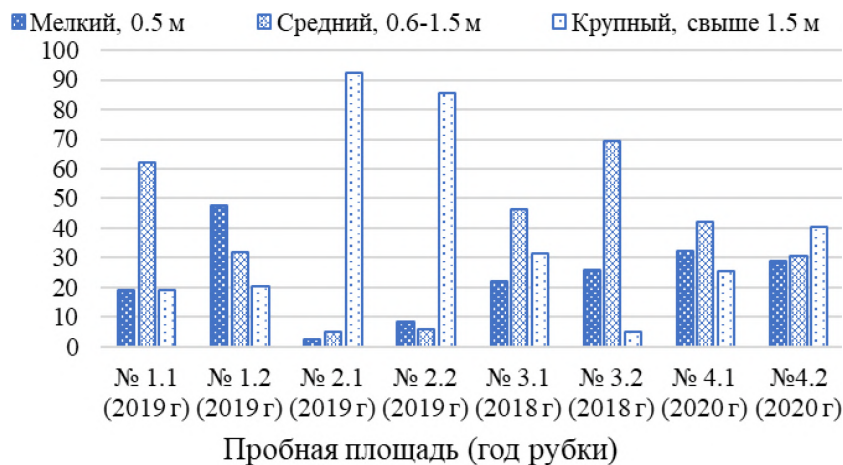


Рис. 8. Распределение жизнеспособного подроста по категориям крупности на пробных площадях в Могочинском лесничестве Забайкальского края

Fig. 8. Distribution of viable young trees by size class in sample plots in the Mogochinsky Forest District of the Trans-Baikal Region

Лиственница на обследованных лесосеках активно восстанавливается, преобладает мелкий подрост. Береза белая в естественном возобновлении участвует неравномерно, активно возобновляется на сухих участках и на склонах (рис. 9-10).

Таблица 3.

Характеристика естественного лесовосстановления на вырубках пробных площадей ПП-3 (№ 3.1 и № 3.2) и ПП-4 (№ 4.1 и № 4.2) в Могочинском лесничестве (уч. Могочинское) Забайкальского края

Table 3. Characteristics of Natural Regrowth on the Cleared Areas of Test Plots PP-3 (Nos. 3.1 and 3.2) and PP-4 (Nos. 4.1 and 4.2) in the Mogochinsky Forest District (Mogochinsky Division) of the Trans-Baikal Region

ПП (год рубки)	Порода	Состав, %	Встречаемость, %	Количество подроста	Распределение по состоянию, шт./га			Распределение по категориям крупности, шт./га								
					Жизнеспособный	Сомнительный	Нежизнеспособный	Жизнеспособный			Сомнительный			Нежизнеспособный		
								Мелкий, менее 0,5 м	Средний 0,6–1,5 м	Крупный, свыше 1,5 м	Мелкий, менее 0,5 м	Средний 0,6–1,5 м	Крупный, свыше 1,5 м	Мелкий, менее 0,5 м	Средний 0,6–1,5 м	Крупный, свыше 1,5 м
ПП-3 № 3.1 (2019)	Береза	54	68	4700	4700	0	0	600	1900	2200	0	0	0	0	0	0
	Ива	2	8	200	200	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0
	Лиственница	30	56	2600	2600	0	0	1300	1300	0	0	0	0	0	0	0
	Осина	8	8	700	600	100	0	0	400	200	100	0	0	0	0	0
	Ольха	6	8	500	500	0	0	0	200	300	0	0	0	0	0	0
	Итого	100	-	8700	8600	100	0	1900	4000	2700	100	0	0	0	0	0
ПП-3 № 3.2 (2019)	Береза	58	64	5900	5900	0	0	1300	4200	400	0	0	0	0	0	0
	Лиственница	37	60	3700	3700	0	0	1100	2600	0	0	0	0	0	0	0
	Ива	2	8	200	200	0	0	0	100	100	0	0	0	0	0	0
	Осина	3	8	300	300	0	0	200	100	0	0	0	0	0	0	0
	Итого	100	-	10100	10100	0	0	2600	7000	500	0	0	0	0	0	0
ПП-4 № 4.1 (2020)	Лиственница	7	32	1200	1100	100	0	900	200	0	100	0	0	0	0	0
	Береза	78	96	14200	14200	0	0	4900	4800	4500	0	0	0	0	0	0
	Ольха	15	52	2800	2800	0	0	100	2600	100	0	0	0	0	0	0
	Итого	100	-	18200	18100	100	0	5900	7600	4600	100	0	0	0	0	0
ПП-4 № 4.2 (2020)	Береза	56	68	12300	12100	200	0	4700	3500	3900	0	100	100	0	0	0
	Сосна	2	12	500	500	0	0	500	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ольха	18	20	3700	3700	0	0	0	700	3000	0	0	0	0	0	0
	Осина	22	44	4800	4400	300	100	500	2200	1700	0	100	200	0	0	100
	Лиственница	2	12	500	500	0	0	400	100	0	0	0	0	0	0	0
	Итого	100	-	21800	21200	500	100	6100	6500	8600	0	200	300	0	0	100

На участке № 1.2 в подросте доминирует лиственница в количестве 4,2 тыс. шт./га. Лиственница удовлетворительно возобновляется на участках № 3.1, 3.2 и 4.1. Сосна отмечена только на одной площадке № 4.2 в количестве 0,5 тыс. шт./га, встречаемость 12 %. На участках № 2.1 и 2.2 возобновление происходит за счет лиственных пород березы и ольхи.

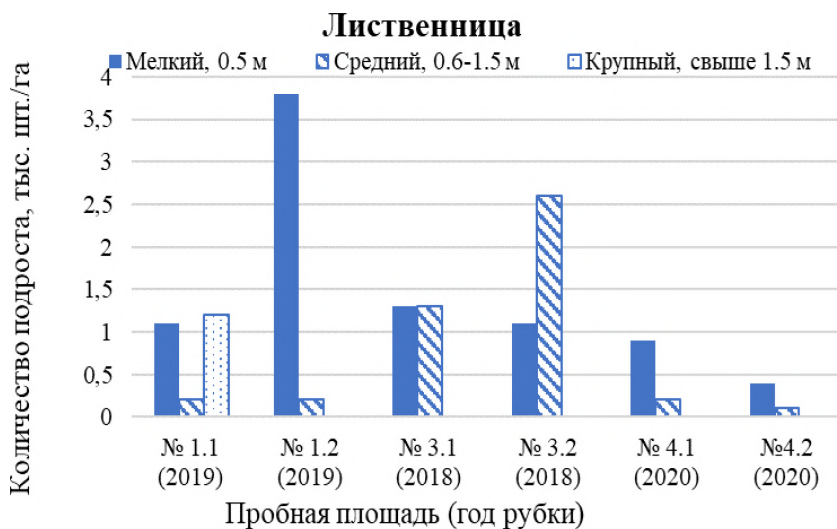


Рис. 9. Распределение жизнеспособного подроста лиственницы на вырубках по категории крупности на пробных площадях

Fig. 9. Distribution of viable larch saplings in clear-cut areas by size class on sample plots

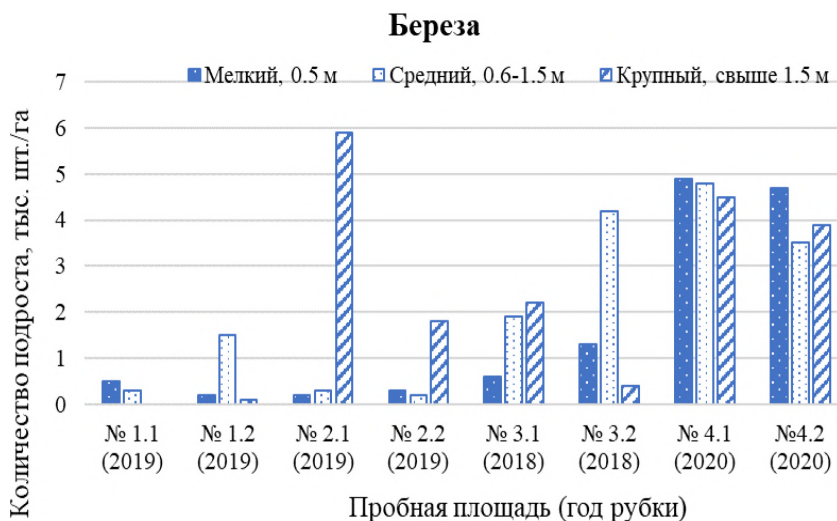


Рис. 10. Распределение жизнеспособного подроста березы на вырубках по категории крупности на пробных площадях

Fig. 10. Distribution of viable birch saplings in clear-cut areas by size class on sample plots

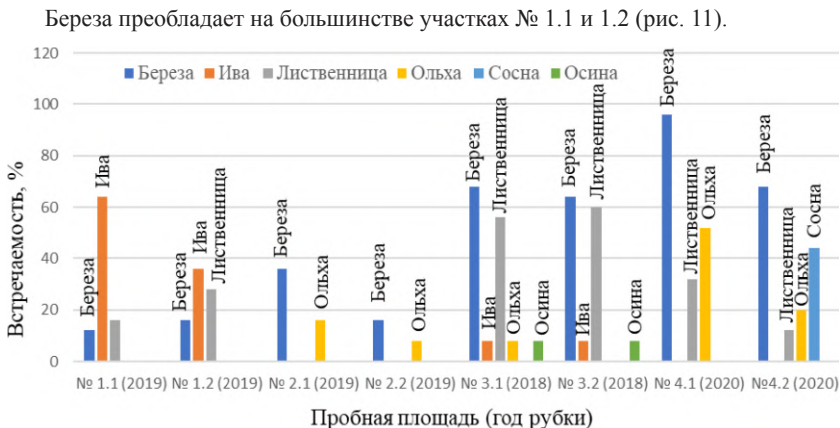


Рис. 11. Встречаемость древесных пород на обследуемых участках

Fig. 11. Frequency of tree species in the surveyed areas

Заключение

Исследованы лесные участки после вырубок и дана оценка возобновляемого подроста в Могочинском лесничестве Забайкальского края. На обследованных лесосеках преобладает смешанный лиственно-хвойный подрост. На всех рассматриваемых лесных участках преобладает здоровый подрост – от 80 до 98 %, кроме пробной площадки № 1.1, где количество жизнеспособного подроста составляло 49 %. Лиственные породы березы белой, ивы, осины, ольхи, в основном, появились после рубки. Лиственница представлена сохранным подростом и подростом, появившимся после рубки. Необходимо отметить положительное влияние рубки на формирование смешанных лиственнично-березовых молодняков. Рубки стимулировали естественное возобновление лиственницы. В перспективе можно ожидать положительную смену пород. Участки с вырубленными разреженными лиственными древостоями перейдут в лиственничную хозяйственную секцию.

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

Список литературы

1. Григорьев, И. В., Григорьев, М. Ф., & Степанов, Д. И. (2017). Перспективы модульных систем машин для лесозаготовительного производства в Якутии.

- Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 5(9), 74–77. EDN: <https://elibrary.ru/YLCKCG>
2. Григорьев, И. В. (2018). Особенности эксплуатации лесных машин в сильные морозы. В И. С. Сазонов (гл. ред.), *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых* (с. 102). Могилев: Изд-во Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет».
 3. Григорьева, О. И. (2018). Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 6(4), 25–29. EDN: <https://elibrary.ru/YSBYOT>
 4. Данилик, В. Н. (1979). Влияние техники и технологии лесозаготовок на водоохранно-защитную роль леса. *Лесное хозяйство*, (5), 24.
 5. Федоров, А. Н., Ивахана, Г., Константинов, П. Я., Мачимура, Т., Аргунов, Р. Н., Ефремов, П. В., Лорез, Л. М., Такакай, Ф., & Петров, М. И. (2013). Изменчивость мерзлотно-ландшафтных условий после сплошной вырубki в центральной Якутии. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, (8-1), 89–91. EDN: <https://elibrary.ru/QZGTHV>
 6. Кайрюкшис, Л., & Шакунас, З. (1990). Воздействие механизированных лесозаготовок на лесную среду и возобновление леса. *Лесн. хоз-во*, (8), 37–39.
 7. Короходкина, В. Г. (1975). Влияние пожаров на температурный режим лесных почв. В *Биол. науч.-техн. информ. «Биол. проблемы Севера»* (с. 26–28). Якутск: ЯФ СО АН СССР.
 8. Лесохозяйственные регламенты лесничеств Республики Бурятия, Забайкальского края, Республики Саха (Якутия). <https://hcvf.ru> (дата обращения: 10.08.2025).
 9. Лыткина, Л. П. (2010). *Лесовосстановление на гарях Лено-Амгинского междуречья. Центральная Якутия*. Новосибирск: Наука. 117 с. ISBN: 978-5-02-023326-3. EDN: <https://elibrary.ru/QLBMKJ>
 10. Мельниченко, Т. Н. (2012). *Криоморфоскульптура Енисейского Севера. География и геоэкология Красноярского края*. Красноярск. 115 с.
 11. Рудов, С. Е., Шапино, В. Я., Григорьев, И. В., Куницкая, О. А., & Григорьева, О. И. (2019). Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, (1), 106–119. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.106>. EDN: <https://elibrary.ru/VUABMA>
 12. Побединский, А. В. (1986). Сравнительная оценка естественных и искусственных лесов. *Лесное хозяйство*, (5), 28–32.

13. Саввинов, Д. Д. (1989). *Почвы Якутии*. Якутск: Кн. изд-во. 152 с.
14. Скрыбин, П. Н., & Варламов, С. П. (2013). Термический режим грунтов нарушенных ландшафтов Центральной Якутии. *Криосфера Земли*, 17(3), 44–49. EDN: <https://elibrary.ru/PGYFKB>
15. Толпышева, Т. Ю., & Малышева, Т. В. (1998). О механизмах воздействия напочвенного лишайникового покрова на возобновление сосны. *Лесное хозяйство*, (11), 18–19.
16. Тыртиков, А. П. (1979). *Динамика растительности и развитие многолетнемерзлых форм рельефа*. М.: Наука. 61 с.
17. Уткин, А. И. (1965). *Леса Центральной Якутии*. М.: Наука. 208 с.
18. Федоров, А. Н., Климовский, И. В., & Кузьмин, Г. А. (1985). Роль лесозаготовок в развитии многолетнемерзлых ландшафтов Центральной Якутии. В *Региональные и инженерно-геокриологические исследования в Якутии* (с. 111–117). Якутск: Ин-т мерзлотоведения, АН СССР.
19. Рудов, М. Е., Куницкая, О. А., Григорьев, М. Ф., Степанова, Д. И., & Григорьева, А. И. (2020). Экологические и лесоводственные аспекты работы лесных машин в лесах криолитозоны. *Актуальные проблемы лесного комплекса*, (57), 14–17. EDN: <https://elibrary.ru/ALJDVV>
20. Яковлев, Г. В., & Увакин, М. И. (1985). Влияние лесозаготовительной техники на водно-физические свойства почвы. *Лесное хозяйство*, (2), 30–33.
21. Rudov, S. E., Grigorev, I. V., Kunitskaya, O. A., Druzyanova, V. P., Pekhutov, A. S., Ivanov, A. P., Ivanov, A. K., Okhlopko, M. K., Pankov, V. Yu., & Borovikov, R. G. (2019). Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25(S 2), 191–205. EDN: <https://elibrary.ru/BRMJMK>
22. Fedorov, A. N., Konstantinov, P. Y., Vasilyev, N. F., & Shestakova, A. A. (2019). The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia. *Polar Science*, 22, 100483. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.100483>. EDN: <https://elibrary.ru/LXAZDK>

References

1. Grigorev, I. V., Grigorev, M. F., & Stepanov, D. I. (2017). Prospects for modular machine systems for logging production in Yakutia. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 5(9), 74–77. EDN: <https://elibrary.ru/YLCKCG>
2. Grigorev, I. V. (2018). Features of forest machine operation in severe frost. In I. S. Sazonov (Ed.), *New materials, equipment and technologies in industry: proceedings of the international scientific and technical conference of young scientists* (p. 102).

- Mogilev: Publishing House Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University".
3. Grigoreva, O. I. (2018). Features of natural forest restoration under cryolithozone conditions. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 6(4), 25–29. EDN: <https://elibrary.ru/YSBYOT>
 4. Danilik, V. N. (1979). The influence of logging equipment and technology on the water-protective role of the forest. *Forest Management*, (5), 24.
 5. Fedorov, A. N., Ivakhana, G., Konstantinov, P. Y., Machimura, T., Argunov, R. N., Efre-mov, P. V., Lorez, L. M., Takakai, F., & Petrov, M. I. (2013). Variability of perma-frost-landscape conditions after clear-cutting in central Yakutia. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, (8-1), 89–91. EDN: <https://elibrary.ru/QZGTHV>
 6. Kairyukshtis, L., & Shakunas, Z. (1990). Impact of mechanized logging on the forest environment and forest regeneration. *For. Manag.*, (8), 37–39.
 7. Korokhodkina, V. G. (1975). The influence of fires on the temperature regime of forest soils. In *Biol. sci.-tech. inform. "Biol. problems of the North"* (pp. 26–28). Yakutsk: YaF SO AN SSSR.
 8. Forest management regulations of forest districts of the Republic of Buryatia, Trans-Bai-kal Territory, Republic of Sakha (Yakutia). <https://hcvf.ru> (accessed: 10.08.2025).
 9. Lytkina, L. P. (2010). *Forest restoration on burned areas of the Lena-Amga inter-fluve. Central Yakutia* (p. 117). Novosibirsk: Nauka. ISBN: 978-5-02-023326-3. EDN: <https://elibrary.ru/QLBMKJ>
 10. Melnichenko, T. N. (2012). *Cryomorphosculpture of the Yenisei North. Geography and geoecology of the Krasnoyarsk Territory* (p. 115). Krasnoyarsk.
 11. Rudov, S. E., Shapiro, V. Y., Grigorev, I. V., Kunitskaya, O. A., & Grigoreva, O. I. (2019). Features of contact interaction of a skidding system with frozen soil. *News of Higher Educational Institutions. Forest Journal*, (1), 106–119. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.106>. EDN: <https://elibrary.ru/VUABMA>
 12. Pobedinsky, A. V. (1986). Comparative assessment of natural and artificial forests. *Forest Management*, (5), 28–32.
 13. Savvinov, D. D. (1989). *Soils of Yakutia* (p. 152). Yakutsk: Book Publishing House.
 14. Skryabin, P. N., & Varlamov, S. P. (2013). Thermal regime of soils in disturbed land-scapes of Central Yakutia. *Earth Cryosphere*, 17(3), 44–49. EDN: <https://elibrary.ru/PGYFKB>
 15. Tolpysheva, T. Y., & Malysheva, T. V. (1998). On the mechanisms of the influence of ground lichen cover on pine regeneration. *Forest Management*, (11), 18–19.
 16. Tyrtikov, A. P. (1979). *Dynamics of vegetation and development of permafrost relief forms* (p. 61). Moscow: Nauka.
 17. Utkin, A. I. (1965). *Forests of Central Yakutia* (p. 208). Moscow: Nauka.

18. Fedorov, A. N., Klimovsky, I. V., & Kuzmin, G. A. (1985). The role of logging in the development of permafrost landscapes of Central Yakutia. In *Regional and engineering-geocryological studies in Yakutia* (pp. 111–117). Yakutsk: Institute of Permafrost Studies, AN SSSR.
19. Rudov, M. E., Kunitskaya, O. A., Grigorev, M. F., Stepanova, D. I., & Grigoreva, A. I. (2020). Ecological and silvicultural aspects of forest machine operation in cryolithozone forests. *Actual Problems of the Forest Complex*, (57), 14–17. EDN: <https://elibrary.ru/ALJDVV>
20. Yakovlev, G. V., & Uvakin, M. I. (1985). The influence of logging equipment on the water-physical properties of soil. *Forest Management*, (2), 30–33.
21. Rudov, S. E., Grigorev, I. V., Kunitskaya, O. A., Druzyanova, V. P., Pekhutov, A. S., Ivanov, A. P., Ivanov, A. K., Okhlopko, M. K., Pankov, V. Yu., & Borovikov, R. G. (2019). Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25(S 2), 191–205. EDN: <https://elibrary.ru/BRMJMK>
22. Fedorov, A. N., Konstantinov, P. Y., Vasilyev, N. F., & Shestakova, A. A. (2019). The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia. *Polar Science*, 22, 100483. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.100483>. EDN: <https://elibrary.ru/LXAZDK>

ВКЛАД АВТОРОВ

Шемякина А.В.: написание рукописи.

Голубев Д.А.: полевые исследования.

Павлов Д.В.: полевые исследования, обработка материалов.

Гула К.Е.: полевые исследования.

Каюмов Н.А.: полевые исследования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anna V. Shemyakina: writing a manuscript.

Dmitry A. Golubev: field research.

Dmitry V. Pavlov: field research, processing of materials.

Konstantin E. Gula: field research.

Nikita A. Kayumov: field research.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Шемякина Анна Викторовна, к.б.н., ведущий научный сотрудник

Федеральное бюджетное учреждение «Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»

*ул. Волочаевская, 71, г. Хабаровск, 680020, Российская Федерация
Ashem777@mail.ru*

Голубев Дмитрий Андреевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник
*Федеральное бюджетное учреждение «Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
ул. Волочаевская, 71, г. Хабаровск, 680020, Российская Федерация*

Павлов Дмитрий Викторович, научный сотрудник
*Федеральное бюджетное учреждение «Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
ул. Волочаевская, 71, г. Хабаровск, 680020, Российская Федерация*

Гула Константин Евгеньевич, к.х.н, старший научный сотрудник
*Федеральное бюджетное учреждение «Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
ул. Волочаевская, 71, г. Хабаровск, 680020, Российская Федерация*

Каюмов Никита Алексеевич, техник
*Федеральное бюджетное учреждение «Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
ул. Волочаевская, 71, г. Хабаровск, 680020, Российская Федерация*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Shemyakina, Ph.D. in Biological Sciences, Senior Researcher
*Far East Forestry Research Institute
71, Volochaevskaya Str., Khabarovsk, 680020, Russian Federation
Ashem777@mail.ru
SPIN-code: 1993-4077
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9776-3842>
ResearcherID: KHC-8317-2024*

Dmitry A. Golubev, Ph.D. in Engineering, Leading Researcher
*Far East Forestry Research Institute
71, Volochaevskaya Str., Khabarovsk, 680020, Russian Federation
SPIN-code: 1928-8070
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-2913>
Scopus AuthorID: 56039568200*

Dmitry V. Pavlov, Research Associate

Far East Forestry Research Institute

71, Volochaevskaya Str., Khabarovsk, 680020, Russian Federation

SPIN-code: 4133-7837

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9628-6223>

ResearcherID: AGH-1225-2022

Konstantin E. Gula, Ph.D. in Chemistry, Senior Researcher

Far East Forestry Research Institute

71, Volochaevskaya Str., Khabarovsk, 680020, Russian Federation

SPIN-code: 5496-1228

Scopus AuthorID: 56491172400

Nikita A. Kayumov, technician

Far East Forestry Research Institute

71, Volochaevskaya Str., Khabarovsk, 680020, Russian Federation

SPIN-code: 1119-0977

Поступила 16.12.2025

После рецензирования 10.02.2026

Принята 26.02.2026

Received 16.12.2025

Revised 10.02.2026

Accepted 26.02.2026

Гигиена / Hygiene

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1792](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1792)EDN: [YPKNTI](https://www.edn.ru/ypknti/)

УДК 579.61



Сравнительное изучение различных питательных сред для изоляции возбудителей из крови больных висцеральным лейшманиозом

А.Э. Салехов, Ш.Н. Алиева, Ф.И. Гусейнова, З.З. Абсейнова, С.Н. Эйвазли,
Ш.Н. Джанахмедова, Э.А. Исмаилова, Ш.М. Бабаева

*Научно-исследовательский институт медицинской профилактики
им. В. Ахундова, Баку, Азербайджан*

Аннотация

Обоснование. Лейшманиоз – трансмиссивное заболевание, вызываемое простейшими рода *Leishmania*, которые являются облигатными внутриклеточными паразитами и поражают макрофаги. Заболевание эндемично для многих тропических и субтропических стран, а также для стран Средиземноморского бассейна.

Висцеральный и кожный лейшманиоз также считаются эндемичными для Азербайджана. Вакцину против лейшманиоза до сих пор не удалось разработать. Для разработки вакцин и новых лекарственных препаратов против этого заболевания, а также для изучения биологии паразита важно получить культуру возбудителя *in vitro*. Для этого в первую очередь необходимо выделить паразитов из крови пациента.

Цель. Целью исследования было определение оптимальных питательных сред для изоляции из крови и последующего культивирования паразитов *Leishmania*.

Материалы и методы. В данном исследовании использовалась периферическая кровь 3 пациентов с висцеральным лейшманиозом, направленных из Геранбойского и Шамкирского районов Азербайджанской Республики. Образцы крови промывали, помещали в стерильные культуральные флаконы 25 см² с питательными средами, инкубировали при температуре 27°C и исследовали под инвертированным микроскопом. В процессе культивирования использовались различные питательные среды: 15% RPMI-1640, 20% DMEM-high glucose, NNN.

Результаты. На 8-9-е дни культивирования в питательной среде NNN наблюдалось 250 000 паразитов/мл, в средах RPMI-1640 и DMEM-high glucose – 450

000 и 600 000 паразитов/мл. В последующие дни развитие паразитов в среде NNN ослабевало (100 000 паразитов/мл), тогда как на других питательных средах, наоборот, усиливалось (1 100 000; 1 300 000 паразитов/мл). Питательная среда NNN может быть рекомендована для изоляции паразитов *Leishmania* из крови пациентов, а RPMI-1640 и DMEM-high glucose – как для изоляции, так и для длительного культивирования паразитов *in vitro*.

Ключевые слова: висцеральный лейшманиоз; паразиты *Leishmania*; культивирование; *in vitro*; питательные среды; RPMI-1640; DMEM-high glucose; NNN

Для цитирования. Салехов, А. Э., Алиева, Ш. Н., Гусейнова, Ф. И., Абсейнова, З. З., Эйвазли, С. Н., Джанахмедова, Ш. Н., Исмаилова, Э. А., & Бабаева, Ш. М. (2026). Сравнительное изучение различных питательных сред для изоляции возбудителей из крови больных висцеральным лейшманиозом. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 503–521. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1792>

Comparative study of various nutrition media for isolation of pathogens from the blood of patients with visceral leishmaniasis

A.E. Salekhov, Sh.N. Aliyeva, F.H. Huseynova, Z.Z. Abseyanova, S.N. Eyvazli, Sh.N. Janahmadova, E.A. Ismayilova, Sh.M. Babayeva

*Scientific Research Institute of Medical Prevention
named after V. Akhundov, Baku, Azerbaijan*

Abstract

Background. Leishmaniasis is a transmissible disease caused by protozoa of the genus *Leishmania*, which are obligate intracellular parasites that infect macrophages. The disease is endemic in many tropical and subtropical countries.

Visceral and cutaneous leishmaniasis are considered endemic to Azerbaijan. A vaccine against leishmaniasis has not yet been developed. To develop vaccines and new drugs against this disease, as well as to study the parasite's biology, it is important to cultivate the pathogen *in vitro*. This requires isolating the parasites from the patient's blood.

Purpose. The aim of investigation was to determine optimal nutrient medium for the isolation from blood and cultivation of *Leishmania* parasites.

Materials and methods. This study used peripheral blood from three patients with visceral leishmaniasis referred from the Goranboy and Shamkir districts of the Republic of Azerbaijan. Blood samples were washed by centrifuging, placed in sterile 25 cm² culture flasks with nutrient medium, incubated at 27°C, and examined with an inverted

microscope. Various nutrient medium was used: 15% RPMI-1640, 20% DMEM-high glucose, and NNN.

Results. On days 8-9 of cultivation, 250,000 parasites/mL were observed in the NNN, while 450,000 and 600,000 parasites/mL were observed in the RPMI-1640 and DMEM. In the following days, the development of parasites in the NNN weakened (100,000 parasites/mL), while in other nutrient medium, it increased (1,100,000; 1,300,000 parasites/mL). The NNN can be recommended for the isolation of *Leishmania* parasites from the blood of patients, the RPMI-1640 and DMEM-high glucose – for the isolation and long-term cultivation of parasites *in vitro*.

Keywords: visceral leishmaniasis; *Leishmania* parasites; cultivation; *in vitro*; nutrient medium; RPMI-1640; DMEM-high glucose; NNN

For citation. Salekhov, A. E., Aliyeva, Sh. N., Huseynova, F. H., Abseyanova, Z. Z., Eyvazli, S. N., Janahmadova, Sh. N., Ismayilova, E. A., & Babayeva, Sh. M. (2026). Comparative study of various nutrition media for isolation of pathogens from the blood of patients with visceral leishmaniasis. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 503–521. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1792>

Введение

Лейшманиоз – облигатно трансмиссивное паразитарное заболевание, вызываемое жгутиконосными простейшими рода *Leishmania* и распространённое в тропических и субтропических странах. Лейшманиоз считается вторым по смертности паразитарным заболеванием после малярии, ежегодно вызывая около 0,7 – 1 миллиона случаев заболевания и 26 000 – 65 000 смертей. Лейшманиозом инфицировано 12 миллионов человек во всем мире, а 350 миллионов находятся в зоне риска. Существует более 20 видов возбудителя этой болезни, переносчиками которого являются более 30 видов комаров [11; 15].

Лейшманиоз, считающийся эндемичным заболеванием в 98 странах мира, занимает важное место в тропической медицине. Изучение заболевания и борьба с ним отражены в специальной программе ВОЗ. Лейшманиоз включён в список «забытых» и плохо регистрируемых заболеваний в специальной стратегической программе ВОЗ по борьбе с лейшманиозом в Европейском регионе [19; 20].

Это заболевание, считающееся эндемичным в 98 странах мира, не обошло стороной и территорию Азербайджана. Заболевание регистрируется на этих территориях с XIX века, распространилось на большинство регионов нашей страны и стало серьёзной проблемой. Впервые кожный лейшманиоз был выявлен в 1862 году, а висцеральный лейшманиоз –

в 1913 году в Гяндже, Барде, Агдаше и других районах Азербайджана. До 1960 года висцеральный лейшманиоз был широко распространен во многих районах республики. В 1960 году висцеральный лейшманиоз в Азербайджане был практически ликвидирован. Однако, начиная с 1987 года, в некоторых регионах вновь регистрируются эпидемиологические вспышки висцерального лейшманиоза и наблюдается распространение заболевания [9; 16; 17].

В стране лейшманиоз официально регистрируется уже много лет. Несмотря на значительные усилия страны по борьбе с этим заболеванием, выявление новых случаев остаётся серьёзной проблемой. В настоящее время кожный и висцеральный лейшманиоз регистрируется в 46 районах Азербайджана, преимущественно в Кура-Аракской низменности, на Большом и Малом Кавказе и в Ленкоранской зоне. Распространённость инфекции зависит от географического положения страны, разнообразия животного и растительного мира, природно-климатических условий и иммунного статуса людей. В то же время, уровень знаний населения об этом заболевании и методах защиты от него крайне низок. Несмотря на развитие медицины, диагностика и лечение заболевания порой проводятся некорректно, что является актуальной проблемой для органов здравоохранения.

Как известно, для диагностики заболевания используются паразитологические, серологические, молекулярно-биологические и культуральные методы [5; 6; 10]. Культуральный метод используется, помимо диагностики заболевания, для определения видового состава возбудителей и определения их чувствительности к этиологическим препаратам. Этот метод применяется *in vivo* и *in vitro* [1; 7; 14].

Метод культивирования *in vivo* проводится на экспериментальных животных и результаты становятся известны через 2-3 недели или месяц. Следует отметить, что чувствительность экспериментальных животных к паразиту также различна. Поэтому в медицине предпочтение отдаётся методу культивирования *in vitro*. Для этого используют различные питательные среды. В условиях *in vitro* паразиты, находящиеся в макрофагах в форме амастигот трансформируются в подвижные жгутиконосцы в форме промастигот [3].

Цель исследования – стандартизация питательных сред, которые обеспечивают в короткие сроки трансформацию паразитов из амастиготной формы в промастиготную, будут полезны для выделения паразитов из крови больного человека и минимизируют изменение биологических свойств паразитов в культуре.

Материалы и методы

Паразиты рода *Leishmania* были выделены из крови людей, инфицированных висцеральным лейшманиозом. То есть источником паразита были амастиготы *Leishmania*.

В практической медицине предпочтение отдаётся простым, экономически выгодным и эффективным питательным средам [4; 8]. С учётом этого, для получения культур лейшманий нами были использованы классический метод культивирования и 3 питательные среды:

RPMI-1640 (Roswell Park Memorial Institute)

DMEM-high glucose (Dulbecco's Modified Eagle Medium)

NNN (Novy, McNeal, Nicolle)

В лабораторных условиях питательные среды были приготовлены по принятым стандартным протоколам и полностью пригодны к использованию. При этом особое внимание уделялось составу питательных сред, а также соблюдению их стерильности. Жидкие питательные среды стерилизовали с использованием фильтров Millipore с размером пор 0,45 мкм и 0,22 мкм. Стерилизацию проводили в автоклаве при температуре 121°C в течение 15 минут и давлении 1,5 атмосфер.

Приготовление питательных сред

15% RPMI-1640 (Roswell Park Memorial Institute)

(Состав: RPMI-1640 (SigmaR), инактивированная фетальная бычья сыворотка (FBS) (SigmaR), 2 мМ NaHCO₂ или 25 мМ HEPES (SigmaR), антибиотик. HEPES используется для регулирования pH питательной среды. 4-(2-гидроксиэтил)-1-пиперазин этансульфоновая кислота (мол. масса 238).

10,4 г порошка RPMI-1640, обогащённого глутамином, и 5,94 г HEPES (C₈H₁₈N₂O₄S) растворяли в 1000 мл бидистиллированной воды и фильтровали через фильтр «Millipore» с размером пор 0,22 мкм. Затем добавляли 15% FBS и 10% антибиотика (пенициллин-стрептомицин 5 000 000 ME) для приготовления полноценной питательной среды и фиксировали значение pH на уровне 7,2.

20% DMEM-high glucose (среда Eagle в модификации Dulbecco)

(Состав: DMEM-high glucose, инактивированная фетальная бычья сыворотка (FBS), антибиотик (penicilin-streptomycin)

Для приготовления полной питательной среды к DMEM с высоким содержанием глюкозы добавляли 20% FBS, 10% антибиотика и фиксировали значение pH на уровне 7,2.

NNN (Novy, McNeal, Nicolle)

(Состав: Сухой агар для культивирования (Агар-агар), хлорид натрия, бидистиллированная вода, дефибринированная кровь кролика, антибиотик).

Среда NNN готовится на основе кровяного агара Difco. Для приготовления питательной среды 14 г Агар-агар (Merck) и 6 г NaCl растворяли в 900 мл бидистиллированной воды и кипятили 2 минуты на электромагнитной мешалке. Раствор фильтровали и стерилизовали в автоклаве при температуре 121°C и давлении 1,5 атм в течение 15 минут. Стерилизованный раствор охлаждали до 45–50°C. К остывшему агару добавляли 15% дефибринированной крови кролика.

Приготовление крови кролика

Кровь, взятую из ушной вены кролика в стерильных условиях, переливали в стеклянную колбу объёмом 100 мл, содержащую стерильные стеклянные шарики, и постоянно перемешивали в течение 15–20 минут. Кровь фильтровали, добавляли к ранее приготовленному, охлаждённому до 50°C агару и перемешивали до получения однородной окраски. К агару добавляли гентамицин 80 мкг/мл и снова перемешивали. Кровяной агар переносили в стерильные конические пробирки, расположенные под углом 15°, по 2–2,5 мл и выдерживали 30–40 минут. После застывания агара его помещали в холодильник при температуре +4°C. Готовую питательную среду можно хранить в холодильнике в течение одного месяца.

Образцы крови были взяты у 3 пациентов, госпитализированных с диагнозом лейшманиоз из Геранбойского (Кура-Аракская низменность) и Шамкирского (Малый Кавказ) районов республики, и посеяны на вышеуказанные питательные среды.

Забор венозной крови

При висцеральном лейшманиозе образцы берутся из селезенки, печени, костного мозга и крови. В данном исследовании 5 мл периферической венозной крови пациента с висцеральным лейшманиозом были собраны в полипропиленовые пробирки объёмом 10 мл, содержащие антикоагулянт ЭДТА. Кровь была перенесена в пробирку и произведено центрифугирование при 750 об/мин в течение 5 минут. Верхнюю часть центрифугированной крови – плазму и buffy coat (тонкую лейкоцитарно-тромбоцитарную массу, скапливающуюся на границе плазмы и эритроцитов) – собрали и перенесли в новую пробирку. Перенесённый в новую пробирку раствор центрифугировали повторно в течение 5 минут при 1350 об/мин. На этот раз осадок со дна пробирки был собран и высеян на питательные среды.

Для ускорения выделения паразитов из крови первоначально использовали микропробирки Eppendorf объёмом 1,5 мл. Образцы крови больных висцеральным лейшманиозом, подготовленные по вышеуказанной мето-

дике, помещали в пробирки Eppendorf. К ним добавляли полноценные питательные среды (15% RPMI-1640 и 20% DMEM с высоким содержанием глюкозы) в соотношении 1:1 и выдерживали в термостате при температуре 27°C.

В зависимости от дальнейшего развития паразитов *in vitro* модифицировали режим их культивирования. Отбирали по 5 мл полной питательной среды различного состава и переносили в стерильные культуральные флаконы объёмом 25 мл с крышками (Suspension Culture Flask). Раствор из микропробирок аккуратно добавляли во флаконы. Пассажи проводили в зависимости от состояния культуры. Промастиготы подсчитывали с помощью счетной камеры Thoma.

Образцы крови, выделенные у пациентов с висцеральным лейшманиозом и подготовленные по вышеуказанной методике, были добавлены также в пробирки с питательной средой NNN.

Статистическая обработка данных проводилась методами двухфакторного дисперсионного анализа (uANOVA – test) и непараметрического критерия Фридмана (Fr). В статистическом пакете SPSS-26 различия считались статистически значимыми при $P < 0,050$ [2].

Результаты и обсуждение

В экспериментах, проведенных с питательной средой RPMI-1640, наблюдалась определенная активность развития паразитов *Leishmania*. По степени активности развития паразитов эта среда уступала среде DMEM с высоким содержанием глюкозы. Так, начиная с первых суток выделения паразитов из крови пациента (3-и сутки), количество паразитов в 1 мл достигало в среднем 200 000, а в последующие сутки увеличивалось: на 9-е сутки – 450 000, на 15-е сутки – 670 000, на 24-е сутки – 1 100 000. Начиная с 20-х суток, в культуре возбудителей *Leishmania* стали отмечаться паразиты с несколько измененной морфологией (рисунок 1).

Хотя уровень паразитемии оставался высоким, стабильно наблюдались малоподвижные паразиты. В дальнейшие недели в культуре преобладали атипичные паразиты, наблюдались локальные скопления промастигот и как результат - снижение паразитемии.

Паразиты, инокулированные в среду DMEM с высоким содержанием глюкозы, демонстрировали более активный рост. Среднее количество паразитов в 1 мл на 3-й день культивирования составило 300 000, на 9-й день – 600 000, на 15-й день – 700 000 и на 24-й день – 1 300 000. Атипичных паразитов в данной культуре обнаружено не было (рисунок 1).

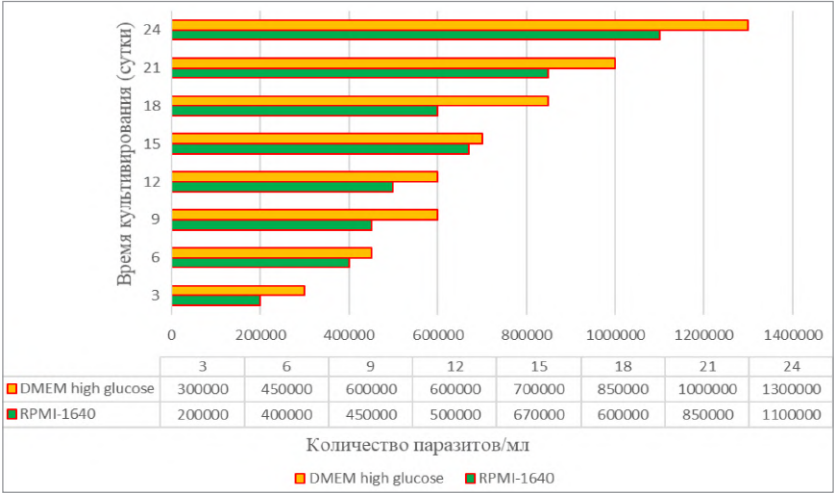


Рис. 1. Динамика развития паразитов *Leishmania* в питательных средах RPMI-1640 и DMEM-high glucose

Fig. 1. Growth kinetics of *Leishmania* parasites in RPMI-1640 and DMEM-high glucose culture media

По результатам двухфакторного дисперсионного анализа (uANOVA – test) обнаружено влияние факторов «сутки» ($P_F < 0,001$), «питательные среды» ($P_F = 0,002$), а также их обоюдное влияние на результат ($P_F < 0,001$) (таблицы 1, 2).

Таблица 1.

Описательная статистика
Table 1. Descriptive Statistics

Dependent Variable: Изолят				
Сутки	Группы	Mean	Std. Deviation	N
3	RPMI-1640	200000,00	50000,000	3
	DMEM	300000,00	52915,026	3
	Total	250000,00	71554,175	6
6	RPMI-1640	400000,00	25000,000	3
	DMEM	450000,00	13228,757	3
	Total	425000,00	32710,854	6
9	RPMI-1640	433333,33	29297,326	3
	DMEM	600000,00	29051,678	3
	Total	516666,67	94943,492	6

12	RPMĬ-1640	500000,00	31224,990	3
	DMEM	600000,00	30805,844	3
	Total	550000,00	61397,068	6
15	RPMĬ-1640	669666,67	31785,741	3
	DMEM	700000,00	20000,000	3
	Total	684833,33	28985,629	6
18	RPMĬ-1640	600000,00	45825,757	3
	DMEM	850000,00	22912,878	3
	Total	725000,00	140712,473	6
21	RPMĬ-1640	750000,00	17088,007	3
	DMEM	1000000,00	20223,748	3
	Total	875000,00	137950,716	6
24	RPMĬ-1640	1100000,00	66143,783	3
	DMEM	1300000,00	70000,000	3
	Total	1200000,00	125339,539	6
Total	RPMĬ-1640	581625,00	260664,838	24
	DMEM	725000,00	305884,605	24
	Total	653312,50	290320,524	48

Таблица 2.

Оценочные предельные средние**Table 2.** Estimated Marginal Means**1. Сутки**

Dependent Variable: Изолят

Сутки	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
3	250000,000	15724,737	217969,758	282030,242
6	425000,000	15724,737	392969,758	457030,242
9	516666,667	15724,737	484636,425	548696,908
12	550000,000	15724,737	517969,758	582030,242
15	684833,333	15724,737	652803,092	716863,575
18	725000,000	15724,737	692969,758	757030,242
21	875000,000	15724,737	842969,758	907030,242
24	1200000,000	15724,737	1167969,758	1232030,242

2. Группы

Dependent Variable: Изолят

Группы	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
RPMĬ-1640	581625,000	7862,369	565609,879	597640,121
DMEM	725000,000	7862,369	708984,879	741015,121

3. Сутки * Группы

Dependent Variable: Изолят

Сутки	Группы	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
3	RPMi-1640	200000,000	22238,137	154702,398	245297,602
	DMEM	300000,000	22238,137	254702,398	345297,602
6	RPMi-1640	400000,000	22238,137	354702,398	445297,602
	DMEM	450000,000	22238,137	404702,398	495297,602
9	RPMi-1640	433333,333	22238,137	388035,731	478630,935
	DMEM	600000,000	22238,137	554702,398	645297,602
12	RPMi-1640	500000,000	22238,137	454702,398	545297,602
	DMEM	600000,000	22238,137	554702,398	645297,602
15	RPMi-1640	669666,667	22238,137	624369,065	714964,269
	DMEM	700000,000	22238,137	654702,398	745297,602
18	RPMi-1640	600000,000	22238,137	554702,398	645297,602
	DMEM	850000,000	22238,137	804702,398	895297,602
21	RPMi-1640	750000,000	22238,137	704702,398	795297,602
	DMEM	1000000,000	22238,137	954702,398	1045297,602
24	RPMi-1640	1100000,000	22238,137	1054702,398	1145297,602
	DMEM	1300000,000	22238,137	1254702,398	1345297,602

Рост паразитов *Leishmania*, инокулированных в среду NNN, был слабее, чем на двух вышеупомянутых средах. Только на 4-й день количество паразитов в 1 мл культуры второго изолята достигло 80 000. На 8-й день наблюдался некоторый рост во всех 3 изолятах, при этом в культуре второго изолята было 250 000 паразитов/мл. В последующие дни рост паразитов был слабее (рисунок 2).

$$P_{Fr} = 0,019.$$

Демонстрация промастигот путем их размножения в среде – это быстрый, простой и недорогой метод. Двухфазная среда NNN (Novu-McNeal-Nicolle), созданная в 1904 году, долгое время использовалась для кратковременной культивации паразитов *Leishmania*. Развитие промастигот на питательной среде NNN является золотым стандартом лабораторной диагностики [3; 12; 13; 18]. В работе некоторых авторов представлены экспериментальные данные о возможности использования дефибрированной крови кур, быков, лошадей и овец в качестве замены дефибрированной крови кроликов в качестве ингредиента для приготовления питательной среды NNN [18]. Ladopoulos, Т. И другие в своих исследова-

ниях использовали кровь разных животных (лошади, осла, козы и овцы). В ходе исследования козья кровь оказалась самой неудовлетворительной, а лошадиная кровь оправдала надежды. Этот результат может быть объяснен тем, что *Leishmania* является ауксотрофом по никотинамидадениндинуклеотиду (НАД), а лошадиные эритроциты поддерживают НАД-зависимые микроорганизмы [12].

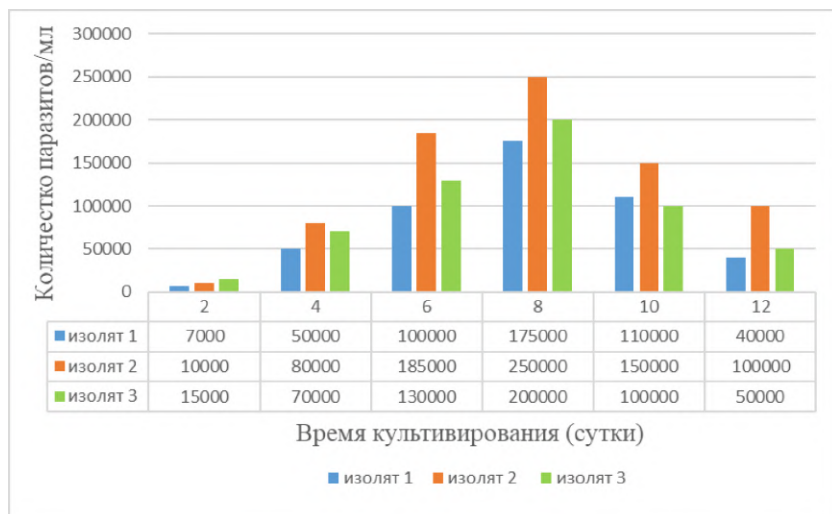


Рис. 2. Динамика роста 3 изолятов паразитов *Leishmania* на питательной среде NNN

Fig. 2. Growth dynamics of three *Leishmania* parasite isolates on NNN culture medium

Независимо от выбранного источника эритроцитов, питательная среда NNN подходит только для выделения лейшманий из крови пациентов, она не может обеспечить их дальнейшее беспрерывное развитие в культуре. Среду, использованную на начальном этапе, далее следует заменить на другую. Можно предположить, что среда NNN не может удовлетворить потребности лейшманий в питательных веществах в культуре.

Питательная среда DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) изначально разработана для поддержания роста и размножения фибробластов и клеточных линий (HeLa, 293, Cos-7). Является модификацией среды Dulbecco - Eagle и отличается богатым составом. Содержание витаминов, аминокислот и минеральных солей в этой питательной среде в 4 раза выше, чем в среде Eagle.

Питательная среда RPMI-1640 изначально была разработана для культивирования клеток крови, преимущественно лимфоцитов. Её состав также достаточно богат и включает витамины, аминокислоты, глюкозу, неорганические соли. Главной особенностью этой среды является наличие биотина, глутатиона, витамина B12, холина и высокой концентрации инозитола.

Паразитам *Leishmania* требуются определенные витамины для выживания и размножения, особенно витамины группы B, которые играют ключевую роль в метаболизме. Нужда в этих витаминах обусловлена метаболическими потребностями в клетках хозяина и внутри переносчиков (москитов). Витамины, играющие важную роль в метаболизме паразитов следующие:

Тиамин (метаболизм углеводов)

Рибофлавин (энергетические процессы)

Ниацин (синтез коферментов – НАД)

Пантотеновая кислота (синтез кофермента А)

Фолиевая кислота и кобаламин (синтез нуклеотидов)

Биотин является коферментом, необходим для метаболизма жиров, белков и углеводов.

Глюкоза является источником энергии для клеток. Аминокислоты (глутамин, аргинин, аспарагин и др.) необходимы для синтеза белка. Неорганические соли (хлорид натрия, бикарбонат натрия, хлорид калия и др.) регулируют солевой баланс. Бикарбонат натрия также контролирует pH. Функция глутатиона — защита клеток [13].

В нашем эксперименте паразиты *Leishmania* развивались и адаптировались к условиям культивирования *in vitro* на питательных средах RPMI-1640 и DMEM-high glucose. Эти среды подходят как для изоляции паразитов из крови пациента, так и для их культивирования. Более интенсивное развитие возбудителей на среде DMEM с высоким содержанием глюкозы и полное отсутствие атипичных паразитов дают основание отдать предпочтение этой питательной среде.

Заключение

1. Исследование выявило, что питательная среда NNN эффективна для выделения паразитов *Leishmania* из крови больного, но она не подходит для длительного культивирования возбудителей.

2. Для изоляции паразитов *Leishmania* из крови пациентов и их дальнейшего культивирования можно рекомендовать питательную среду RPMI-1640. Однако начиная с 20-х суток, в культуре возбудителей стали

отмечаться паразиты с измененной морфологией. Эта питательная среда может обеспечить кратковременное культивирование паразитов.

3. Для изоляции паразитов из крови пациентов с целью культивирования рекомендуем также питательную среду DMEM с высоким содержанием глюкозы. В данной культуре проводились все требуемые манипуляции: замена питательной среды, пассирование, криоконсервирование. За период культивирования атипичных паразитов обнаружено не было. Питательная среда подходит для длительного культивирования паразитов *Leishmania*.

Список литературы

1. Аллахвердиев, А. М., & Багирова, М. И. (2023). *Эпидемиология, диагностика, лечение и профилактика лейшманиоза*. Зардаби. 128 стр.
2. Джафаров, И. А. (2025). *Биостатистика*. Табиб. 250 стр. ISBN 978-9952-39-330-9.
3. Алиева, Ш. Н., Гусейнова, Ф. И., & Абсейнова, З. З. (2025). Сравнительное изучение развития *in vitro* паразитов *Leishmania* в различных питательных средах. *Scientific Research International Scientific Journal*, 5(2), 113–117. <https://doi.org/10.36719/2789-6919/42/113-117>
4. Castelli, G., Galante, A., Lo Verde, V. et al. (2014). Evaluation of two modified culture media for *Leishmania infantum* cultivation versus different culture media. *J Parasitol*, 100(2), 228–230. <https://doi.org/10.1645/13-253.1>
5. Chavush, I., Aksoy, T., Yildirim, A. et al. (2022). Could RPMI-1640 Medium be Used in the Diagnosis and Isolation of Cutaneous Leishmaniasis Lacking NNN Medium? *Turkish Journ of Parasitol*, 46(3), 249–252. <https://turkiyeparazitolderg.org/articles/doi/tpd.galenos.2022.27247>
6. Chouihi, E., Amri, F., Bouslimi, N. et al. (2009). Cultures on NNN medium for the diagnosis of leishmaniasis. *Pathol Biol*, 57(3), 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.patbio.2008.03.007>. EDN: <https://elibrary.ru/MCPRBR>
7. Echchakery, M., Chicharro, C., Boussaa, S. et al. (2020). Molecular identification of *Leishmania tropica* and *L. infantum* isolated from cutaneous human leishmaniasis samples in central Morocco. *J Vector Borne Dis*, 57(1), 71–77. <https://doi.org/10.4103/0972-9062.308804>. EDN: <https://elibrary.ru/INPHVT>
8. Fang-Zhou, C., Yue-Tao, Y., Chun-Hua, G., & Jun-Yun, W. (2019). Observation on growth and reproduction of various *Leishmania* isolates in different culture media. *Zhongguo Xue Xi Chong Bing Fang Zhi Za Zhi*, 31(3), 294–298. <https://doi.org/10.16250/j.32.1374.2018180>
9. Gadzhibekova, E., Aliyeva, N., & Huseynova, F. (2018). The epidemiology of leishmaniasis in the Barda region of Azerbaijan. *Scientific works of the Research Medical Preventive Institute*, 11, 103–107.

10. Gokmen, A. A., Oncel, K., & Ozdemir, O.A. (2015). An alternative biphasic nutrient medium for the diagnosis of cutaneous leishmaniasis. *Mikrobiol Bul*, 49(2), 266–271. <https://doi.org/10.5578/mb.8913>
11. Kwang, P.C. (2023). Leishmania and Leishmaniasis Research: The Past 50 Years and the Future. *Pathogens*, 12(6), 776. <https://doi.org/10.3390/pathogens12060776>. EDN: <https://elibrary.ru/ZIAUKX>
12. Ladopoulos, T., Ntais, P., Tsirigotakis, N. et al. (2015). The proliferation potential of promastigotes of the main Leishmania species of the old world in NNN culture medium prepared using blood of four different mammals. *Exp Parasitol*, 157, 124–127. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2015.07.008>
13. Limoncu, M.E., Ozbilgin, A., Balcioglu, I.C., & Ozbek, Y. (2004). Evaluation of three new culture media for the cultivation and isolation of Leishmania parasites. *J Basic Microbiol*, 44(3), 197–202. <https://doi.org/10.1002/jobm.200310367>
14. Mohammadpour, I., Motazedian, M.H., Handjani, F., & Hatam, G.R. (2016). Cutaneous Leishmaniasis of the Eyelids: A Case Series with Molecular Identification and Literature Review. *Korean J Parasitol*, 54(6), 787–792. <https://doi.org/10.3347/kjp.2016.54.6.787>
15. Ozbilgin, A., Chulha, G., Uzun, S. et al. (2016). Leishmaniasis in Turkey: first clinical isolation of Leishmania major from 18 autochthonous cases of cutaneous leishmaniasis in four geographical regions. *Trop Med Int Health*, 21(6), 783–791. <https://doi.org/10.1111/tmi.12698>. EDN: <https://elibrary.ru/WTTLFN>
16. Salekhov, A.E., & Mamedov, M.G. (2022). The role of parasitic diseases in the pathology of Azerbaijan and their prediction for the near future. *Modern achievements of Azerbaijani medicine*, (3), 62–66.
17. Salekhov, A.E., Shikhaliyeva, Sh.T., Huseynova, F.I., & Gadzhibeyova, E.A. (2022). Dynamics of visceral leishmaniasis in the population of the Republic of Azerbaijan. *Nature and Science*, (6), 6–10.
18. Santos, R.C.D., Pinho, F.A., Passos, G.P. et al. (2018). Isolation of naturally infecting Leishmania infantum from canine samples in Novy-MacNeal-Nicolle medium prepared with defibrinated blood from different animal species. *Vet Parasitol*, (257), 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2018.05.010>
19. WHO. (2018). *Manual on case management and surveillance of the leishmaniases in the WHO European Region*. 1–13.
20. World Health Organization (WHO). (2020). *Leishmaniasis*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/leishmaniasis>

References

1. Allahverdiev, A. M., & Bagirova, M. I. (2023). *Epidemiology, diagnosis, treatment and prevention of leishmaniasis*. Baku: Zardabi. 128 p.

2. Jafarov, I. A. (2025). *Biostatistics*. Baku: Tabib. 250 p. ISBN 978-9952-39-330-9.
3. Alieva, Sh. N., Guseynova, F. I., & Abseynova, Z. Z. (2025). Comparative study of in vitro development of Leishmania parasites in various culture media. *Scientific Research International Scientific Journal*, 5(2), 113–117. <https://doi.org/10.36719/2789-6919/42/113-117>
4. Castelli, G., Galante, A., Lo Verde, V. et al. (2014). Evaluation of two modified culture media for Leishmania infantum cultivation versus different culture media. *J Parasitol*, 100(2), 228–230. <https://doi.org/10.1645/13-253.1>
5. Chavush, I., Aksoy, T., Yıldırım, A. et al. (2022). Could RPMI-1640 Medium be Used in the Diagnosis and Isolation of Cutaneous Leishmaniasis Lacking NNN Medium? *Turkish Journ of Parasitol*, 46(3), 249–252. <https://turkiyeparazitolog.org/articles/doi/tpd.galenos.2022.27247>
6. Chouih, E., Amri, F., Bouslimi, N. et al. (2009). Cultures on NNN medium for the diagnosis of leishmaniasis. *Pathol Biol*, 57(3), 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.patbio.2008.03.007>. EDN: <https://elibrary.ru/MCPRBR>
7. Echchakery, M., Chicharro, C., Boussaa, S. et al. (2020). Molecular identification of Leishmania tropica and L. infantum isolated from cutaneous human leishmaniasis samples in central Morocco. *J Vector Borne Dis*, 57(1), 71–77. <https://doi.org/10.4103/0972-9062.308804>. EDN: <https://elibrary.ru/INPHVT>
8. Fang-Zhou, C., Yue-Tao, Y., Chun-Hua, G., & Jun-Yun, W. (2019). Observation on growth and reproduction of various Leishmania isolates in different culture media. *Zhongguo Xue Xi Chong Bing Fang Zhi Za Zhi*, 31(3), 294–298. <https://doi.org/10.16250/j.32.1374.2018180>
9. Gadzhibekova, E., Aliyeva, N., & Huseynova, F. (2018). The epidemiology of leishmaniasis in the Barda region of Azerbaijan. *Scientific works of the Research Medical Preventive Institute*, 11, 103–107.
10. Gokmen, A. A., Oncel, K., & Ozdemir, O. A. (2015). An alternative biphasic nutrient medium for the diagnosis of cutaneous leishmaniasis. *Mikrobiol Bul*, 49(2), 266–271. <https://doi.org/10.5578/mb.8913>
11. Kwang, P. C. (2023). Leishmania and Leishmaniasis Research: The Past 50 Years and the Future. *Pathogens*, 12(6), 776. <https://doi.org/10.3390/pathogens12060776>. EDN: <https://elibrary.ru/ZIAUKX>
12. Ladopoulos, T., Ntais, P., Tsirigotakis, N. et al. (2015). The proliferation potential of promastigotes of the main Leishmania species of the old world in NNN culture medium prepared using blood of four different mammals. *Exp Parasitol*, 157, 124–127. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2015.07.008>
13. Limoncu, M. E., Ozbilgin, A., Balcioglu, I. C., & Ozbel, Y. (2004). Evaluation of three new culture media for the cultivation and isolation of Leishmania parasites. *J Basic Microbiol*, 44(3), 197–202. <https://doi.org/10.1002/jobm.200310367>

14. Mohammadpour, I., Motazedian, M. H., Handjani, F., & Hatam, G. R. (2016). Cutaneous Leishmaniasis of the Eyelids: A Case Series with Molecular Identification and Literature Review. *Korean J Parasitol*, 54(6), 787–792. <https://doi.org/10.3347/kjp.2016.54.6.787>
15. Ozbilgin, A., Chulha, G., Uzun, S. et al. (2016). Leishmaniasis in Turkey: first clinical isolation of *Leishmania major* from 18 autochthonous cases of cutaneous leishmaniasis in four geographical regions. *Trop Med Int Health*, 21(6), 783–791. <https://doi.org/10.1111/tmi.12698>. EDN: <https://elibrary.ru/WTTLFN>
16. Salekhov, A. E., & Mamedov, M. G. (2022). The role of parasitic diseases in the pathology of Azerbaijan and their prediction for the near future. *Modern achievements of Azerbaijani medicine*, (3), 62–66.
17. Salekhov, A. E., Shikhaliyeva, Sh. T., Huseynova, F. I., & Gadzhibeyova, E. A. (2022). Dynamics of visceral leishmaniasis in the population of the Republic of Azerbaijan. *Nature and Science*, (6), 6–10.
18. Santos, R. C. D., Pinho, F. A., Passos, G. P. et al. (2018). Isolation of naturally infecting *Leishmania infantum* from canine samples in Novy-MacNeal-Nicolle medium prepared with defibrinated blood from different animal species. *Vet Parasitol*, (257), 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2018.05.010>
19. WHO. (2018). *Manual on case management and surveillance of the leishmaniases in the WHO European Region*. 1–13.
20. World Health Organization (WHO). (2020). *Leishmaniasis*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/leishmaniasis>

ВКЛАД АВТОРОВ

Салехов А.Э.: концепция исследования, научное руководство, статистическая обработка данных, окончательное одобрение версии для публикации.

Алиева Ш.Н.: написание первоначального варианта статьи.

Гусейнова Ф.И.: ответственность за целостность работы и проверку точности данных.

Джанахмедова Ш.Н.: анализ и интерпретация полученных данных.

Абсейнова З.З., Эйвазли С.Н.: сбор данных, экспериментальная часть исследования.

Исмаилова Э.А.: редактирование и критический пересмотр рукописи.

Бабаева Ш.М.: разработка дизайна исследования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Akif E. Salekhov: conceptualization, supervision, statistical analysis, final approval of the version to be published.

Shahla N. Aliyeva: writing – original draft.

Fatma H. Huseynova: accountability for all aspects of the work, validation of data accuracy and integrity.

Shahla N. Janahmadova: data analysis and interpretation.

Zivar Z. Abseyanova, Sevinj N. Eyvazli: investigation, data collection, experimental work.

Elgun A. Ismayilova: writing – review & editing.

Shalala M. Babayeva: contributed to the methodology and study design.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Салехов Акиф Эйюб оглы, доктор медицинских наук, зав. отделением Паразитарных и тропических болезней

Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им. В. Ахундова

ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан

akif.salehov@mail.ru

Алиева Шахла Нихан кызы, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории Протозоологии

Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им. В. Ахундова

ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан

shahlaaliyeva1969@gmail.com

Гусейнова Фатма Идаят кызы, кандидат медицинских наук, зав. лабораторией Протозоологии

Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им. В. Ахундова

ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан

huseynova01049@gmail.com

Абсейнова Зивар Заур кызы, научный сотрудник лаборатории Протозоологии

Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им. В. Ахундова

ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан

ziver.abseyanova@mail.ru

Эйвазли Севиндж Нариман кызы, научный сотрудник лаборатории Протозоологии

Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им. В. Ахундова

ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан

sevincesgerova122@gmail.com

Джанахмедова Шахла Нурахмед кызы, кандидат медицинских наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории Гельминтологии
*Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им.
В. Ахундова*
ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан
janahmedova@mail.ru

Исмаилова Эльгюн Аланмед кызы, научный сотрудник лаборатории Энтомологии
*Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им.
В. Ахундова*
ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан
elgunmanafova26@gmail.com

Бабаева Шалала Машадага кызы, научный сотрудник отделения Иммунологии
*Научно-исследовательский институт медицинской профилактики им.
В. Ахундова*
ул. М. Топчубашов, 216, г. Баку, AZ1000, Азербайджан
selale.babayeva.66@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Akif E. Salekhov, Doctor of Medicine, Head of the Department of Parasitic and Tropical Diseases
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
akif.salehov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8132-7823>
ResearcherID: JYV-9188-2024

Shahla N. Aliyeva, PhD in Biology, Senior Researcher of the Protozoology Laboratory
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
shahlaaliyeva1969@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6971-4679>
ResearcherID: JYV-9756-2024

Fatma H. Huseynova, PhD in Medicine, Head of the Protozoology Laboratory
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
huseynova01049@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6805-2302>
ResearcherID: JYJ-9142-2024

Zivar Z. Abseynova, Researcher of the Protozoology Laboratory
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
ziver.abseynova@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1366-0896>
ResearcherID: JVZ-4094-2024

Sevinj N. Eyvazli, Researcher of the Protozoology Laboratory
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
sevincsgerova122@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5045-3176>
ResearcherID: JYV-8917-2024

Shahla N. Janahmadova, PhD in Medicine, Associate Professor, Senior Researcher of the Helminthology Laboratory
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
janahmedova@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3778-4839>
ResearcherID: JYV-8422-2024

Elgun A. Ismayilova, Researcher of the Entomology Laboratory
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
elgunmanafova26@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0829-2881>
ResearcherID: JVZ-4991-2024

Shalala M. Babayeva, Researcher of the Department of Immunology
Scientific Research Institute of Medical Prevention named after V. Akhundov
216, M. Topchubashov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan
selale.babayeva.66@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8530-078X>
ResearcherID: JYV-8428-2024

Поступила 11.12.2025

После рецензирования 15.01.2026

Принята 19.01.2026

Received 11.12.2025

Revised 15.01.2026

Accepted 19.01.2026

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: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1440](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1440)

EDN: [YSTSTM](https://www.edn.ru/YSTSTM)

УДК 316.444; 316.446



Барьеры индивидуальной мобильности людей с инвалидностью в современном обществе

Г.В. Жигунова, Ю.А. Афонькина, Е.В. Скалабан

ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»,

Мурманск, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Социальная мобильность людей с инвалидностью является одним из значимых факторов поддержания социального равновесия в обществе, дающего возможность включаться в жизнь общества маломобильным категориям. Исследование вопросов индивидуальной мобильности обусловлено существующей в российском обществе потребностью в обеспечении условий для субъектной реализации людей с инвалидностью, расширения возможностей их участия в социальных практиках и взаимоотношениях на условиях личной самостоятельности и независимости. Несмотря на принятые в последнее десятилетие в российском обществе законодательные нормы, обеспечивающие реализацию прав людей с инвалидностью, сегодня остается еще множество социальных барьеров индивидуальной мобильности, приводящих к неблагоприятному социальному положению данных лиц, что определило ракурс представленного исследования.

Цель исследования – выявить характеристики и факторы индивидуальной мобильности людей с инвалидностью и провести их оценку в условиях отдельно взятого региона.

Материалы и методы. Исследование проводилось на теоретическом и эмпирическом уровнях на основе институционального и структурно-функционального подходов, с использованием метода полуструктурированного интервью, проведенного в 2025 году среди специалистов Мурманской области, взаимодействующих с людьми, имеющими инвалидность (n=105).

Результаты. Препятствиями индивидуальной мобильности людей с инвалидностью являются несформированность доступной градостроительной среды,

трудности трудоустройства, низкое качество жизни и материального обеспечения, недостаточная активность и адаптированность людей с инвалидностью, а также социально-психологическая неготовность общества к взаимодействию с инвалидами.

Заключение. Полученные данные указывают на внешние и внутренние барьеры индивидуальной мобильности людей с инвалидностью, затрудняющие инклюзивные процессы в России. Результаты имеют прикладное значение для разработки мер по устранению социальных барьеров инвалидности.

Ключевые слова: индивидуальная мобильность; инвалидность; барьеры инвалидности; инклюзивные процессы; доступная среда; социальное положение инвалидов

Для цитирования. Жигунова, Г. В., Афонькина, Ю. А., & Скалабан, Е. В. (2026). Барьеры индивидуальной мобильности людей с инвалидностью в современном обществе. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 522–543. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1440>

Barriers to individual mobility of people with disabilities in modern society

G.V. Zhigunova, Yu.A. Afonkina, E.V. Skalaban

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russian Federation

Abstract

Background. Social mobility of people with disabilities is one of the significant factors in maintaining social balance in society, giving the opportunity to people with limited mobility to join the life of society. The study of individual mobility issues is due to the existing need in Russian society to ensure conditions for the subjective realization of people with disabilities, expanding the opportunities for their participation in social practices and relationships on the terms of personal autonomy and independence. Despite the legislative norms adopted in the last decade in Russian society that ensure the implementation of the rights of people with disabilities, today there are still many social barriers to individual mobility, leading to an unfavorable social situation for these individuals. This determined the perspective of the presented study.

Purpose. To identify the characteristics and factors of individual mobility of people with disabilities and to assess them in the conditions of a particular region.

Materials and methods. The study was conducted at the theoretical and empirical levels based on institutional and structural-functional approaches, using the method of semi-structured interviews conducted in 2025 among specialists of the Murmansk region who interact with people with disabilities (n=105).

Results. Obstacles to individual mobility of people with disabilities include the lack of an accessible urban environment, difficulties in finding employment, low quality of life and material security, insufficient activity and adaptation of people with disabilities, as well as the socio-psychological unpreparedness of society to interact with people with disabilities.

Conclusion. The obtained data indicate external and internal barriers to individual mobility of people with disabilities, which hinder inclusive processes in Russia. The results have practical significance for the development of measures to eliminate social barriers to disability.

Keywords: individual mobility; disability; disability barriers; inclusive processes; accessible environment; social status of disabled people

For citation. Zhigunova, G. V., Afonkina, Yu. A., & Skalaban, E. V. (2026). Barriers to individual mobility of people with disabilities in modern society. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 522–543. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1440>

Введение

Прогрессивная идея социальной инклюзии в современное время нередко становится фактором нарушения сложившихся социальных норм, закрепленных в социальной структуре в течение историко-культурного развития общества. С одной стороны, порождаются новые ролевые модели, ценностные ориентации и векторы социальных взаимодействий, воплощающих идею равенства в правах, возможностей их удовлетворения, доступа к благам и услугам, а с другой, элементы социальной системы приходят в дисбаланс с социальными трансформациями, обостряя противоречия между новыми, инклюзивными практиками людей с инвалидностью и эксклюзивными условиями, сложившимися ранее. Как следствие, нарушается бесшовность инклюзивных практик и своего рода равномерность инклюзии в разных социальных средах. В некоторых из таких сред инклюзивные процессы имеют системный характер, в других они проявляются как отдельные прецеденты, а в-третьих, имеет место лишь формальная инклюзия, скрывающая эксклюзивные контексты.

В данном ключе для разрешения сложившихся противоречий и социального управления инклюзивными процессами научный и практический интерес представляет проблема индивидуальной мобильности лиц с инвалидностью как показатель включенности данной категории в социальные связи и отношения.

В результате признания позиции международного сообщества в отношении людей с инвалидностью и ратификации Конвенции о правах ин-

валидов в 2012 году [1], в Российской Федерации взят курс на полное включение лиц с инвалидностью в социум как самостоятельных и независимых субъектов, что неразрывно связано с процессами индивидуальной мобильности в соответствии с принципами доступности и равных возможностей для всех людей.

Однако в современных исследованиях мобильности людей с инвалидностью на сегодняшний день показана недостаточность формирования мобильной (доступной) городской среды [3; 6; 8; 9], ее универсального и инклюзивного дизайна [12; 20], освещаются проблемы личной и профессиональной самореализации, равенства гражданских прав, удовлетворения различных потребностей людей с инвалидностью [4; 10; 19]. Подобные вопросы поднимаются и за рубежом при оценке роли универсального дизайна и эффективных путей включения людей с инвалидностью в местные сообщества в разных странах [22-24]. Среди факторов, ограничивающих мобильность людей с инвалидностью, отмечаются прежде всего инфраструктурные, транспортные, пространственно-логистические, производственные, коммуникативные и межличностные, затрудняющие как пространственные перемещения, так и достижение желаемого статуса в социальной структуре общества.

В условиях современности мобильность выступает важнейшей характеристикой социальной динамики, включающей более или менее интенсивные социальные перемещения индивидов и социальных групп в стратификационной системе общества в процессе реализации их разнообразных потребностей. Все это подчеркивает актуальность рассматриваемого феномена и требует его детальной концептуализации.

Цель исследования направлена на выявление характеристик и факторов индивидуальной мобильности людей с инвалидностью, а также оценку состояния и барьеров индивидуальной мобильности данной категории граждан в условиях отдельно взятого региона.

Материалы и методы

В ходе исследования феномена индивидуальной мобильности людей с инвалидностью использовались общенаучные методы познания на основе принципов объективности, системности, непротиворечивости, причинности; социологические концепты мобильности в ракурсе институционального и структурно-функционального подходов. Институциональный подход позволил рассматривать индивидуальную мобильность в контексте сложившихся норм и правил взаимодействий в рамках социальных

институтов, структурно-функциональный дал возможность анализировать социальное положение индивидуализированных граждан с учетом социальных функций, реализуемых в той или иной сфере общества.

На эмпирическом уровне авторами в 2025 году было проведено социологическое исследование с использованием метода полужформализованного экспертного интервью, направленного на выявление мнений о факторах и барьерах индивидуальной мобильности людей с инвалидностью на территории Мурманской области. Анализ полученных данных проводился в количественной стратегии с помощью методов математического анализа.

Полужформализованное интервью было проведено среди специалистов социальных учреждений и служб Мурманской области, в своей деятельности взаимодействующих с лицами, имеющими инвалидность. Было опрошено 105 человек, из них 12,4% мужского, 87,6% женского пола, что обусловлено спецификой занятости в социальной сфере. Возраст опрошенных составил: до 30 лет – 9,5%, от 31 до 40 лет – 25,7%, от 41 до 50 лет – 33,3%, старше 50 лет – 31,4%. Эксперты имели преимущественно высшее образование (56,2%), занимали должности специалиста 61,0%, служащего – 19,0%, руководителя – 8,6%, другие – 11,4%. По сферам деятельности респонденты относились в большей мере к системе социальной защиты и социального обслуживания населения (71,4%), сферам образования (9,5%), здравоохранения (8,6%), физкультуры и спорта (4,8%) и культуры (2,9%). По месту проживания опрошенные представляли 11 муниципальных образований региона - города Мурманск (22,9%), Мончегорск (21,0%), Оленегорск (14,3%), Апатиты (11,4%), Североморск (9,5%), Заполярный (2,9%), Кировск (2,9%), Кандалакша (1,9%), Кола (1,9%), городские поселения Умба (6,7%) и Ревда (4,8%).

Результаты

Концептуализация феномена индивидуальной мобильности людей с инвалидностью

Рассматривая мобильность людей с инвалидностью, современные ученые выделяют два взаимосвязанных аспекта - социальный и физический, связывая их с созданием доступной среды для включения инвалидизированных граждан в социум [11, с. 579]. В интегрированном виде такая взаимосвязь выражена в проблеме мобильного гражданства инвалидов как реализации права на передвижение в городской среде [13; 21; 25-26].

Учитывая, что в социологии социальная мобильность понимается как перемещение индивидов, социальных групп или ценностей в стратификацион-

ной системе общества, влекущее за собой изменения их пространственного или статусного положения [16, с. 119], физическая мобильность, по нашему мнению, представляет собой составную часть социальной, а индивидуальная – одну из разновидностей мобильности как социального феномена.

В рамках данного подхода к пониманию мобильности особое значение имеют сложившиеся институциональные рамки и каналы перемещения, толщина и проницаемость социальных перегородок, существующие ограничения и лифты для движения индивидов и групп. Как отмечает Рыбьякова А.В., проницаемость страт отличается в пространственно-временном отношении, а собственно мобильность, так или иначе, всегда сопровождается определенными ограничениями [15, с. 64]. Данные перегородки не одинаковы для людей с различным социальным статусом, социально-демографическими или физическими данными [7, с. 35]. Так, люди с инвалидностью, долгое время находясь в социальной изоляции и воспринимаясь как объекты опеки, были лишены возможности участвовать в жизни своих сообществ, делать карьеру, создавать семьи, то есть осуществлять социальную мобильность [6, с. 2]. Здоровье, таким образом, является не только одним из факторов восходящей мобильности, но и важнейшим условием осуществления мобильности как таковой. Не случайно в современной науке понятие мобильности раскрывается в контекстах справедливости и возможностей, предоставляемых человеку в обществе, способствующих или препятствующих движению индивидов в ходе воплощения в жизнь их притязаний [19, с. 13].

В Конвенции о правах инвалидов [1] понятие индивидуальной мобильности отождествляется, прежде всего, с физическими перемещениями лиц с инвалидностью, осуществляемыми любым способом и с максимально возможной самостоятельностью. Обеспечение самой возможности перемещения индивидов в физическом пространстве позволяет им достигать определенных целей и социальных благ, вступать в социальные связи и взаимодействия с другими людьми, реализовывать свой потенциал и выстраивать индивидуальные жизненные траектории по горизонтали и вертикали, что входит в понятие мобильности социальной.

В данном контексте особый интерес представляет подход к пониманию мобильности Дж. Урри, который определяет это понятие как способность индивидов двигаться, перемещаться в пространстве, изменять социальный статус и географическое положение в стремлениях к лучшей жизни. По мнению ученого, ключевым фактором мобильности является непосредственное взаимодействие с другими людьми, а при отсутствии

возможности к движению у индивида развивается чувство социальной депривации [17, с. 30-33], что существенно для маломобильных людей с инвалидностью. Мобильность, таким образом, позволяет лицам с инвалидностью избежать лишений и одиночества, включаться в социальные взаимодействия и контакты, реализовать свой потенциал путем непосредственного участия в различных сферах деятельности.

Механизмом социальной мобильности выступают социальные лифты, обеспечивающие горизонтальные и вертикальные перемещения индивидов в социуме. В результате анализа положений Конвенции о правах инвалидов, в качестве социальных лифтов индивидуальной мобильности людей с инвалидностью можно выделить содействие индивидуальным траекториям и способам достижения мобильности; доступность устройств, технологий и услуг, облегчающих мобильность; обучение навыкам мобильности; иные аспекты мобильности, в которых нуждаются люди с инвалидностью, среди которых отметим доступность объектов инфраструктуры и услуг, равенство в правах на передвижение, участие в жизни сообщества, обучение, трудовую занятость, брак, саморазвитие; реализация человеческого и творческого потенциала; достаточный жизненный уровень и достойные условия жизни; готовность социума и людей с инвалидностью взаимодействовать друг с другом.

Мобильность осуществляется в определенных социальных условиях и имеет индивидуальную обусловленность, что зачастую упускается из виду в современных исследованиях [15, с. 64]. К последним относится готовность самого индивида к мобильности, определенные намерения в установлении и поддержании социальных связей с другими, статусных притязаниях, получении признания и уважения в своих социальных кругах и т.п.

По результатам анализа факторов индивидуальной мобильности, заключим, что она представляет собой социальное движение человека с инвалидностью внутри (по горизонтали) и между социальными стратами (по вертикали) на основе его самостоятельного выбора, позволяющее изменять его статус в социальной иерархии при выполнении широкого ролевого репертуара в разных социальных средах, который формирует его образ жизни и является показателем институциональной функциональности общества. При этом в фокусе внимания должны находиться как сама возможность перемещений любого порядка с точки зрения имеющихся для этого условий в обществе и способности субъекта, так и готовность мобильного субъекта к движениям и построению своей индивидуальной траектории мобильности с его мотивами, целями и способами их достижения.

Экспертная оценка условий и факторов индивидуальной мобильности людей с инвалидностью на территории Мурманской области

Эмпирическое авторское исследование показало, что инвалидность в большей мере понимается как ограничение – так отметило 52,4% большинство опрошенных, что соответствует существующему в настоящее время в Российской Федерации законодательству, определяющему инвалида как лица, имеющего ограничения жизнедеятельности в силу тех или иных заболеваний [2]. Среди опрошенных имеют место взгляды на инвалидность как на болезнь (19,0%) и на неадаптированность человека к социуму (12,4%), свойственные медицинской модели инвалидности, доминирующей в XX веке с ее патерналистской системой социальной защиты, связывающей инклюзию с успешностью лечения индивидов. Такой подход не требует трансформации социальной среды, что недостаточно в деле включения людей с инвалидностью в общество. Инвалидность через социальные барьеры общества понимают лишь 10,5% экспертов. Данное понимание свойственно социальной модели, определяющей современную социальную политику в отношении людей с инвалидностью в русле положений Конвенции о правах инвалидов (рис. 1).



Рис. 1. Представления экспертов об инвалидности, %

Fig. 1. Experts' views on disability, %

Выявлена статистически значимая связь между сферой трудовой деятельности опрошенных и представлениями об инвалидности (коэффициент Крамера $V = 0.275$). Представления об инвалидности как об ограничении имеют 56,4% опрошенных из сферы социальной защиты, еще 21,8% респондентов из данной сферы считают инвалидность болезнью.

Давая оценку степени включения маломобильных категорий людей с инвалидностью, опрошенные в среднем оценили его на 5,71 баллов из 10-ти возможных. При этом эксперты с высшим образованием оценивают включенность ниже общего среднего значения (совокупная средняя оценка – 5,17), а специалисты со средним специальным образованием оценивают включенность выше (средняя оценка – 6,41). Различия по образованию статистически значимы ($p < 0,05$), что может свидетельствовать о более критичном взгляде людей с высшим образованием на существующие барьеры и инклюзивную политику.

Более половины экспертов считают, что инклюзия людей с инвалидностью в общество в большей мере зависит от самих людей с инвалидностью (55,2%), что подчеркивает необходимость самих людей с инвалидностью быть готовыми к инклюзии. Почти столько же опрошенных (54,3%) приоритет в деле инклюзии отдают государству, а значит принятым на законодательном уровне мерам социальной поддержки и предписанным нормам в рамках социальных институтов в отношении инвалидов. Менее половины (42,9%) отметили значимую роль поддержки близких и родных, 39,0% – общественности, около трети (32,4%) – системы социальных служб, около четверти (24,8%) – состояние системы здравоохранения (рис. 2).

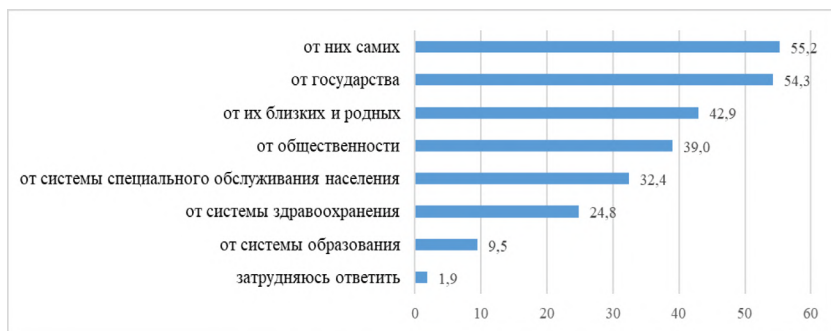


Рис. 2. Представления экспертов о роли социальных институтов, индивидов и групп в деле включения людей с инвалидностью в жизнь общества, %

Fig. 2. Experts' views on the role of social institutions, individuals and groups in the inclusion of people with disabilities in society, %

При этом, оценивая потенциал окружения для оказания помощи в осуществлении индивидуальной мобильности людям с инвалидностью, большие оценки получили специалисты социальных служб и учреждений (4,22 балла из 5-ти), далее следуют семья (3,92), друзья (3,49), коллеги, одно-

классники, одноклассники (3,21). Меньший потенциал имеют, по мнению опрошенных, соседи (2,94) и незнакомые сограждане (2,91) (рис. 3).

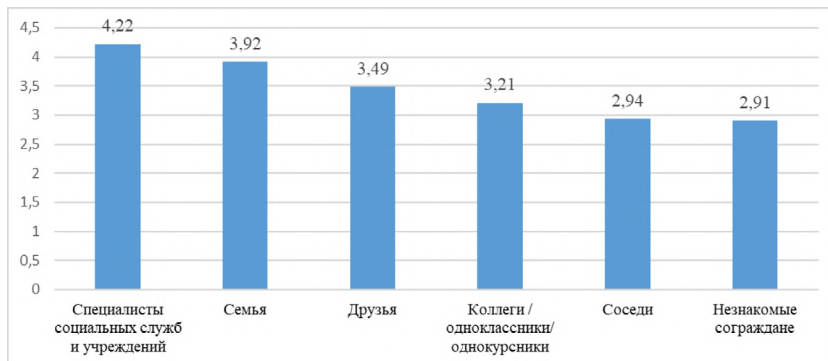


Рис. 3. Оценка экспертами потенциала окружающих людей для оказания помощи в индивидуальной мобильности, средний балл

Fig. 3. Experts' assessment of the potential of people in one's immediate circle to assist with personal mobility, average score

Эксперты отмечают, что основными социальными барьерами, с которыми чаще всего сталкиваются люди с инвалидностью в обществе и конкретно в Мурманской области, выступают трудности перемещения (физическая и пространственная мобильность) (68,6%), материальные трудности, низкое благосостояние (51,4%), трудоустройства и профессиональной самореализации (49,5%). Отмечены также затруднения с получением медицинских услуг (30,5%), построением отношений с окружающими (23,8%) и другие (рис. 4).

Учитывая, что наибольшую сложность для маломобильных граждан в муниципальных образованиях проживания экспертов представляет барьер перемещения, представим также экспертную оценку доступной среды. Средняя оценка доступности инфраструктуры общественных мест Мурманской области составила 3,27 из 5-ти баллов, что немного выше среднего. Среди инфраструктурных барьеров пространственного перемещения маломобильных лиц с инвалидностью на территории проживания экспертов были отмечены в первую очередь сложные маршруты от остановки и дома до объекта (69,5%) и недоступная / неудобная входная группа (48,5%). Часть экспертов отмечала преграды на пути движения внутри объектов (29,5%), отсутствие зрительной информации (21,9%) и тактильных указателей (21,0%) (рис. 5).



Рис. 4. Экспертная оценка социальных барьеров индивидуальной мобильности в Мурманской области, %

Fig. 4. Expert assessment of social barriers to individual mobility in the Murmansk Region, %



Рис. 5. Экспертная оценка инфраструктурных барьеров индивидуальной мобильности лиц с инвалидностью при посещении общественных мест в муниципальных образованиях Мурманской области, %

Fig. 5. Expert assessment of infrastructure barriers to the personal mobility of people with disabilities when visiting public places in municipalities of the Murmansk Region, %

Несмотря на имеющиеся барьеры, экспертами отмечаются динамические изменения в разных социальных средах, произошедшие за последние годы, в результате которых люди с инвалидностью в целом чаще стали встречаться на улицах (61,9%), они имеют сегодня больше возможностей

для коммуникаций и общения с другими людьми (62,0%), получили больше возможностей для получения образования (50,5%), занятий творчеством (50,5%), спортом (37,2%) и активного проведения своего досуга (32,4%). Однако, наряду с положительными тенденциями, примерно треть экспертов отмечает ухудшение в решении сложностей с трудоустройством (35,3%), социальным обеспечением (38,1%), получением медицинских и реабилитационных услуг (32,4%), а также 52,4% считают, что общество тратит недостаточно средств на помощь лицам с инвалидностью, что указывает на необходимость осуществления дальнейшей инклюзивной социальной политики в стране.

Оценивая отношение общества к людям с инвалидностью как важного фактора индивидуальной мобильности, около половины опрошенных (48,5%) считают, что сегодня большинство сограждан относится к людям с инвалидностью как к равным субъектам. Чуть более половины экспертов (51,5%) отмечают, что подавляющая часть населения готова прийти на помощь данным лицам, при этом 62,7% опрошенных отметили значимость помощи и поддержки со стороны окружающих, необходимой для успешной инклюзии лиц с инвалидностью. Наряду с положительными тенденциями, почти третья часть экспертов (32,4%) отметила, что сегодня общество еще не готово к взаимоотношениям с людьми, имеющими инвалидность, а 15,3% указала, что в социуме еще проявляются негативные установки к исследуемой категории.

При выявлении более детальной оценки отношения окружающих к людям с инвалидностью в зависимости от типа нарушения здоровья (по 5-балльной шкале, где 1 – отрицательное, а 5 – положительное), результаты показали менее положительное в отношении к людям с психическими и интеллектуальными нарушениями - средний балл оценок составил 2,76, что ниже средней отметки шкалы. В наиболее благополучной ситуации с точки зрения экспертов находятся люди с нарушениями слуха (3,80 баллов), далее очень близки к ним люди с нарушениями слуха (3,78 баллов) и с опорно-двигательными нарушениями (3,74 балла) (рис. 6).

Средний индекс оценки толерантности населения составил 3,52. Анализ с помощью коэффициента Спирмена показывает умеренную положительную корреляцию между восприятием социальной толерантности и оценкой включенности людей с инвалидностью ($r = 0.35$, $p < 0,001$). Кроме того, выявлена заметно положительная корреляция между восприятием доступности общественных объектов и уровнем социальной толерантности ($r = 0.56$, $p < 0,001$). Полученный результат указывает на взаимосвязь

физической и социальной инклюзии, где создание доступной среды воспринимается как знак уважения и признания, а не только как техническое улучшение. Это говорит о том, что инклюзивная среда формирует инклюзивное общество.

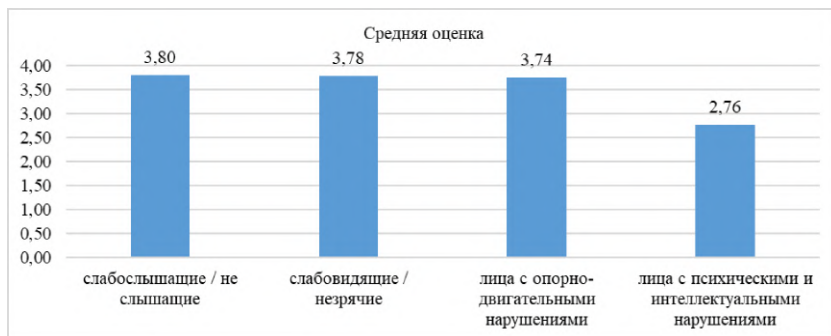


Рис. 6. Экспертная оценка отношения общества к людям с инвалидностью, в зависимости от типов нарушений, средний балл

Fig. 6. Expert assessment of public attitudes toward people with disabilities, by type of disability; average score

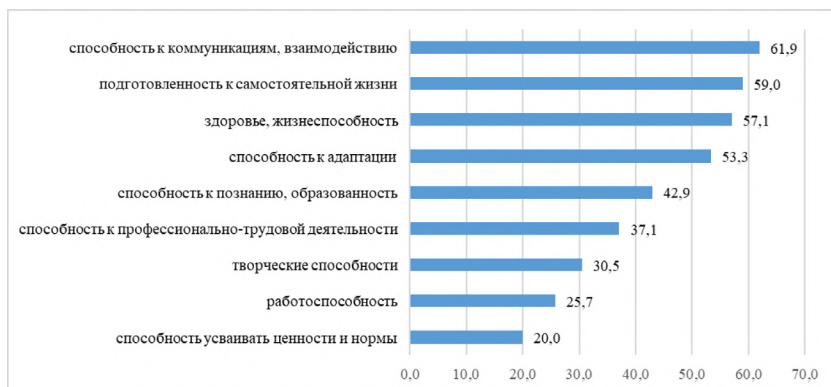


Рис. 7. Экспертная оценка способностей и ресурсов, обуславливающих успешную индивидуальную мобильность людей с инвалидностью, %

Fig. 7. Expert assessment of the abilities and resources that contribute to successful individual mobility for people with disabilities, %

В ходе выявления внутренних факторов индивидуальной мобильности была получена экспертная оценка способностей и ресурсов, от которых, по их мнению, зависит успешная жизнь в обществе маломобильных ка-

тегорий с инвалидностью. Большая часть экспертов отдает ведущую роль способности к коммуникациям (61,9%), подготовленности к самостоятельной жизни (59,0%), состоянию здоровья и жизнеспособности (57,1%) и способности к адаптации (53,3%). Несколько меньшее значение получили способности к познанию, образованности (42,9%), способность к профессиональной деятельности (37,1%), творческие способности (30,5%), еще меньшее значение придается работоспособности и способности усваивать людьми с инвалидностью ценности и нормы (рис. 7).

При этом 47,6% экспертов считают, что люди с инвалидностью лишь частично адаптированы в обществе, а 25,8% отмечают, что они, как правило, пассивны при высокой доле высказавшихся об их частичной пассивности (52,4%).

Обсуждение

Результаты проведенного исследования в целом показывают как наличие проблемных зон в деле индивидуальной мобильности людей с инвалидностью, так и улучшение ситуации по ряду показателей.

В первую очередь, проблематично понимание инвалидности в русле прогрессивных идей социальной модели инвалидности, фокусирующей внимание не на ограничениях, как в российском законодательстве [2], а на социальных барьерах как главного фактора эксклюзии лиц с инвалидностью, свойственного международным нормам [1], на что также обращают внимание современные ученые [10, с. 579]. Учитывая, что институциональное взаимодействие с инвалидизированными гражданами осуществляется в рамках действующего законодательства, очевидно, что более прогрессивное понимание инвалидности будет сформировано только после соответствующих законодательных изменений.

Учитывая многогранность понятия социальной мобильности, подчеркнем неразрывность и взаимосвязанность его различных аспектов, значимость как физической способности индивида к движениям и перемещениям в пространстве, так и перемещений между стратами в процессе изменения статусного положения в обществе. Бесспорно, для осуществления данных перемещений необходимы определенные условия в различных социальных средах [9, с. 234], однако учеными повсеместно отмечается недостаточность созданных условий для участия в жизни общества [4-6; 8-11; 13], в результате чего люди с инвалидностью включены в социальные связи лишь частично.

Полученная средняя оценка включения людей с инвалидностью в социальную жизнь общества коррелирует с данными других исследований [6; 8-9; 13]. По данным В.Н. Ярской-Смирновой и Е.Р. Ярской-Смирновой, в

России до сих пор отмечаются препятствия в реализации прав людей с инвалидностью в результате недоступности социальной среды [20, с. 167]; по результатам исследования О.В. Кучмаевой люди с инвалидностью ограничены в мобильности и испытывают потребность в соответствующей поддержке, которую в основном получают от членов своей семьи [10, с. 105].

Следует отметить еще один барьер индивидуальной мобильности – отношенческий. Подчеркнем, что одна лишь физическая мобильность человека с инвалидностью не приведет к его достаточной самореализации. Место инвалидов в социальной стратификации определяется не только пространственной доступностью, но и доступностью социальных институтов, принятием лиц с инвалидностью как равных другим гражданам, возможностью и готовностью активно участвовать в социальных процессах. В тоже время отметим, что, социально-психологический климат в региональных социумах недостаточно благоприятен по отношению к людям с инвалидностью [5; 14]. Такая ситуация затрудняет индивидуальную социальную мобильность и в определенном смысле обесценивает государственные вложения в обеспечение инклюзии людей с инвалидностью в общество.

Российские ученые среди значимых факторов индивидуальной мобильности людей с инвалидностью указывают адаптивные способности индивидов. По мнению О.Е. Фоминой и С. Б. Гуляева, повышению социальной адаптации людей с инвалидностью на индивидуальном уровне способствует поддержка ближайшего окружения, а на институциональном – создание безбарьерной среды и социальные меры поддержки [18, с. 72].

Отметим, что в понятии индивидуальной мобильности следует, прежде всего, выделить возможности для изменения социального статуса человека с инвалидностью на более или менее благоприятный (вертикальная индивидуальная мобильность); доступность каналов и социальных сред для перемещений в пространстве и в разные социальные группы; возможность смены социальных ролей и связанного с ними репертуара социального поведения (горизонтальная индивидуальная мобильность); личные мотивы и цели индивида, что определяет включение в социальные институты и процессы, происходящие в обществе. Однако на практике в настоящее время указанные векторы движений людей с инвалидностью затруднены целым рядом социальных барьеров, которые в совокупности тормозят инклюзивные процессы в обществе.

Заключение

Проведенное исследование в качестве наиболее существенных барьеров индивидуальной мобильности выявило недоступную инфраструктуру, не выстроенные логистические маршруты для передвижения маломо-

бильных инвалидизированных граждан, сложности трудовой занятости, получения медицинских услуг, материального обеспечения, личностной самореализации в профессиональной и иных сферах. Достаточно существенными сегодня остаются и отношенческие барьеры, выраженные в сложностях выстраивания отношений с социумом и негативных взглядах окружающих, в большей мере к людям с ментальными нарушениями.

Эксперты ведущую роль в инклюзии инвалидизированных граждан отводят субъективно-личностному и государственному уровням. В оценках ресурсов социального окружения лиц с инвалидностью занижен потенциал семейных и дружеских связей по сравнению с государственными службами, что указывает, прежде всего, на значительные ожидания экспертов от реабилитационных программ и существующих социальных программ.

Наиболее значимыми личностными факторами индивидуальной мобильности людей с инвалидностью, по мнению экспертов, являются коммуникативные способности, подготовленность к самостоятельной жизни, состояние здоровья и способность к адаптации. Ресурсам, связанным со способностями к профессиональному труду, творчеству, в целом работоспособности и усвоению ценностей и норм, отводится незначительная роль, что свидетельствует о невысоких ожиданиях в данных видах деятельности от людей с инвалидностью. Эксперты отмечают недостаточную адаптированность и активность самих лиц с инвалидностью в обществе, что составляет дополнительные сложности в случае самостоятельного осуществления вертикальных и горизонтальных движений в социуме данной категории.

Выявлена взаимосвязь физической и социальной составляющих инклюзии, при которой очевидно, что доступная среда формирует инклюзивное общество.

Полученные данные показывают исключительную значимость формирования личностных потенциалов и институциональных условий в деле повышения индивидуальной мобильности людей с инвалидностью, регулируемых на государственном уровне, с привлечением ресурсов социальных служб, ближайшего окружения и общественности.

Заключение комитета по этике. Данный вид исследования не требует прохождения экспертизы локальным этическим комитетом.

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

Информация о конфликте интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда и Министерства образования и науки Мурманской области в рамках проекта № 25-28-20380.

Список литературы

1. Конвенция о правах инвалидов. Принята резолюцией 61/106 Генеральной Ассамблеи ООН от 13 декабря 2006 года. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/disability.shtml (дата обращения: 01.09.2025).
2. Федеральный закон от 24.11.1995 N 181-ФЗ (ред. от 29.10.2024) «О социальной защите инвалидов в Российской Федерации» (дата обращения: 01.09.2025).
3. Бессчетнова, О. В., & Матвеев, Д. А. (2023). Общественный транспорт глазами лиц с инвалидностью: агрессивная среда vs инклюзия. *Человек. Общество. Инклюзия*, 1(53), 8–17. EDN: <https://elibrary.ru/FUKDFW>
4. Егоров, Е. В. (2022). Формирование безбарьерной городской среды и проблемы трудовой интеграции инвалидов в России. *Уровень жизни населения регионов России*, 18(4), 535–544. <https://doi.org/10.19181/lspr.2022.18.4.9>. EDN: <https://elibrary.ru/LQJYMV>
5. Жигунова, Г. В., & Ткаченко, И. Л. (2019). Отношенческие барьеры инвалидности в социуме. *Вестник университета*, 5, 182–188. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2019-5-182-188>. EDN: <https://elibrary.ru/NYRTAE>
6. Жигунова, Г. В. (2019). Условия для независимой жизни людей, имеющих инвалидность (по результатам исследования). *Baikal Research Journal*, 10(4), 1–8. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2019.10\(4\).2](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2019.10(4).2). EDN: <https://elibrary.ru/UBMSGC>
7. Каравай, А. В. (2018). Факторы доходной стратификации российского общества: роль структурных барьеров на пути восходящей доходной мобильности. *Социологическая наука и социальная практика*, 2(2), 34–51. <https://doi.org/10.19181/snsp.2018.6.2.5855>. EDN: <https://elibrary.ru/UTCGCJ>
8. Кудрявцева, С. Н., & Козыренко, И. С. (2021). Безбарьерная среда: мифы и реальность. *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*, 1(1), 383–388. EDN: <https://elibrary.ru/LNHZGV>
9. Курганова, К. И. (2023). Проблемы формирования доступной среды для инвалидов и маломобильных групп населения. *Журнал правовых и экономических исследований*, 1, 230–235. <https://doi.org/10.26163/GIEF.2023.17.82.032>. EDN: <https://elibrary.ru/CEHXDR>
10. Кучмаева, О. В., Махова, О. А., & Клочкова, Е. Н. (2019). Мобильность инвалидов: статистическая характеристика ситуации. *Государственная служба*, 3(119), 101–106. <https://doi.org/10.22394/2070-8378-2019-21-3-101-106>. EDN: <https://elibrary.ru/PVWTSQ>

11. Кучмаева, О. В. (2018). Мобильность инвалидов: проблемы и пути решения (по результатам выборочного обследования). В *Демографическая и семейная политика в контексте целей устойчивого развития: сборник статей IX Уральского демографического форума* (Том 1, с. 578–592). Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН. EDN: <https://elibrary.ru/BMOCYS>
12. Мухаметзянова, А. Р. (2025). Универсальный дизайн в системе независимой оценки доступности услуг для людей с инвалидностью. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*, 1(64), 87–92. <https://doi.org/10.25628/UNIP.2025.64.1.031>. EDN: <https://elibrary.ru/LHBYXJ>
13. Наберушкина, Э. К. (2013). *Мобильное гражданство инвалидов в социальном пространстве города*. Саратов. 605 с.
14. Перепада, С. М., Перепада, О. А., & Минина, А. А. (2021). Средовые и отношенческие барьеры в свете государственной программы «Доступная среда», а также о дискриминации по признаку инвалидности. *Право и государство: теория и практика*, 4(196), 108–110. https://doi.org/10.47643/1815-1337_2021_4_108. EDN: <https://elibrary.ru/SSJFUV>
15. Рыбьякова, А. В. (2020). Социологическая трактовка идеи социальной мобильности. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки*, 2, 59–70. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.5>. EDN: <https://elibrary.ru/GRFAHD>
16. Сорокин, П. А. (2005). *Социальная мобильность*. Москва: Academia. ISBN: 5-87444-221-9. EDN: <https://elibrary.ru/QOEGUT>
17. Урри, Дж. (2012). *Мобильности* / пер. с англ. А. В. Лазарева. Москва: Практис. 576 с. EDN: <https://elibrary.ru/PGJYNR>
18. Фомина, О. Е., & Гуляев, С. Б. (2024). Проблемы и перспективы социальной адаптации инвалидов в малых городах России: по результатам авторского исследования. *Logos et Praxis*, 23(1), 62–74. <https://doi.org/10.15688/lp.jvolsu.2024.1.7>. EDN: <https://elibrary.ru/RNAPDU>
19. Черныш, М. Ф. (2018). Концепт социальной мобильности в меняющихся обществах. *Социологические исследования*, 7, 13–23. <https://doi.org/10.31857/S013216250000194-6>. EDN: <https://elibrary.ru/VJUZEА>
20. Чистый, С. В. (2021). Вопросы проектирования безбарьерных городов. Роль архитектурного образования и конкурсного проектирования в области универсального дизайна. *Доступная среда*, 2, 60–70. EDN: <https://elibrary.ru/NFDIZM>
21. Ярская-Смирнова, В. Н., & Ярская-Смирнова, Е. Р. (2018). Право на город в парадигме мобильности. *Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология*, 45, 165–173. <https://doi.org/10.17223/1998863>. EDN: <https://elibrary.ru/YRWWMF>

22. Boland, G., Paor, E., & Guerin, S. (2023). Living in localities: The factors that influence the social inclusion in neighborhoods of adults with intellectual disability: A systematic scoping review. *Inclusion*, 11(1), 55–77. <https://doi.org/10.1352/2326-6988-11.1.55>. EDN: <https://elibrary.ru/FACRRE>
23. Jones, P. (2014). Situating universal design architecture: Designing with whom? *Disability Rehabilitation*, 36(16), 1369–1374. <https://doi.org/10.3109/09638288.2014.944274>
24. Kaley, A., Donnelly, J. P., Donnelly, L., Humphrey, S., Reilly, S., Macpherson, H., Hall, E., & Power, A. (2021). Researching belonging with people with learning disabilities: Self-building active community lives in the context of personalisation. *British Journal of Learning Disabilities*, 50(3), 307–320. <https://doi.org/10.1111/bld.12394>. EDN: <https://elibrary.ru/BKDSVN>
25. Sépulchre, M. (2020). Ensuring equal citizenship for disabled people: A matter of rights or a matter of costs? *ALTER, European Journal of Disability Research*, 14(2), 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.alter.2020.03.001>. EDN: <https://elibrary.ru/MXWPWY>
26. Darcy, S., Maxwell, H., & Green, J. (2016). Disability citizenship and independence through mobile technology? A study exploring adoption and use of a mobile technology platform. *Disability & Society*, 31(4), 497–519. <https://doi.org/10.1080/09687599.2016.1179172>

References

1. Convention on the Rights of Persons with Disabilities. Adopted by UN General Assembly resolution 61/106 of December 13, 2006. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/disability.shtml (accessed: 01.09.2025).
2. Federal Law No. 181-FZ of November 24, 1995 (as amended on October 29, 2024) “On Social Protection of Persons with Disabilities in the Russian Federation” (accessed: 01.09.2025).
3. Besschetnova, O. V., & Matveev, D. A. (2023). Public transport through the eyes of persons with disabilities: Aggressive environment vs. inclusion. *Human. Society. Inclusion*, 1(53), 8–17. EDN: <https://elibrary.ru/FUKDFW>
4. Egorov, E. V. (2022). Formation of a barrier-free urban environment and problems of labor integration of persons with disabilities in Russia. *Living Standards of the Population in the Regions of Russia*, 18(4), 535–544. <https://doi.org/10.19181/lsprr.2022.18.4.9>. EDN: <https://elibrary.ru/LQJYMV>
5. Zhigunova, G. V., & Tkachenko, I. L. (2019). Relational barriers of disability in society. *University Herald*, 5, 182–188. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2019-5-182-188>. EDN: <https://elibrary.ru/NYRTAE>
6. Zhigunova, G. V. (2019). Conditions for independent living of persons with disabilities (based on research results). *Baikal Research Journal*, 10(4), 1–8. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2019.10\(4\).2](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2019.10(4).2). EDN: <https://elibrary.ru/UBMSGC>

7. Karavay, A. V. (2018). Factors of income stratification of Russian society: The role of structural barriers on the path of upward income mobility. *Sociological Science and Social Practice*, 2(2), 34–51. <https://doi.org/10.19181/snsp.2018.6.2.5855>. EDN: <https://elibrary.ru/UTCGCJ>
8. Kudryavtseva, S. N., & Kozyrenko, I. S. (2021). Barrier-free environment: Myths and reality. *Far East: Problems of Development of the Architectural and Construction Complex*, 1(1), 383–388. EDN: <https://elibrary.ru/LNHZGV>
9. Kurganova, K. I. (2023). Problems of forming an accessible environment for persons with disabilities and low-mobility population groups. *Journal of Legal and Economic Studies*, 1, 230–235. <https://doi.org/10.26163/GIEF.2023.17.82.032>. EDN: <https://elibrary.ru/CEHXDR>
10. Kuchmaeva, O. V., Makhova, O. A., & Klochkova, E. N. (2019). Mobility of persons with disabilities: A statistical characterization of the situation. *Civil Service*, 3(119), 101–106. <https://doi.org/10.22394/2070-8378-2019-21-3-101-106>. EDN: <https://elibrary.ru/PVWTSQ>
11. Kuchmaeva, O. V. (2018). Mobility of persons with disabilities: Problems and solutions (based on sample survey results). In *Demographic and family policy in the context of sustainable development goals: Collection of articles of the 9th Ural Demographic Forum* (Vol. 1, pp. 578–592). Yekaterinburg: Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. EDN: <https://elibrary.ru/BMOCYS>
12. Mukhametzyanova, A. R. (2025). Universal design in the system of independent assessment of service accessibility for persons with disabilities. *Academic Bulletin of UralNIIPROJECT RAASN*, 1(64), 87–92. <https://doi.org/10.25628/UNIIP.2025.64.1.031>. EDN: <https://elibrary.ru/LHBYXJ>
13. Naberushkina, E. K. (2013). *Mobile citizenship of persons with disabilities in the social space of the city*. Saratov. 605 p.
14. Perepadya, S. M., Perepadya, O. A., & Minina, A. A. (2021). Environmental and relational barriers in light of the state program “Accessible Environment,” as well as on discrimination based on disability. *Law and State: Theory and Practice*, 4(196), 108–110. https://doi.org/10.47643/1815-1337_2021_4_108. EDN: <https://elibrary.ru/SSJFUV>
15. Rybakova, A. V. (2020). Sociological interpretation of the idea of social mobility. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Socio-Economic Sciences*, 2, 59–70. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.5>. EDN: <https://elibrary.ru/GRFAHD>
16. Sorokin, P. A. (2005). *Social mobility*. Moscow: Academia. ISBN: 5-87444-221-9. EDN: <https://elibrary.ru/QOEGUT>
17. Urry, J. (2012). *Mobilities* (A. V. Lazarev, Trans.). Moscow: Praksis. 576 p. EDN: <https://elibrary.ru/PGJYNR>
18. Fomina, O. E., & Gulyaev, S. B. (2024). Problems and prospects of social adaptation of persons with disabilities in small cities of Russia: Based on the author’s research.

- Logos et Praxis*, 23(1), 62–74. <https://doi.org/10.15688/lp.jvolsu.2024.1.7>. EDN: <https://elibrary.ru/RNAPDU>
19. Chernysh, M. F. (2018). The concept of social mobility in changing societies. *Sociological Studies*, 7, 13–23. <https://doi.org/10.31857/S013216250000194-6>. EDN: <https://elibrary.ru/VJUZEА>
20. Chisty, S. V. (2021). Issues of designing barrier-free cities. The role of architectural education and competitive design in the field of universal design. *Accessible Environment*, 2, 60–70. EDN: <https://elibrary.ru/NFDIZM>
21. Yarskaya-Smirnova, V. N., & Yarskaya-Smirnova, E. R. (2018). The right to the city in the paradigm of mobility. *Bulletin of Tomsk State University: Philosophy. Sociology. Political Science*, 45, 165–173. <https://doi.org/10.17223/1998863>. EDN: <https://elibrary.ru/YRWWMР>
22. Boland, G., Paor, E., & Guerin, S. (2023). Living in localities: The factors that influence the social inclusion in neighborhoods of adults with intellectual disability: A systematic scoping review. *Inclusion*, 11(1), 55–77. <https://doi.org/10.1352/2326-6988-11.1.55>. EDN: <https://elibrary.ru/FACRRE>
23. Jones, P. (2014). Situating universal design architecture: Designing with whom? *Disability Rehabilitation*, 36(16), 1369–1374. <https://doi.org/10.3109/09638288.2014.944274>
24. Kaley, A., Donnelly, J. P., Donnelly, L., Humphrey, S., Reilly, S., Macpherson, H., Hall, E., & Power, A. (2021). Researching belonging with people with learning disabilities: Self-building active community lives in the context of personalisation. *British Journal of Learning Disabilities*, 50(3), 307–320. <https://doi.org/10.1111/bld.12394>. EDN: <https://elibrary.ru/BKDSVN>
25. Sépulchre, M. (2020). Ensuring equal citizenship for disabled people: A matter of rights or a matter of costs? *ALTER, European Journal of Disability Research*, 14(2), 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.alter.2020.03.001>. EDN: <https://elibrary.ru/MXWPWY>
26. Darcy, S., Maxwell, H., & Green, J. (2016). Disability citizenship and independence through mobile technology? A study exploring adoption and use of a mobile technology platform. *Disability & Society*, 31(4), 497–519. <https://doi.org/10.1080/09687599.2016.1179172>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Жигунова Галина Владимировна, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой философии и социальных наук
ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»
ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010, Российская Федерация
galina-zhigunova@yandex.ru

Афонькина Юлия Александровна, доктор социологических наук, доцент, заведующий кафедрой психологии и коррекционной педагогики

*ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»
ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010, Российская Федерация
julia3141@rambler.ru*

Скалабан Екатерина Владимировна, стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Анализ данных и искусственный интеллект в арктических исследованиях»

*ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»
ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010, Российская Федерация
e.v.skalaban@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Galina V. Zhigunova, Doctor of Sociological Sciences, Professor, Head of the Department of Philosophy and Social Science

*Murmansk Arctic University
13, Sportivnaya Str., Murmansk, 183010, Russian Federation
galina-zhigunova@yandex.ru
SPIN-code: 4554-0448
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7981-9278>
ResearcherID: D-6997-2014
Scopus Author ID: 57217131539*

Yulia A. Afonykina, Doctor of Sociological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Psychology and Correctional Pedagogics

*Murmansk Arctic University
13, Sportivnaya Str., Murmansk, 183010, Russian Federation
julia3141@rambler.ru
SPIN-code: 3952-2694
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4147-0634>
ResearcherID: G-8843-2015
Scopus Author ID: 57190568228*

Ekaterina V. Skalaban, Research Intern at the Research Laboratory “Data Analysis and Artificial Intelligence in Arctic Research”

*Murmansk Arctic University
13, Sportivnaya Str., Murmansk, 183010, Russian Federation
e.v.skalaban@gmail.com
SPIN-code: 5479-0666*

Поступила 08.09.2025

После рецензирования 15.11.2025

Принята 18.11.2025

Received 08.09.2025

Revised 15.11.2025

Accepted 18.11.2025

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: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1794](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1794)

EDN: [YURZPO](https://www.edn.ru/yurzpo)

УДК 614.2



Применение форсайт-технологий в межведомственном взаимодействии региона для повышения эффективности наркопрофилактики

А.В. Ахохова^{1,2}, З.З. Урусова³, М.Т. Кубачева⁴,
М.А. Мусукова¹, И.Б. Айдамирова¹

¹Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Российская Федерация

²Государственное бюджетное учреждение здравоохранения
«Республиканский клинический центр психиатрии и наркологии»
Минздрава КБР, Нальчик, Российская Федерация

³ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России
(Пироговский Университет), Москва, Российская Федерация

⁴ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России, Владикавказ, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Применение форсайт-технологий как метода научного прогнозирования и стратегического планирования обеспечивает возможность комплексного анализа будущих тенденций, раннего выявления потенциальных угроз и своевременного использования «окон возможностей».

В контексте противодействия наркомании это приобретает особую значимость, поскольку данное явление характеризуется высокой скоростью трансформации, междисциплинарной сложностью и существенным уровнем социальной опасности.

Целью исследования является определение потенциала применения Форсайт-технологий в противодействии наркомании на региональном уровне для выявления долгосрочных тенденций, прогнозирования рисков и «окон возможностей», разработки стратегических сценариев, направленных на повышение эффективности профилактических, медицинских и социальных мер.

Материалы и методы. Анализ российских научных публикаций выявил отсутствие системных исследований, посвященных применению форсайт-подхода к про-

блеме противодействия наркомании. Использованы аналитический обзор научной литературы, сравнительно-сопоставительный анализ отечественного и международного опыта, а также элементы сценарного планирования и системного анализа. Отсутствие отечественных работ в данной нише подтверждает наличие познавательного пробела и актуальность адаптации методологии к антинаркотической системе России.

Результаты. Для структурирования результатов предложено создание «форсайт-ячейки» как организационно-аналитической формы экспертного взаимодействия в сфере антинаркотической профилактики. «Форсайт-ячейка» – целевая рабочая группа, выполняющая функцию прогнозирования, системного анализа и разработки стратегий в сфере антинаркотической профилактики. Такая структура может стать инструментом интеграции научного познания, экспертных оценок и межведомственного взаимодействия.

Заключение. Настоящее исследование, способствует формированию общего понимания, а не только уточнению терминологии, а также закладывает основу для будущих инициатив по созданию единой научной базы применения форсайт-технологий в антинаркотической политике. Это позволит обеспечить более чёткую, согласованную и долгосрочную направленность действий на региональном и федеральном уровнях.

Ключевые слова: форсайт-технологии; противодействие наркомании; стратегическое планирование; прогнозирование рисков; окна возможностей; региональный уровень; антинаркотическая профилактика; форсайт-ячейка

Для цитирования. Ахохова, А. В., Урусова, З. З., Кубачева, М. Т., Мусукова, М. А., & Айдамирова, И. Б. (2026). Применение форсайт-технологий в межведомственном взаимодействии региона для повышения эффективности наркопрофилактики. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 544–566. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1794>

Application of foresight technologies in interdepartmental interaction of the region to enhance the efficiency of drug prevention

A.V. Akhokhova^{1,2}, Z.Z. Urusova³, M.T. Kubacheva⁴,
M.A. Musukova¹, I.B. Aidamirova¹

¹Kabardino-Balkarian State University

named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russian Federation

²Republican Clinical Center for Psychiatry and Narcology, Nalchik, Russian Federation

³Pirogov University, Moscow, Russian Federation

⁴North Ossetian State Medical Academy, Vladikavkaz, Russian Federation

Abstract

Background. The use of Foresight technologies as a method of scientific forecasting and strategic planning provides the opportunity for a comprehensive analysis

of future trends, early detection of potential threats and timely use of “windows of opportunity”.

In the context of combating drug addiction, this is of particular importance, since a high rate of transformation, interdisciplinary complexity and a significant level of social danger characterize this phenomenon.

The **purpose** of the study is to determine the potential for the use of Foresight technologies in combating drug addiction at the regional level to identify long-term trends, predict risks and “windows of opportunity”, and develop strategic scenarios aimed at increasing the effectiveness of preventive, medical and social measures.

Materials and methods. An analysis of Russian scientific publications revealed the absence of systemic studies devoted to the use of the Foresight approach to the problem of combating drug addiction. An analytical review of scientific literature, a comparative analysis of domestic and international experience, as well as elements of scenario planning and systems analysis were used. The absence of domestic works in this niche confirms the existence of a cognitive gap and the relevance of adapting the methodology to the anti-drug system of Russia.

Results. To structure the results, it is proposed to create a “Foresight cell” as an organizational and analytical form of expert interaction in the field of anti-drug prevention. “Foresight cell” is a target-working group that performs the function of forecasting, systems analysis and development of strategies in the field of anti-drug prevention. Such a structure can become a tool for integrating scientific knowledge, expert assessments and interdepartmental interaction.

Conclusion. This study contributes to the formation of a common understanding, and not just clarification of terminology, and lays the foundation for future initiatives to create a unified scientific base for the use of Foresight technologies in anti-drug policy. This will ensure a clearer, more coordinated and long-term focus of actions at the regional and federal levels.

Keywords: foresight technologies; drug addiction prevention; strategic planning; risk forecasting; windows of opportunity; regional level; drug prevention; foresight cell

For citation. Akhokhova, A. V., Urusova, Z. Z., Kubacheva, M. T., Musukova, M. A., & Aidamirova, I. B. (2026). Application of foresight technologies in interdepartmental interaction of the region to enhance the efficiency of drug prevention. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 544–566. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1794>

Введение

Форсайт как метод научного прогнозирования и стратегического планирования обеспечивает возможность системного анализа будущих тен-

денций, выявления потенциальных рисков и «окон возможностей». Это особенно важно в сфере противодействия наркомании, поскольку данное явление отличается высокой динамикой, сложной многофакторностью и значительной социальной опасностью.

Использование форсайт-подхода позволяет не только предвидеть угрозы, но и заблаговременно формировать эффективные профилактические меры и стратегии адаптации к меняющимся условиям [11].

Форсайт-технологии принципиально отличаются от традиционных методов научного предвидения тем, что они не ограничиваются построением прогнозов, а предполагают широкое участие заинтересованных сторон (государственных структур, экспертного сообщества, гражданского общества) в выработке будущих сценариев [20].

В сфере наркопрофилактики это означает не только совместное определение возможных траекторий развития ситуации, но и активное вовлечение субъектов в реализацию предсказываемых изменений, что превращает участников процесса из пассивных наблюдателей в непосредственных участников будущего [27].

По результатам поиска в российских научных трудах применение форсайт-подхода в сфере противодействия наркомании, исследований не найдено. В отечественных материалах в основном преобладают отчёты и оценочные документы, однако они менее систематизированы по сравнению с форсайт-исследованиями.

Поэтому целью изучения стало определение потенциала применения Форсайт-технологий в противодействии наркомании на региональном уровне с целью выявления долгосрочных тенденций, прогнозирования рисков и «окон возможностей», а также разработки стратегических сценариев, направленных на повышение эффективности профилактических, медицинских и социальных мер.

Цель, задачи и ожидаемые результаты исследования применения форсайт-технологий в противодействии наркомании на региональном уровне можно схематично представить на рис. 1.

Цель и задачи выстраивают и задают логистическую направленность процессов: от анализа, через прогнозирование, к выработке сценариев к конкретным решениям и системе мониторинга наркоситуации.

Форсайт-технологии принципиально отличаются от традиционных методов научного предвидения тем, что они не ограничиваются построением прогнозов, а предполагают широкое участие заинтересованных сторон, акторов (государственных структур, экспертного сообщества, гражданского общества) для выработки будущих сценариев.



Рис. 1. Цель, задачи, ожидаемый результат применения форсайт-технологий в сфере наркопрофилактики. Источник: составлено автором

Fig. 1. Purpose, Objectives, and Expected Outcomes of Applying Foresight Technologies in Drug Prevention. Source: Compiled by the author

В сфере наркопрофилактики это означает не только совместное определение возможных траекторий развития ситуации, но и активное вовлечение субъектов в реализацию предсказываемых изменений, что превращает участников процесса из пассивных наблюдателей в соавторов будущего.

Основное отличие форсайта от традиционного прогнозирования заключается в том, что последнее чаще осуществляется экспертами в формате «сверху вниз», тогда как Форсайт строится на принципах диалога, участия широкого круга заинтересованных сторон и достижения консенсуса относительно возможных сценариев будущего [2]. Автор подчеркивает [15], что форсайт – это не прогноз «для заказчика», а согласованное видение будущего, возникающее в процессе коммуникации. В свою очередь, цифровые ресурсы являются эффективным средством формирования коммуникативных навыков врачей [12].

Таким образом, форсайт отличается от прогнозирования своей процедурой (диалог и вовлечение), результатом (множественные сценарии вместо одного прогноза) и целью (создание согласованного видения будущего и стратегических ориентиров). Для визуализации отличий авторами представлена табл. 1.

Таблица 1.

**Сравнительная характеристика традиционного прогнозирования
и форсайта в наркопрофилактике**

Table 1. A Comparative Analysis of Traditional Forecasting and Foresight in Drug Prevention

Элемент	Прогнозирование	Форсайт
Суть под- хода	Линейная экстраполяция прошлых данных и тенденций. Основан на предположении стабильности трендов	Сценарное моделирование альтернативных траекторий, формирование желаемого будущего
Методология	Часто применяются количественные модели, Delphi, экстраполяции	Применяется Rapid Foresight, Horizon Scanning, Delphi, сценарный анализ
Участники	Ограниченный круг экспертов	Широкий круг: государство, НКО, образование, СМИ, молодежь и др. Участники создают и реализуют будущие сценарии
Характер участия	Пассивное восприятие прогнозов	Активное участие в реализации предсказанных изменений
Применение в наркопрофилактике	Анализ статистики наркопотребления и построение тенденций	Создание согласованной системы мер (образовательных, медицинских, правовых, социальных), где сами участники (например, молодежные организации) берут на себя роль проводников изменений
Горизонт времени	Среднесрочный (до 5 лет)	Средне- и долгосрочный (10–20 лет), внимание к слабым сигналам и окнам возможностей
Влияние на практику, результаты	Прогнозы остаются в аналитических отчетах	Результаты трансформируются в стратегии, дорожные карты, программы профилактики

Еще одним из ключевых отличий форсайта от традиционного прогнозирования является его *многосубъектность*. В классическом прогнозировании участвует ограниченный круг экспертов, которые строят вероятностные сценарии будущего. В форсайт-подходе принципиально важно вовлечение максимально широкого круга заинтересованных сторон, так как будущее формируется совместными усилиями.

В контексте задач наркопрофилактики это означает, что в разработку и реализацию сценариев должно быть включено максимальное количество субъектов профилактики, представленных на рис. 2.



Рис. 2. Субъекты наркопрофилактики в контексте многоаспектности

Источник: составлено автором

Fig. 2. Stakeholders in drug prevention in the context of a multifaceted approach

Source: Compiled by the author

Такое участие обеспечивает согласованность действий и делает форсайт не просто инструментом экспертного прогнозирования, а механизмом социальной кооперации и самоорганизации. Многосубъектность позволяет создавать стратегии, которые учитывают разные интересы, повышают легитимность решений и укрепляют готовность общества к совместной реализации профилактических мер.

Исследователь [29] подчёркивает, что форсайт – это не только методология построения сценариев, но и процесс, ориентированный на «ко-конструкцию будущего», где разные социальные акторы становятся соавторами будущих изменений.

В статье ученых [23] указывается, что форсайт, как процесс включает более активные, стратегические и ориентированные на участие стадии, чем простейший «horizon scanning», который служит лишь отправной точкой. При этом *активная реализация* трансформирует участников из пассивных наблюдателей в соавторов изменений, что наделяет форсайт ценностью для наркопрофилактики, где успех зависит от совместных действий общества и государства.

Традиционное прогнозирование в сфере наркопрофилактики основывается на статистическом анализе и экстраполяции существующих

тенденций, где главной задачей является формирование вероятных сценариев развития ситуации на основе уже имеющихся данных. Такой подход имеет ограниченный горизонт (обычно до пяти лет) и ориентирован на работу узкого круга экспертов, которые формируют прогноз «сверху вниз». Примером может служить прогноз увеличения потребления синтетических наркотиков среди молодежи на определенный процент к конкретному году.

По мнению [19] «... в отличие от данного подхода, характеризующегося ограниченным горизонтом прогнозирования (обычно до пяти лет) и формированием прогноза узким кругом экспертов по принципу «сверху вниз», Форсайт ориентирован на долгосрочную перспективу (10–30 лет), широкое участие заинтересованных сторон и выработку согласованных сценариев «снизу-вверх».

В отличие от изложенного, форсайт-технологии представляют собой сценарное моделирование будущего, которое акцентируется на альтернативных траекториях развития и предполагает формирование «желаемого будущего». Форсайт работает на средне- и долгосрочную перспективу (10–20 лет), уделяет внимание «слабым сигналам» и «окнам возможностей» и чаще всего воплощается в конкретные стратегии, дорожные карты и программы профилактики.

Применение методологии форсайта на региональном уровне должна строиться с использованием системного анализа тенденций, вовлечении всех уровней (от правительства до молодёжи), формировании сценариев будущего и закреплении дорожных карт с KPI [21], что позволит управлять наркоситуацией не реактивно, а проактивно.

Визуальная схема шагов форсайт-методологии для наркопрофилактики на уровне регионе (Кабардино-Балкарской Республики) от постановки целей до институционализации и KPI представлена на рис. 3.

Сама методология Форсайта в наркопрофилактике на региональном уровне базируется на принципах, учитывающих специфику региона, принимая во внимание этнокультурные и социально-экономические особенности субъекта РФ.

Принципы системности (медицинские, социальные, правовые, экономические факторы наркопотребления); партисипативности – вовлечение всех заинтересованных сторон (госорганы, здравоохранение, образование, молодежные организации, НКО); сценарности, т.е. построение альтернативных сценариев будущего обеспечивают комплексное видение наркоситуации.

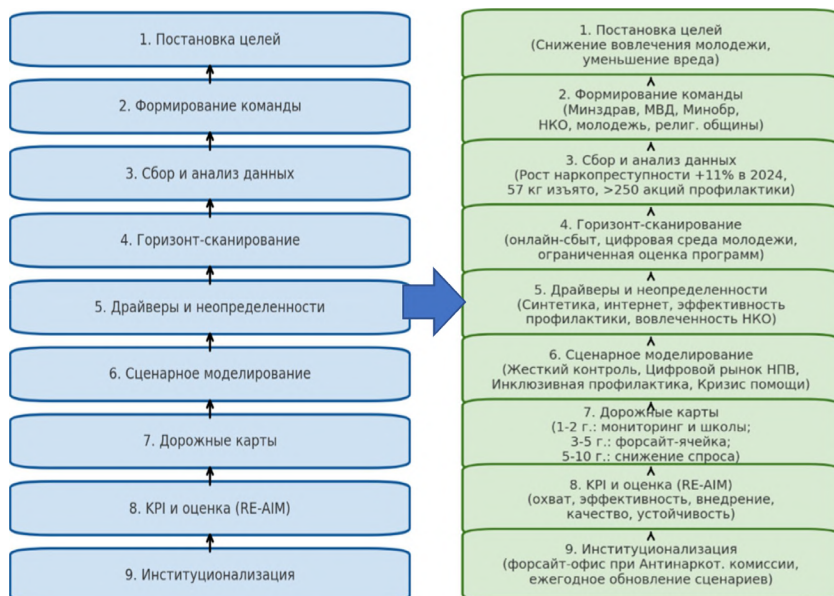


Рис. 3. Визуальная схема шагов форсайт-методологии для наркопрофилактики в регионе. Источник: составлено автором

Fig. 3. Visual diagram of the steps in the foresight methodology for drug prevention in the region. Source: Compiled by the author

Таким образом, миссия принципов форсайта наркопрофилактики в регионе заключается в создании согласованного, научно обоснованного и реалистичного прогноза, учитывающего специфику региона и вовлекающего все ключевые силы субъекта в совместные действия против наркотизации общества, которые можно представить в виде табл. 2.

Как следует из таблицы, форсайт-технологии позволяют системно структурировать меры профилактики наркомании в регионе. Таблица демонстрирует, что каждый этап (от постановки целей до институционализации) имеет конкретное содержание, практическую привязку к региону КБР и опору, базирующуюся на научных источниках. Это подтверждает возможность перевода абстрактного прогнозирования в конкретные шаги региональной политики.

Ключевое значение имеет межведомственное взаимодействие, и форсайт-подход в данном контексте выступает в качестве коммуникационной платформы. Формирование команды (этап 2) и институционализация

(этап 9) показывают, что устойчивый эффект достигается только при объединении усилий субъектами профилактики: Минздрава, Минобрнауки, МВД и общественных организаций.

Таблица 2.

Форсайт-методология наркопрофилактики на региональном уровне (КБР)**Table 2. Foresight Methodology for Drug Prevention at the Regional Level (KBR)**

Этап/ Шаг	Содержание	Пример, учитывая данные наркоситуации по КБР	Источники
1. По- становка целей	Горизонт 5–10 лет, снижение вовле- чения молодёжи, уменьшение вреда	Формулировка приоритетов в рамках Антинаркотиче- ской комиссии КБР	Georghiou et al., 2008 [20]; Чистякова, 2017 [17]; Антинаркотическая комиссия КБР, 2024 [7]
2. Форми- рование команды	Участие органов власти, здравооо- рания, образова- ния, МВД, НКО, молодёжи	Вовлечение Минздрава, Минобрнауки КБР, обще- ственных организаций	Cuhls, 2020 [19]; Гаври- люк, 2019 [4]; Минздрав КБР, 2023 [5]
3. Сбор и анализ данных	Статистика, опро- сы, мониторинг рынка наркотиков	Рост наркопреступности +11 % (2024), изъято 57 кг; >250 акций профилактики	Popper, 2008 [27]; Латов, 2020 [10]; МВД КБР, 2024 [16]
4. Гори- зонт-ска- нирование	Анализ трендов (социальных, технологических, правовых)	Онлайн-сбыт через мес- сенджеры, цифровая среда молодёжи	Amanatidou & Butter, 2010 [18]; Карпов, 2021 [8]; Минобрнауки КБР, 2023 [12]
5. Драй- веры и неопреде- лённости	Определение фак- торов высокой зна- чимости и риска	Синтетические наркотики, интернет-каналы, эффектив- ность профилактики	Miles et al., 2016 [24, 26]; Гладких, 2018 [3]; Анти- наркотическая комиссия КБР, 2022 [6]
6. Сце- нарное моделиро- вание	Построение 3–4 сценариев раз- вития	«Жёсткий контроль», «Цифровой рынок НПВ», «Инклюзивная профилак- тика», «Кризисная помощь»	van der Heijden, 2005 [30]; Кузьминов и др., 2018 [9]
7. Дорож- ные карты	План действий на 1–2, 3–5 и 5–10 лет	1–2 года: мониторинг + школы; 3–5 лет: форсайт-я- чейка; 5–10 лет: устойчивое снижение спроса	Phaal et al., 2004 [28]; Карпов, 2021 [8]; Ми- нобрнауки КБР, 2023
8. KPI и оценка (RE-AIM)	Система показате- лей (охват, эф- фективность, вне- дрение, качество, устойчивость)	% подростков, охваченных программами; уровень упо- требления 15–16 лет; число передозировок	Glasgow et al., 1999 [21]; Бабаян & Ливанов, 2020 [1]; Минздрав КБР, 2023 [5]
9. Инсти- туциона- лизация	Закрепление фор- сайт-подхода в ин- ститутах региона	Форсайт-ячейка при Анти- наркотической комиссии, ежегодное обновление сце- нариев	Keenan & Popper, 2008 [22]; Чистякова, 2017 [17]; Антинаркотическая комиссия КБР, 2024 [7]

Региональная специфика требует особого акцента на данных и сложившихся трендах. На этапе сбора данных и определения горизонта-сканирования выявляются именно те особенности КБР, которые не отражены в федеральной статистике (например, рост наркопреступности на 11 %, активность онлайн-сбыта через мессенджеры, >250 профилактических акций). Это подчёркивает важность и необходимость скрупулёзного формирования локальной эмпирической базы данных по конкретному региону.

Сценарное моделирование формирует набор альтернативных стратегий. Выделение сценариев («жёсткий контроль», «цифровой рынок НПВ», «инклюзивная профилактика», «кризисная помощь») показывает, что региональная наркопрофилактика должна готовиться к нескольким траекториям будущего, а не к единственному прогнозу.

Такой подход позволяет не только выявлять ключевые драйверы и неопределённости, но и формировать альтернативные сценарии развития, закреплённые в дорожных картах и подкреплённые системой показателей (RE-AIM). Особое значение имеет межведомственное взаимодействие и институционализация форсайта, что превращает его из разовой экспертной процедуры в устойчивый механизм управления. Институционализация закрепляет устойчивость Форсайта, за счет ежегодного обновления сценариев и перехода от разовой инициативы к постоянной системе мониторинга и адаптации посредством формирования форсайт-ячейки при Антинаркотической комиссии КБР.

Таким образом, в табл. 2 представлена не только структурированная Форсайт-методология, но и сформированы алгоритмы шагов, которые можно использовать как основу для практической стратегии в регионе.

Представленная таблица демонстрирует, что форсайт-технологии обеспечивают системное структурирование региональной наркопрофилактики. Каждый этап методологии (от постановки целей до институционализации) имеет чёткое содержание, научное обоснование и практическую привязку к специфике Кабардино-Балкарской Республики.

Таким образом, форсайт на региональном уровне выполняет миссию интеграции научного прогнозирования и практической политики: он обеспечивает согласованность действий органов власти, образовательных и медицинских структур, общественных организаций и молодёжи, а также позволяет адаптировать федеральные антинаркотические стратегии к локальному состоянию наркоситуации в КБР.

Интеграция методов форсайта в систему профилактики наркомании является важным аспектом, позволяющим оценить эффективность принимаемых мер в настоящем, не прогнозируя вероятное, а формируя и запуская

желаемое будущее. Поэтому нахождение элементарной составляющей, по мнению авторов, поможет понять структуру, а значит поведение системы.

«Форсайт-ячейка» в антинаркотической профилактике является организационно-аналитической структурой (возможно небольшая группа аналитиков, психологов, педагогов, социальных работников, представителей власти, экспертов, специалистов), которая способствует интеграции методов форсайт-исследований. По мнению авторов, форсайт-ячейка в рамках антинаркотической профилактики – это «мозговой центр будущего», который не только анализирует текущую ситуацию, но и строит долгосрочные сценарии, помогая находить эффективные «окна возможностей» для профилактики.

Необходимо отметить, что данных под этим конкретным названием (как специализированной единицы или группы) в открытом доступе не обнаружено. Тем не менее, выявлены близкие практики и научные подходы, которые можно использовать в качестве базы для организации подобной базовой структуры, представленные в табл. 3.

Таблица 3.

Подходы для формирования форсайт-ячейки на основе российских и международных источников

Table 3. Approaches to Establishing a Foresight Unit Based on Russian and International Sources

Метод / подход	Применение в Форсайт-ячейке	Описание	Международный/ Российский источник
Форсайт	Базовый метод стратегического видения и построения дорожных карт	Коллективное видение будущего, выявление трендов и «окон возможностей»	Georghiou L. et al. (2008). <i>The Handbook of Technology Foresight</i> . Edward Elgar./ ВШЭ, РАНХиГС (2012). <i>Форсайт здравоохранения–2030</i> .
Сценарное планирование	Построение сценариев (оптимистический, кризисный, инерционный)	Построение альтернативных сценариев в условиях неопределённости	Bradfield R. et al. (2005). <i>Scenario techniques</i> . Futures. / Президент РФ (2021). <i>Стратегия нац. безопасности РФ</i> ; Стратегия противодействия наркоугрозе–2030
STEEP/ PESTLE-анализ	Выявление драйверов и барьеров профилактики	Системный скрининг факторов среды (социальных, технологических, экономических, политико-правовых, экологических)	Cuhls K. (2010). <i>Foresight in Germany</i> . Futures./ РАНХиГС (2017). <i>Прогноз развития здравоохранения до 2030</i>
Risk Management (Boehm Spiral)	Управление рисками профилактических проектов и закупок	Управление рисками через итерационные циклы и «ворота решений»	Boehm B. (1986). <i>A Spiral Model of Software Development</i> . / Минфин РФ, ФАС РФ (2020). <i>Методические рекомендации по управлению рисками в госзакупках</i>

Метод / подход	Применение в Форсайт-ячейке	Описание	Международный/ Российский источник
Контрфак- туальный анализ	Проверка альтернативных траекторий («что если?»)	Моделирование альтернативных траекторий («что если?»)	Tetlock P., Belkin A. (1996). <i>Counterfactual Thought Experiments</i> . Princeton Univ. Press. / МВД РФ (2020). <i>Доклад о состоянии преступности в РФ</i> .
State-of-the-Art (SotA) Review	Систематизация лучших практик и базы знаний	Систематизация лучших мировых практик и научных данных	EMCDDA (2011). <i>European drug prevention quality standards</i> . / Минздрав РФ (2019). <i>Доклад о наркоситуации в РФ</i>
Дельфийский метод	Экспертные сессии для оценки сценариев и мер	Экспертные опросы с обратной связью	Rowe G., Wright G. (1999). <i>The Delphi technique</i> . Int. J. of Forecasting. / ВШЭ (2014). <i>Форсайт образования–2030</i>
Participatory Governance / Living Labs	Вовлечение молодежи, НКО, школ в профилактику	Вовлечение граждан и организаций в со-создание решений	Schuurman D. et al. (2015). <i>Living Labs review</i> . PDF/ ГАК КБР (2022). <i>Доклад о деятельности антинаркотической комиссии КБР</i>
Public Health Foresight	Использование медицинских прогнозов для оценки наркоситуации	Прогнозы долгосрочных трендов в области здоровья	van der Steen J. et al. (2019). <i>Public Health Foresight Studies</i> . Eur. J. Public Health. / НМИЦ им. Сербского (2021). <i>Доклад о наркологической ситуации в РФ</i>
Evidence-based prevention	Выбор интервенций с доказанной эффективностью	Методы профилактики, основанные на доказательной базе	UNODC (2015). <i>International Standards on Drug Use Prevention</i> . / Минздрав РФ (2020). <i>Методические рекомендации по профилактике наркомании среди молодежи</i>

Сводная табл. 3 показывает основу каждого метода, базой которого являются международные практики и российские аналоги/документы. Таким образом, международные методики (форсайт, сценарии, SotA, risk management) можно связать с российскими практиками (Минздрав, РАН-ХиГС, КБР-отчёты). Это позволяет Форсайт-ячейке работать на основе двойной базы знаний: глобальной + локальной.

В контекстном изложении «форсайт-ячейка» это целевая рабочая группа, которая занимается прогнозированием, анализом и разработкой стратегий в сфере антинаркотической профилактики [27].

По мнению авторов, в задачи междисциплинарной группы, работающей возможно в составе антинаркотической комиссии (или региональной системе здравоохранения/образования/правоохранительных органов), входит системное прогнозирование и проектирование будущего наркоситуации с

использованием методов форсайта (сценарное планирование, экспертные панели, SWOT/PESTLE, «окна возможностей», дорожные карты и др.) [24].

Целью деятельности форсайт-ячейки могут стать: ранняя диагностика рисков: выявление трендов наркотизации (новые ПАВ, интернет-каналы, социокультурные драйверы); создание сценариев будущего (оптимистический, инерционный, кризисный); формирование «окон возможностей» для профилактики (где и как можно повлиять на ситуацию) и поддержка принятия решений: подготовка основанных на данных рекомендаций для органов власти.

Задачами форсайт-ячейки являются мониторинг тенденций (мировых, национальных, региональных); проведение экспертных сессий (медики, педагоги, МВД, молодежные организации); форматы работы (сессии, рабочие группы по отдельным направлениям, Digital-панель для сбора данных и визуализации трендов, пилотные площадки для апробации методов); разработка дорожных карт профилактики (например, на горизонте 5 -10 лет); оценка эффективности мер (KPI, индикаторы снижения вовлечённости, роста охвата профилактическими программами); обеспечение межведомственной координации (связь науки, практики и управленцев).

По мнению исследователей, организационная логистика заключается в возможности встраивания форсайт-ячейки в деятельность антинаркотической комиссии региона в количестве от 5 до 15 специалистов из разных областей: социологи, врачи, педагоги, сотрудники МВД, ИТ-аналитики. Работа ячейка возможна как на постоянной основе, так в рамках проектных циклов (раз в 1–2 года, учитывая обновление сценариев и дорожных карт). С другой стороны, ценным мнением являются также информационные и потребительские предпочтения пациентов в контексте коммуникативного взаимодействия [13].

Возможные ограничения могут быть связаны с требуемым устойчивым финансированием и доступом к данным; компетентностью экспертов и уровнем межведомственного взаимодействия; сопротивлением традиционной бюрократии («форсайт» ≠ обычный отчёт).

Заключение

Форсайт-технологии как инновационный метод противодействия наркомании в отличие от традиционных прогнозных инструментов, ориентирован не на линейное предсказание, а на совместное формирование возможных сценариев будущего. Это позволяет учитывать многомерность наркоситуации и повышает вероятность разработки устойчивых стратегий.

Многоуровневое вовлечение акторов является принципиальным отличием, что выражается в участии широкого круга заинтересованных сторон: государственные структуры (органы власти, МВД, Минздрав, Минобрнауки), экспертное сообщество (учёные, аналитики, медики, педагоги), гражданское общество (НКО, волонтёры, родительские ассоциации, молодёжь). Это формирует диалоговую модель взаимодействия, необходимую для устойчивой антинаркотической политики.

Применение форсайт-подхода на региональном уровне требует системного анализа и сценарного планирования, что переводит работу с наркоситуацией в режим долгосрочной стратегии, а не реакции на кризисы.

Институционализация через «форсайт-ячейку» позволит создать специализированную аналитическую группу в регионе для аккумулирования данных и знаний; проведения регулярных сессии сценарного анализа; обеспечения обратной связи между властью и обществом и интегрирование профилактики, медицины, образования и социальных практик в единую систему.

Такая ячейка выступает операционным звеном для внедрения форсайта в практику профилактики наркомании с целью повышения качества стратегического планирования и координации, роста охвата населения профилактическими программами, снижения уровня вовлеченности молодёжи в наркопотребление, формирование устойчивой региональной антинаркотической политики, основанной на научных и социальных данные и создания условий для долгосрочного мониторинга и корректировки «дорожных карт».

Таким образом, можно заключить, что форсайт-методология позволяет перейти от реактивной и фрагментарной антинаркотической политики к системной, долгосрочной и интегративной стратегии, основанной на участии всех заинтересованных акторов и закреплённой через институциональные механизмы («форсайт-ячейку»).

Информация о конфликте интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Список литературы

1. Бабаян, Э. А. (2006). Применение метадона нельзя рассматривать как лечение. *Наркоконтроль*, (4), 41–44. EDN: <https://elibrary.ru/RMYQEL>
2. Дубина, Г. И. (2025). Форсайт как инструмент стратегического управления: международный опыт и российские перспективы. *Экономика и управление: проблемы*

- мы, решения, 5(11), 232–240. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.11.05.027>. EDN: <https://elibrary.ru/ZNBUCW>
3. Ахохова, А. В., Тлакадугова, М. Х., Кешоков, Р. Х., и др. (2025). Межведомственное взаимодействие субъектов управления для формирования стратегического «ядра» в целях предупреждения наркомании (часть I). *Менеджер здравоохранения*, (4), 46–59. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2025-4-46-59>. EDN: <https://elibrary.ru/WFRKHS>
 4. Брылев, В. И., & Исупова, И. В. (2017). Нормативно-правовое обеспечение межведомственного взаимодействия по профилактике наркомании среди молодежи. *Общество и право*, (1), 78–82. EDN: <https://elibrary.ru/YGVBUN>
 5. Министерство здравоохранения Кабардино-Балкарской Республики. (2023). *Годовой отчёт о состоянии наркологической помощи в КБР*. Нальчик. <https://minzdrav.kbr.ru/upload/medialibrary/d60/qq30vrpr9t3jqml7jjiabovwt5i309ia/Gosdoklad-2024-okonchat.docx>
 6. Антинаркотическая комиссия Кабардино-Балкарской Республики. (2022). *Доклад о наркоситуации в КБР и мерах профилактики*. Нальчик. https://nalchik.kbr.ru/upload/iblock/574/w2kn8lnz7q3hqnvdhc9op4udrlb0mc91/497-ot-15.03.24-Ob-antinarkoticheskoy-komissii-izm-s-prilozheniem-_14.03.2024.pdf
 7. Антинаркотическая комиссия Кабардино-Балкарской Республики. (2024). *Доклад о наркоситуации в КБР и мерах профилактики*. Нальчик. <https://glava.kbr.ru/antiterrorist>
 8. Коростелкин, М. М. (2022). Возможности внедрения системы «форсайт» в процесс регионального стратегического планирования. *Экономические и гуманитарные науки*, (11), 106–118. <https://doi.org/10.33979/2073-7424-2022-370-11-106-118>. EDN: <https://elibrary.ru/FVVLHE>
 9. Саяпин, В. О. (2010). О сценарном подходе к прогнозированию. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки*, (10(90)), 164–168. EDN: <https://elibrary.ru/MVZTVL>
 10. Латов, Ю. В. (2020). «Духовная атмосфера» 2020 года: опыт анализа социально-эмоционального самочувствия россиян. *Социологические исследования*, (12), 139–150. <https://doi.org/10.31857/S013216250012511-5>. EDN: <https://elibrary.ru/IVHGSO>
 11. Макарова, Е. А., & Соколова, А. В. (2012). Лучшие практики оценки научно-технологического форсайта: базовые элементы и ключевые критерии. *Форсайт*, 6(3), 62–75. <https://doi.org/10.17323/1995-459x.2012.3.62.74>. EDN: <https://elibrary.ru/PDAWNL>
 12. Макарова, О. В., Хвощ, Р. Н., & Болдырева, Ю. В. (2024). Цифровые ресурсы как эффективное средство формирования коммуникативных навыков будущего

- врача. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(1), 405–421. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-1070>. EDN: <https://elibrary.ru/EPUSXB>
13. Полухин, Н. В., Эккерт, Н. В., & Козлов, В. В. (2021). Информационные предпочтения пациентов в контексте коммуникации на веб-сайтах медицинских организаций. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(5), 226–246. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-226-246>. EDN: <https://elibrary.ru/SIDPPS>
 14. Министерство образования, науки и по делам молодёжи КБР. (2023). *Программы профилактики наркомании в образовательных организациях КБР*. Нальчик. <https://edu.kbr.ru/activity/protivodeystvie-terrorizmu-i-ego-ideologii-/protivodeystvie-ideologii-terrorizma-i-ekstremizma.html>
 15. Соколов, А. В. (2007). Форсайт: взгляд в будущее. *Форсайт*, 1(1), 8–15. EDN: <https://elibrary.ru/MHHLRR>
 16. Представлен отчет о деятельности Министерства внутренних дел по Кабардино-Балкарской Республике. (2025). <https://parlament.kbr.ru/news/predstavlen-otchet-o-deyatelnosti-ministerstva-vnutrennikh-del-po-kabardino-balkarskoy-respublike.html>
 17. Бабкин, А. В., & Чистякова, О. В. (2017). Цифровая экономика и её влияние на конкурентоспособность предпринимательских структур. *Российское предпринимательство*, 18(24), 4087–4102. <https://doi.org/10.18334/rp.18.24.38670>. EDN: <https://elibrary.ru/YQUEUH>
 18. Чуланова, О. Л. (2018). Форсайт-сессии как инновационный инструмент стратегического управления и работы проектных команд. *Материалы Афанасьевских чтений*, (1), 28–36. EDN: <https://elibrary.ru/VXJAIX>
 19. Patrouilleau, M. M. (2017). Narrative foresight in technical organizations: epistemological and methodological contributions from a practice of scenario method in Argentina. *European Journal of Futures Research*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s40309-017-0110-z>. EDN: <https://elibrary.ru/PLLUZW>
 20. Georgiou, L., Cassingena Harper, J., Keenan, M., Miles, I., & Popper, R. (2008). *The Handbook of Technology Foresight*. Edward Elgar. <https://doi.org/10.4337/9781781008768>
 21. Glasgow, R. E., Vogt, T. M., & Boles, S. M. (1999). Evaluating the public health impact of health promotion interventions: The RE-AIM framework. *American Journal of Public Health*, 89(9), 1322–1327. <https://doi.org/10.2105/AJPH.89.9.1322>. EDN: <https://elibrary.ru/DBQGDF>
 22. Popper, R. (2008). How are foresight methods selected? *Foresight*, 10(6), 62–89. <https://doi.org/10.1108/14636680810918586>
 23. Cuhls, K. E. (2020). Horizon Scanning in Foresight – Why Horizon Scanning is only a part of the game. *Futures & Foresight Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1002/ffo.2.23>

24. Miles, I. (2010). The development of technology foresight: A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1448–1456. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.07.016>. EDN: <https://elibrary.ru/QWLQCS>
25. Martin, B. R., & Johnston, R. (1999). Technology Foresight for Wiring Up the National Innovation System: Experiences in Britain, Australia, and New Zealand. *Technological Forecasting and Social Change*, 60(1), 37–54. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(98\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(98)00022-5)
26. Georgiou, L., Harper, J. C., Keenan, M., Miles, I., & Popper, R. (Eds.). (2008). *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781781008768>
27. Popper, R. (2008). Foresight Methodology. In *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice* (1st ed., pp. 44–88). Edward Elgar. <https://doi.org/10.4337/9781781008768.00012>
28. Phaal, R., Farrukh, C. J. P., & Probert, D. R. (2004). Technology roadmapping – A planning framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(1-2), 5–26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6)
29. Forge, S. (2008). The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice. *Foresight*, 10(5), 65–66. <https://doi.org/10.1108/14636680810918522>
30. van der Heijden, K. (2024). *Scenarios: The Art of Strategic Conversation* (2nd ed., 384 p.).

References

1. Babayan, E. A. (2006). Methadone use cannot be considered as treatment. *Narcotics Control*, (4), 41–44. EDN: <https://elibrary.ru/RMYQEL>
2. Dubina, G. I. (2025). Foresight as a strategic management tool: International experience and Russian prospects. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 5(11), 232–240. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.11.05.027>. EDN: <https://elibrary.ru/ZNBUCW>
3. Akhokova, A. V., Tlakadugova, M. Kh., Keshokov, R. Kh., et al. (2025). Interdepartmental interaction of management subjects for forming a strategic “core” aimed at preventing drug addiction (Part I). *Healthcare Manager*, (4), 46–59. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2025-4-46-59>. EDN: <https://elibrary.ru/WFRKHS>
4. Brylev, V. I., & Isupova, I. V. (2017). Regulatory and legal support for interdepartmental interaction on drug addiction prevention among youth. *Society and Law*, (1), 78–82. EDN: <https://elibrary.ru/YGVBUH>
5. Ministry of Health of the Kabardino-Balkarian Republic. (2023). *Annual report on the state of narcological care in the KBR*. Nalchik. <https://minzdrav.kbr.ru/upload/medialibrary/d60/q30vrpr9t3jqml7jjiabovwt5i309ia/Gosdoklad-2024-okonchat.docx>

6. Anti-Drug Commission of the Kabardino-Balkarian Republic. (2022). *Report on the drug situation in the KBR and prevention measures*. Nalchik. https://nalchik.kbr.ru/upload/iblock/574/w2kn8lnz7q3hqndhc9op4udrlb0mc91/497-ot-15.03.24-Ob-antinarkoticheskoy-komissii-izm-s-prilozheniem-_-.14.03.2024.pdf
7. Anti-Drug Commission of the Kabardino-Balkarian Republic. (2024). *Report on the drug situation in the KBR and prevention measures*. Nalchik. <https://glava.kbr.ru/antiterrorist>
8. Korostelkin, M. M. (2022). Possibilities of introducing the “foresight” system into the process of regional strategic planning. *Economic and Humanitarian Sciences*, (11), 106–118. <https://doi.org/10.33979/2073-7424-2022-370-11-106-118>. EDN: <https://elibrary.ru/FVVLHE>
9. Sayapin, V. O. (2010). On the scenario approach to forecasting. *Tambov University Review. Series: Humanities*, (10), 164–168. EDN: <https://elibrary.ru/MVZTVL>
10. Latov, Yu. V. (2020). The “spiritual atmosphere” of 2020: An experience of analyzing the socio-emotional well-being of Russians. *Sociological Studies*, (12), 139–150. <https://doi.org/10.31857/S013216250012511-5>. EDN: <https://elibrary.ru/IVHGSO>
11. Makarova, E. A., & Sokolova, A. V. (2012). Best practices in assessing scientific and technological foresight: Basic elements and key criteria. *Foresight*, 6(3), 62–75. <https://doi.org/10.17323/1995-459x.2012.3.62.74>. EDN: <https://elibrary.ru/PDAWNL>
12. Makarova, O. V., Khvoshch, R. N., & Boldyreva, Yu. V. (2024). Digital resources as an effective means of forming communicative skills of a future doctor. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(1), 405–421. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-1070>. EDN: <https://elibrary.ru/EPUSXB>
13. Polukhin, N. V., Ekkert, N. V., & Kozlov, V. V. (2021). Information preferences of patients in the context of communication on websites of medical organizations. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(5), 226–246. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-226-246>. EDN: <https://elibrary.ru/SIDPPS>
14. Ministry of Education, Science and Youth Affairs of the KBR. (2023). *Drug addiction prevention programs in educational organizations of the KBR*. Nalchik. <https://edu.kbr.ru/activity/protivodeystvie-terrorizmu-i-ego-ideologii-/protivodeystvie-ideologii-terrorizma-i-ekstremizma.html>
15. Sokolov, A. V. (2007). Foresight: A look into the future. *Foresight*, 1(1), 8–15. EDN: <https://elibrary.ru/MHHLRR>
16. *A report on the activities of the Ministry of Internal Affairs for the Kabardino-Balkarian Republic has been presented*. (2025). <https://parlament.kbr.ru/news/predstavlen-otchet-o-deyatelnosti-ministerstva-vnutrennikh-del-po-kabardino-balkarskoy-respublike.html>

17. Babkin, A. V., & Chistyakova, O. V. (2017). Digital economy and its impact on the competitiveness of entrepreneurial structures. *Russian Entrepreneurship*, 18(24), 4087–4102. <https://doi.org/10.18334/rp.18.24.38670>. EDN: <https://elibrary.ru/YQUEUH>
18. Chulanova, O. L. (2018). Foresight sessions as an innovative tool for strategic management and project team work. *Proceedings of the Afanasyev Readings*, (1), 28–36. EDN: <https://elibrary.ru/VXJAIX>
19. Patrouilleau, M. M. (2017). Narrative foresight in technical organizations: Epistemological and methodological contributions from a practice of scenario method in Argentina. *European Journal of Futures Research*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s40309-017-0110-z>. EDN: <https://elibrary.ru/PLLUZW>
20. Georghiou, L., Cassingena Harper, J., Keenan, M., Miles, I., & Popper, R. (2008). *The Handbook of Technology Foresight*. Edward Elgar. <https://doi.org/10.4337/9781781008768>
21. Glasgow, R. E., Vogt, T. M., & Boles, S. M. (1999). Evaluating the public health impact of health promotion interventions: The RE-AIM framework. *American Journal of Public Health*, 89(9), 1322–1327. <https://doi.org/10.2105/AJPH.89.9.1322>. EDN: <https://elibrary.ru/DBQGDF>
22. Popper, R. (2008). How are foresight methods selected? *Foresight*, 10(6), 62–89. <https://doi.org/10.1108/14636680810918586>
23. Cuhls, K. E. (2020). Horizon Scanning in Foresight – Why Horizon Scanning is only a part of the game. *Futures & Foresight Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1002/ffo2.23>
24. Miles, I. (2010). The development of technology foresight: A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1448–1456. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.07.016>. EDN: <https://elibrary.ru/QWLQCS>
25. Martin, B. R., & Johnston, R. (1999). Technology Foresight for Wiring Up the National Innovation System: Experiences in Britain, Australia, and New Zealand. *Technological Forecasting and Social Change*, 60(1), 37–54. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(98\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(98)00022-5)
26. Georghiou, L., Harper, J. C., Keenan, M., Miles, I., & Popper, R. (Eds.). (2008). *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781781008768>
27. Popper, R. (2008). Foresight Methodology. In *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice* (1st ed., pp. 44–88). Edward Elgar. <https://doi.org/10.4337/9781781008768.00012>
28. Phaal, R., Farrukh, C. J. P., & Probert, D. R. (2004). Technology roadmapping – A planning framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(1-2), 5–26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6)

29. Forge, S. (2008). The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice. *Foresight*, 10(5), 65–66. <https://doi.org/10.1108/14636680810918522>
30. van der Heijden, K. (2024). *Scenarios: The Art of Strategic Conversation* (2nd ed., 384 p.).

ВКЛАД АВТОРОВ

Ахохова А.В.: концепция и дизайн исследования.

Урусова З.З., Кубачева М.Т.: сбор данных, анализ и интерпретация результатов.

Ахохова А.В.: обзор литературы.

Ахохова А.В., Урусова З.З., Кубачева М.Т., Мусукова М.А., Айдамирова И.Б.: подготовка проекта рукописи.

Все авторы рассмотрели результаты и одобрили окончательный вариант рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Azis V. Akhokhova: study concept and design.

Zamilya Z. Urusova, Milana T. Kubacheva: data collection, analysis and interpretation of results.

Azis V. Akhokhova: literature review.

Azis V. Akhokhova, Zamilya Z. Urusova, Milana T. Kubacheva, Maryam Al. Musukova, Iman B. Aidamirova: manuscript drafting.

All authors of the results and a simplified final version of the manuscript.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Ахохова Азис Владимировна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры общественного здоровья, здравоохранения и профилактической медицины

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова» Минобрнауки России; Государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Республиканский клинический центр психиатрии и наркологии» Минздрава КБР

г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Российская Федерация

Aza_stih@mail.ru

Урусова Замиля Зауровна, студентка

ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет)

ул. Островитянова, 1, г. Москва, 117513, Российская Федерация

Zamiuz@mail.ru

Кубачева Милана Тимуровна, студентка

ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России

*ул. Пушкинская, 40, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания,
362019, Российская Федерация*

kubacheva@internet.ru

Мусукова Марьям Алексеевна, студентка

*ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени
Х.М. Бербекова» Минобрнауки России*

*ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация*

maryiyam07rig@gmail.com

Айдамирова Иман Бислановна, студентка

*ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени
Х.М. Бербекова» Минобрнауки России*

*ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация*

imanunusova687@gmail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Azis V. Akhokhova, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Public Health, Healthcare and Preventive Medicine

*Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov; Republican
Clinical Center for Psychiatry and Narcology*

Nalchik, Russian Federation

Aza_stih@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2370-9701>

SPIN-code: 8076-6544

Zamilya Z. Urusova, student

Pirogov University

1, Ostrovityanova Str., Moscow, 117513, Russian Federation

Zamiuz@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4051-3192>

Milana T. Kubacheva, student

North Ossetian State Medical Academy

*40, Pushkinskaya Str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, 362019,
Russian Federation*

kubacheva@internet.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3499-4260>

Maryam Al. Musukova, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

maryiyam07rig@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7653-3865>

Iman B. Aidamirova, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

imanunusova687@gmail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9787-1528>

Поступила 05.10.2025

После рецензирования 12.11.2025

Принята 23.11.2025

Received 05.10.2025

Revised 12.11.2025

Accepted 23.11.2025

Общественное здоровье, организация и социология здравоохранения, медико-социальная экспертиза / Public Health, Health Organization, Sociology of Health, Medical and Social Expertise

Научный обзор

Scientific review

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1795](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1795)EDN: [VYHCGF](https://www.edn.ru/vyhcgf)

УДК 614.2



Технологии искусственного интеллекта в системе здравоохранения: общий обзор потенциальных возможностей и рисков

Д.А. Беляев^{1,2}, И.Н. Скрипкин², М.Ю. Смирнов²*¹Липецкий государственный педагогический университет
имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, Липецк, Российская Федерация**²Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал)
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий
и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)»,
Липецк, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Технологии искусственного интеллекта (ИИ) находят все большее применение в системе здравоохранения ведущих стран мира (прежде всего, речь идет о США и Китае). Между тем, существуют и риски подобных инноваций, последствия которых еще далеко не оценены. В этой связи представляется актуальным анализ данных об использовании подобных систем в текущей медицинской практике и перспектив использования в ближайшем будущем.

Цель – представить общий обзор потенциальных возможностей и рисков применения технологий ИИ в системе здравоохранения на основе актуальных научных данных.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования использованы публикации за последние пять лет, отобранные из баз данных Web of Science, Scopus, PubMed, РИНЦ, а также отчеты профильных организаций (ВОЗ и др.). Основной метод – контент-анализ литературы с выделением основных тематических категорий применения ИИ: клиническая диагностика, лечебно-профилактическая помощь, управление и логистика здравоохранения, общественное здоровье и эпиднадзор,

Результаты. Проведённый анализ подтверждает исходную гипотезу о двойственном влиянии ИИ на здравоохранение: его трансформационный потенциал огромен, но реализовать его можно лишь при условии преодоления сопутствующих рисков.

Ключевые слова: система здравоохранения; медицина; искусственный интеллект; средства диагностики; средства лечения; технологии в медицине

Для цитирования. Беляев, Д. А., Скрипкин, И. Н., & Смирнов, М. Ю. (2026). Технологии искусственного интеллекта в системе здравоохранения: общий обзор потенциальных возможностей и рисков. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 567–587. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1795>

Artificial intelligence technologies in the healthcare system: a general overview of potential opportunities and risks

D.A. Belyaev^{1,2}, I.N. Skripkin², M.Y. Smirnov²

¹*Lipetsk State Pedagogical University*

named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation

²*Lipetsk Cossack Institute of Technology and Management (branch) of the “Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University)”, Lipetsk, Russian Federation*

Abstract

Background. Artificial intelligence technologies are increasingly being used in the healthcare system of the leading countries of the world (first of all, we are talking about the USA and China). Meanwhile, there are risks of such innovations, the consequences of which are still far from being assessed. In this regard, it seems relevant to analyze data on the use of such systems in current medical practice and the prospects for use in the near future.

Purpose. To provide a general overview of the potential opportunities and risks of using AI technologies in the healthcare system based on current scientific data.

Materials and methods. The study used publications from the last five years selected from the Web of Science, Scopus, PubMed, RSCI databases, as well as reports from relevant organizations (WHO, etc.). The main method is content analysis of literature, highlighting the main thematic categories of AI application: clinical diagnostics, medical and preventive care, healthcare management and logistics, public health and epidemiological surveillance.

Results. The analysis confirms the initial hypothesis about the dual impact of AI on healthcare: its transformative potential is immense, but it can only be realized if the associated risks are overcome.

Keywords: healthcare system; medicine; artificial intelligence; diagnostic tools; treatment tools; medical technologies

For citation. Belyaev, D. A., Skripkin, I. N., & Smirnov, M. Y. (2026). Artificial intelligence technologies in the healthcare system: a general overview of potential opportunities and risks. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 567–587. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1795>

Введение

Внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в медицину в последние годы демонстрирует экспоненциальный рост, а мировыми лидерами в этой сфере выступают США и Китай; в России внедрение ИИ пока на раннем этапе, но уже утверждена Национальная стратегия развития ИИ до 2030 г¹. и разработаны первые национальные стандарты применения, включая работу профильного ТК 164 «ИИ в здравоохранении»². Анализ современной (преимущественно англоязычной) литературы за последние три года и ряд обзоров 2022–2025 гг. подтверждают актуальность темы и фиксируют ключевые вызовы: ограниченную прозрачность моделей, потенциальную предвзятость результатов, уязвимости в кибербезопасности и нормативную неопределённость [22]. Одновременно клинические исследования демонстрируют заметные достижения: алгоритмы глубокого обучения в маммографическом скрининге повышают выявляемость рака молочной железы примерно на 17 % по сравнению с традиционным двойным чтением снимков без увеличения числа ложноположительных вызовов [25], а современные системы компьютерного зрения способны обнаруживать до 20–40 % случаев рака, пропускаемых при стандартной интерпретации изображений [там же]. Эти данные подчёркивают практическую значимость анализа баланса возможностей и рисков внедрения ИИ в здравоохранение.

Цель настоящего исследования – представить обобщённый обзор потенциальных возможностей и рисков применения технологий ИИ в системе здравоохранения на основе актуальных научных данных. Для её достижения анализируются современные направления использования ИИ в клинической медицине и общественном здравоохранении (с акцентом на Россию, США и Китай), приводятся и обсуждаются клинические примеры с количественны-

¹ Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490. «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (утверждает Национальную стратегию до 2030 г.) // Официальный сайт Президента РФ. URL: <https://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>

² ПК 01 «Искусственный интеллект в здравоохранении» (ТК 164). URL: <https://telemedai.ru/nauka/nauchnayainfrastruktura/iskusstvennyj-intellekt-v-zdravoohranenii>

ми и качественными эффектами, выявляются основные ограничения, риски и этико-правовые проблемы и формулируются рекомендации по условиям успешной интеграции ИИ. *Гипотеза исследования* состоит в том, что современные технологии ИИ способны существенно повысить эффективность системы здравоохранения (улучшив диагностику, лечение и управление), однако их широкое внедрение сопряжено с существенными рисками, преодоление которых требует специальных мер и адекватного регулирования.

Материалы и методы

Настоящая работа представляет собой аналитический обзор с элементами систематизации литературных данных. Использованы публикации за последние пять лет из Web of Science, Scopus, PubMed, РИНЦ, а также отчёты профильных организаций (ВОЗ и др.), с приоритетом рецензируемых статей в журналах WoS/Scopus, крупных обзоров и клинических исследований по применению ИИ в здравоохранении России, США и Китая. Поиск осуществлялся по ключевым словам на русском и английском (“artificial intelligence in healthcare”, “AI in medicine”, “machine learning medical diagnostics”, “искусственный интеллект здравоохранение” и др.), в обзор включено более 20 наиболее релевантных источников 2022–2025 гг.

Анализ проводился в два этапа: сначала выполнен контент-анализ с выделением основных направлений применения ИИ (диагностика, лечение и профилактика, управление и логистика, общественное здоровье и эпиднадзор, образование и наука, этико-правовые аспекты), затем внутри каждой категории сопоставлялись количественные показатели и выводы авторов. Учитывались как позитивные метрики (точность алгоритмов, улучшение исходов, экономическая эффективность), так и проблемные зоны (ошибки и отказоустойчивость, приватность данных, принятие технологий врачами), все данные сопровождаются ссылками на источники. Обзор не претендует на исчерпывающую полноту и опирается на наиболее показательные примеры с учётом гетерогенности исследований (дизайн, выборки, модели ИИ), что позволяет интегрально представить текущее состояние и ключевые тенденции развития ИИ в здравоохранении. Этических одобрений не требовалось, поскольку исследование основано на открытых публикациях и не затрагивает персональные данные пациентов.

Результаты исследования и обсуждение

Одним из наиболее развитых направлений является использование ИИ для распознавания медицинских изображений и помощи в диагностике

заболеваний. Современные алгоритмы глубокого обучения (в частности, нейронные сети для анализа изображений) уже сейчас сравнимы по точности с экспертами-врачами при выявлении ряда патологий, а в отдельных случаях превосходят их [30]. Так, в многоцентровом проспективном исследовании в Германии применение ИИ-системы при скрининге рака молочной железы повысило частоту выявления рака с 5,7 до 6,7 случаев на 1000 обследованных (+17,6% относительно стандартного чтения маммограмм двумя рентгенологами) [25]. При этом доля повторных вызовов пациентов (false positives) не увеличилась, а положительная прогностическая ценность возросла с 14,9% до 17,9% [там же]. Другое исследование показало, что алгоритмы ИИ способны обнаруживать ретроспективно до 20–40% «пропущенных» опухолей, которые были не распознаны при первоначальной интерпретации снимков врачами [там же]. В области медицинской визуализации накоплено множество подобных примеров. В радиологии ИИ-решения успешно применяются для выявления онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний на рентгенограммах, маммограммах, КТ и МРТ. Например, экспериментальная ИИ-модель для аномального анализа МРТ молочной железы точно локализовала опухолевые очаги и превзошла по чувствительности традиционные алгоритмы, что подтверждено сопоставлением с биопсией верифицированными участками рака [27]. В Китае крупные технологические компании достигли впечатляющих результатов: алгоритмы Tencent для анализа медицинских изображений обеспечивают до 97% точности в скрининге опухолей, а система Alibaba PANDA выявляет ранний рак поджелудочной железы с чувствительностью 93,3% [24].

Отдельного внимания заслуживает применение ИИ в патологии: цифровые патоморфологические системы с машинным зрением способны автоматически обнаруживать микроскопические признаки злокачественных клеток (митозы, очаги инвазии и т.д.) быстрее и не менее точно, чем патологи-морфологи, что повышает объективность диагностики редких и сложных случаев [7]. Аналогично, в дерматологии ИИ-системы диагностики по изображениям кожи уже показали точность, сопоставимую с квалифицированными дерматологами при выявлении меланомы и других опухолей кожи [26]. Таким образом, в сфере диагностики ИИ предоставляет клиницистам мощный инструмент, позволяющий увеличивать выявляемость заболеваний на ранних стадиях и снижать человеческий фактор. Учитывая растущий дефицит специалистов в отдельных областях (например, радиология), интеграция таких инструментов может частично

компенсировать нагрузку на врачей и повысить пропускную способность диагностических служб.

Результаты анализа данных по использованию ИИ в диагностике и клинической практике представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Применение ИИ в диагностике и клинической практике

Table 1. Applications of AI in Diagnosis and Clinical Practice

Направление	Примеры систем / технологий	Ключевые эффекты и результаты	Страны / Регионы
Анализ медицинских изображений	Botkin.AI (РФ), Tencent, Alibaba PANDA (Китай), системы для маммографии	Повышение выявляемости рака на 5–20%; снижение количества пропущенных случаев на 20–40%; точность до 97% при скрининге опухолей.	США, Китай, ЕС, Россия
Патология и дерматология	Цифровые патоморфологические системы, ИИ-дерматология	Автоматическое обнаружение митозов и инвазий; точность, сопоставимая с квалифицированными патологами и дерматологами.	США, ЕС
Анализ ЭКГ и мониторинг	DeepRhythmAI, системы прогнозирования аритмий	Снижение ложно-негативных результатов до 0,3% (против 4,4% у человека); раннее предупреждение об ухудшении состояния.	США, ЕС
Прогнозирование заболеваний	Webiomed (РФ), Celsus.AI (РФ)	Стратификация пациентов по риску развития хронических заболеваний; использование в поликлиниках для управления рисками.	Россия

Помимо диагностики, алгоритмы ИИ активно внедряются для поддержки клинических решений в выборе тактики лечения и прогнозировании течения болезней. За счёт анализа больших массивов разнородных данных (медицинские карты, результаты анализов, генетическая информация, образ жизни пациента) ИИ-модели способны выявлять скрытые закономерности, недоступные прямому человеческому анализу [14]. Это находит применение, например, в онкологии для подбора персонализированных схем терапии. Алгоритмы, учитывающие геномные данные опухоли и историю лечения, помогают врачам спрогнозировать отклик на химиотерапию или таргетные препараты и тем самым выбрать наилучшую стратегию для конкретного пациента [34]. В кардиологии и интенсивной терапии предиктивные модели позволяют заранее распознать риск ухуд-

шения состояния. Примечательный пример – система DeepRhythmAI для анализа ЭКГ: в исследовании с участием >14 тыс. пациентов она показала крайне низкий процент пропущенных опасных аритмий (ложно-негативных результатов всего 0,3% против 4,4% у штатных техников) [32]. Это означает, что ИИ практически не упускает эпизоды аритмий, в то время как человеческий анализ может пропустить каждую двадцатую угрозу. Другой перспективный пример – платформы типа Webiomed (Россия), предназначенные для прогнозирования рисков развития заболеваний на основе сочетания клинических и социальных данных пациента. Система Webiomed, созданная резидентом «Сколково» компанией *К-Скай*, уже внедряется в ряде регионов для стратификации пациентов по риску развития осложнений хронических болезней и осложнений, выступая своего рода «ранним предупреждением» для врачей.

ИИ также способствует улучшению качества и скорости ведения медицинской документации о пациенте. Так, эксперименты с автоматической генерацией текста медицинских отчетов показали, что ИИ-системы могут формировать отчёты об операциях с на 14,5% более высокой точностью, чем традиционные методики (меньшее число упущенных или неточных деталей), тем самым снижая вероятность ошибок в передаче информации о пациенте [28]. В России разработан сервис RoboDoc, который с помощью технологий обработки естественного языка автоматизирует заполнение медицинских документов – от протоколов осмотра до выписок. Пилотное внедрение RoboDoc продемонстрировало сокращение времени на бумажную работу врачей и снижение числа опечаток и неполноты записей, что косвенно отражается на безопасности пациентов.

Ещё одна сфера, где потенциал ИИ проявляется особенно ярко, – это телемедицинские технологии и мониторинг пациентов вне стен больницы. Пандемия COVID-19 стала катализатором масштабного перехода к дистанционным консультациям, и ИИ здесь играет роль интеллектуального ассистента [22]. В Китае, обладающем более чем миллиардом пользователей смартфонов, компании интегрировали ИИ в популярные платформы e-health. Например, сервис Ping An Good Doctor применяет ИИ для первичных обращений: по сообщениям, алгоритмы Ping An с 99% точностью направляют пациентов к нужному специалисту или рекомендуют домашнее лечение. Это привело к тому, что около 72% пациентов в Китае теперь предпочитают сначала общаться с ИИ-триажером перед консультацией врача – экономя время и разгружая поликлиники [24]. Телемедицинские чат-боты, оснащённые ИИ, берут на себя роль круглосуточных «вирту-

альных помощников» пациента: собирают жалобы, отвечают на типовые вопросы, напоминают о приёме лекарств. В сфере психического здоровья появилось отдельное направление – цифровые терапевты. Так, китайский чат-бот XiaoE предоставляет психологическую поддержку при тревоге и депрессии, обеспечивая анонимность и доступность помощи. Хотя такие решения не заменяют профессионального психотерапевта, они снижают барьеры для пациентов, стесняющихся обращаться за помощью, и дают возможность раннего выявления эмоциональных проблем. При этом эксперты подчёркивают необходимость контроля качества подобных ИИ: важны безопасность, эмпатичность ответов и ясность границ компетенции алгоритма, чтобы не причинить вред пациентам [32].

Дистанционный мониторинг хронических больных – ещё одно успешное поле применения ИИ. Носимые устройства и датчики генерируют огромные массивы данных о состоянии пациентов (частота сердечных сокращений, уровень глюкозы, артериальное давление и т.п.). ИИ-системы в реальном времени анализируют эти потоки, позволяя выявлять тревожные отклонения и сразу сигнализировать врачам или самим пациентам. В целом ИИ делает модель телемедицины более проактивной: не просто передача данных врачу, а их предварительная интеллектуальная обработка и фильтрация. Это особенно важно для сельских и отдалённых районов с нехваткой специалистов – ИИ может служить первым уровнем поддержки, повышая доступность медицины.

Потенциал искусственного интеллекта выходит за рамки клинической диагностики и охватывает оптимизацию внутренних процессов медицинских организаций. Автоматизация рутинных административных задач – одна из очевидных возможностей ИИ. Уже сейчас в крупных клиниках внедряются системы на основе ИИ для управления расписанием приёма пациентов и врачей, прогнозирования загрузки отделений и необходимых ресурсов. Например, алгоритмы машинного обучения могут на основе исторических данных предсказывать приток пациентов (в том числе сезонные эпидемические всплески) и оптимально распределять персонал по сменам, избегая перегрузок [31]. В Москве на базе городского Центра диагностики и телемедицины был создан интеллектуальный модуль планирования исследований, который с помощью ИИ анализирует очереди на КТ/МРТ и рекомендует оптимальный график записи, минимизируя время ожидания для пациентов.

ИИ также применяется для управления материальными потоками: прогнозирование потребности в лекарствах, автоматический контроль складских запасов и распределение препаратов между аптеками и стационарами [27].

Отдельного упоминания заслуживает опыт интеграции ИИ в работу больничных информационных систем (HIS). В США и Европе набирают популярность интеллектуальные надстройки над электронными медицинскими картами, способные в режиме реального времени анализировать вводимые врачом данные и выдавать подсказки. Например, при заполнении истории болезни пациентки с подозрением на сепсис система может сама выявить сочетание признаков (тахикардия, лейкоцитоз, лихорадка) и выдать предупреждение о возможности сепсиса, тем самым инициировав ранние действия [23]. Совокупно такие улучшения повышают эффективность: по недавним оценкам, около 79% организаций здравоохранения уже внедрили ту или иную форму ИИ-инструментов для оптимизации своих процессов [29]. Средняя окупаемость инвестиций в ИИ-системы управления составляет порядка \$3,2 на каждый вложенный \$1, часто с возвратом инвестиций менее чем за 1,5 года [там же].

Обобщенный анализ результативности использования ИИ в различных элементах системы здравоохранения представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Применение ИИ в управлении, телемедицине и поддержке процессов

Table 2. Applications of AI in Management, Telemedicine, and Process Support

Направление	Примеры систем / технологий	Ключевые эффекты и результаты	Страны / Регионы
Автоматизация документооборота	RoboDoc (РФ), NLP-системы для транскрипции	Сокращение времени на заполнение документов; снижение числа ошибок и опечаток; повышение точности отчетов на 14,5%.	Россия, США, ЕС
Управление расписанием и ресурсами	Интеллектуальные модули планирования (Москва), ИИ-планировщики	Оптимизация очередей на КТ/МРТ; прогнозирование загрузки отделений; снижение времени ожидания для пациентов.	Россия, США
Телемедицина и чат-боты	Ping An Good Doctor (Китай), XiaoE (Китай), виртуальные ассистенты	Направление пациентов к нужному специалисту с точностью 99%; круглосуточная поддержка; снижение нагрузки на поликлиники.	Китай, США
Мониторинг хронических больных	Носимые устройства + ИИ-анализ (Tencent)	Снижение ложных срабатываний на 68%; раннее выявление отклонений; проактивная помощь в реальном времени.	Китай, США

Наряду с многообещающими возможностями, внедрение ИИ в здравоохранение сопряжено с рядом системных рисков. Ключевая проблема – качество и репрезентативность обучающих данных: устаревшие, неполные или смещённые выборки приводят к алгоритмической предвзятости и неравному качеству помощи, особенно при переносе моделей между разными странами и популяциями. В докладе ВОЗ подчёркивается, что системы, обученные на западных выборках, без адаптации могут работать некорректно в иных социально-экономических и этнокультурных условиях, что требует локализации и дообучения на местных данных³. Важное ограничение – низкая интерпретируемость «чёрных ящиков» [30], снижающая доверие врачей; существующие методы *explainable AI* пока далеки от совершенства [21]. Дополнительный риск связан с редкими, но потенциально катастрофическими ошибками: кейс *IBM Watson for Oncology*, где ИИ рекомендовал онкопациентам неэффективные и опасные режимы терапии [22], показал необходимость строгой валидации, многоэтапного тестирования и независимой экспертизы перед клиническим внедрением, особенно в критически важных областях.

Не менее значимы эτικο-правовые и организационные вызовы. Требуется гарантировать конфиденциальность и защиту медицинских данных, предотвратить подчинение интересов пациентов коммерческим или государственным целям и закрепить в регулировании принципы биоэтики и прав человека. Нерешённым остаётся вопрос распределения ответственности: при ошибках, связанных с рекомендациями ИИ, юридическая ответственность практически всегда лежит на враче, что сдерживает использование таких систем и требует новых регуляторных подходов, включая специальные режимы сертификации. Недостаток доверия, дефицит подготовки кадров и опасения за профессиональную роль врача усиливают сопротивление внедрению ИИ, тогда как ограниченность самих технологий – ориентация на узкие, формализуемые задачи при слабости в комплексном клиническом и этическом выборе – подтверждает актуальность подхода «ИИ как инструмент, а не замена врачу»: ИИ должен расширять возможности специалиста и избавлять его от рутины, но окончательное решение и ответственность должны оставаться за человеком.

В таблице 3 суммируются основные уязвимости и трудности применения ИИ в медицинской практике.

³ World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance. Geneva: WHO, 2021. URL: <https://www.who.int/publications/item/9789240029200>

Таблица 3.

Риски и проблемы внедрения ИИ в здравоохранение**Table 3. Risks and Challenges of Implementing AI in Healthcare**

Категория риска	Проявление	Примеры / Последствия	Предлагаемые меры
Качество и репрезентативность данных	Алгоритмическая предвзятость (bias)	Некорректная работа моделей на данных других популяций; усиление неравенства в качестве медицинской помощи.	Локализация моделей, валидация на местных данных
Интерпретируемость решений	«Чёрный ящик» глубоких нейросетей	Недоверие врачей; сложность принятия клинических решений без понимания логики ИИ.	Внедрение explainable AI (XAI)
Ошибки и безопасность	Случаи некорректных рекомендаций (IBM Watson for Oncology)	Рекомендации опасных режимов терапии; потенциальный вред пациентам.	Строгая валидация, независимые экспертизы
Этические и правовые аспекты	Конфиденциальность данных, ответственность за ошибки	Риски утечек персональных данных; неясность распределения ответственности между врачом и разработчиком.	Чёткое регулирование, сертификация ИИ-систем
Принятие технологий врачами	Соппротивление внедрению, недостаток цифровой грамотности	Замедление внедрения; неполное использование потенциала ИИ.	Обучение врачей, интеграция ИИ в образование

Заключение

Технологии ИИ уже стали важным инструментом в здравоохранении, повышая точность и скорость диагностики, персонализируя лечение и оптимизируя административные процессы. Масштабы и модели внедрения различаются: США и Китай задают темп благодаря крупным инвестициям, развитой экосистеме решений и масштабным пилотам, тогда как Россия демонстрирует позитивную динамику, выстраивая стратегию, нормативную базу и тестируя отечественные ИИ-системы. В совокупности это показывает, что ИИ превращается в ключевую инфраструктуру здравоохранения, проникая от уровня отдельных кабинетов до национальных систем и улучшая клинические, экономические и организационные показатели.

Одновременно ИИ несёт серьёзные риски, связанные с качеством и репрезентативностью данных, непрозрачностью алгоритмов, этикой обращения с персональной информацией и распределением ответственности за

ошибки, а также с организационными барьерами внедрения. Реализовать трансформационный потенциал ИИ возможно лишь при развитии стандартов испытаний и сертификации, укреплении правового и этического регулирования, инвестициях в инфраструктуру данных и подготовке медицинских кадров к работе с интеллектуальными системами. Ключевой задачей становится формирование доверия к ИИ у врачей и пациентов, а также международный обмен опытом и выработка общих стандартов. При таком подходе ИИ выступает не заменой, а усилителем компетенций врача, способствуя более точной, эффективной и гуманной медицине.

Список литературы

1. Бородулина, Е.А., Гогоберидзе, Ю.Т., Просвиркин, И.А., Бородулин, Б.Б., Вдоушкина, Е.С., Поваляева, Л.В., Жилинская, К.В., Поваляев, Е.И., & Карась, С.И. (2025). Оценка эффективности использования технологий искусственного интеллекта для скрининга заболеваний легких в муниципальной больнице. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*, 40(1), 209–217. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-1-209-217>. EDN: <https://elibrary.ru/PTTAQR>
2. Васильев, Ю.А., Владимирский, А.В., Омелянская, О.В., Решетников, Р.В., Блохин, И.А., Коденко, М.Р., & Нанова, О.Г. (2024). Обзор метаанализов о применении искусственного интеллекта в лучевой диагностике. *Медицинская визуализация*, 28(3), 22–41. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1425>. EDN: <https://elibrary.ru/QYASNZ>
3. Васильев, Ю.А., Владимирский, А.В., Бондарчук, Д.В., Кожихина, Д.Д., Решетников, Р.В., Блохин, И.А., Соловьев, А.В., & Гатин, Д.В. (2023). Значение технологий искусственного интеллекта для профилактики дефектов в работе врача-рентгенолога. *Врач и информационные технологии*, (2), 16–27. https://doi.org/10.25881/18110193_2023_2_16. EDN: <https://elibrary.ru/SYZAQO>
4. Долгушева, Ю.А., Ефремова, Ю.Е., Горнякова, Н.Б., Кудрина, В.Г., Айрапетян, А.А., Миронов, Н.Ю., Богданова, В.О., & Сорокин, Е.В. (2024). Хроническая сердечная недостаточность: лекарственное обеспечение, диспансерное наблюдение и перспективы использования цифровых технологий. *РМЖ. Медицинское обозрение*, 8(7), 375–385. <https://doi.org/10.32364/2587-6821-2024-8-7-3>. EDN: <https://elibrary.ru/CPXJWW>
5. Ким, Г.И., Блеканов, И.С., Ежов, Ф.В., Коваленко, Л.А., Ларин, Е.С., Разумилов, Е.С., Пугин, К.В., Дадашов, М.С., Пягай, В.А., & Шматов, Д.В. (2024). Методы искусственного интеллекта в сердечно-сосудистой хирургии и диагностика патологии аорты и аортального клапана (обзор литературы). *Сибирский*

- журнал клинической и экспериментальной медицины*, 39(2), 36–45. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2024-39-2-36-45>. EDN: <https://elibrary.ru/TBHPDK>
6. Ковелькова, М.Н., & Яковлева, Е.Г. (2025). Системы искусственного интеллекта в профилактике и диагностике сердечно-сосудистой патологии в России (систематический обзор). *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*, 40(1), 28–41. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-1-28-41>. EDN: <https://elibrary.ru/ZKPMNP>
 7. Кульбакин, Д.Е., Чойнзонов, Е.Л., Толмачев, И.В., Стариков, Ю.В., Старикова, Е.Г., & Каверина, И.С. (2022). Искусственный интеллект в онкологии: области применения, перспективы и ограничения. *Вопросы онкологии*, 68(6), 691–699. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2022-68-6-691-699>. EDN: <https://elibrary.ru/LIKRKG>
 8. Мусаева, Ф.Т., Суменова, Е.Р., Исламгулов, А.Х., Кумыкова, З.М., Элипханова, Т.С., Ушаева, А.И., Хасиева, А.С., Озерова, Е.С., Хуснутдинова, Д.А., Набиуллина, А.А., Кулинская, Я.Ю., Якупова, Р.Р., & Мустафин, А.А. (2025). Роль искусственного интеллекта и новых методов визуализации в ранней диагностике рака поджелудочной железы: научный обзор. *Digital Diagnostics*, 6(2), 317–330. <https://doi.org/10.17816/DD670193>. EDN: <https://elibrary.ru/TFNTZA>
 9. Нероев, В.В., Зайцева, О.В., Петров, С.Ю., & Брагин, А.А. (2024). Применение искусственного интеллекта в офтальмологии: настоящее и будущее. *Российский офтальмологический журнал*, 17(2), 135–141. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-135-141>. EDN: <https://elibrary.ru/NWXIQQ>
 10. Нероев, В.В., Брагин, А.А., Зайцева, О.В., & Яни, Е.В. (2024). Разработка модели сегментации капилляров глазной поверхности по снимкам с офтальмологической щелевой лампы с использованием инструментов искусственного интеллекта. *Офтальмология*, 21(1), 100–106. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-1-100-106>. EDN: <https://elibrary.ru/OHRNLM>
 11. Полушин, Ю.С., Шлык, И.В., Смолин, Н.С., & Тимофеев, Г.А. (2024). Цифровизация в анестезиологии-реаниматологии — задел для искусственного интеллекта? *Вестник анестезиологии и реаниматологии*, 21(6), 6–16. <https://doi.org/10.24884/2078-5658-2024-21-6-6-16>. EDN: <https://elibrary.ru/QOEFRI>
 12. Пранович, А.А., Исмаилов, А.К., Карельская, Н.А., Костин, А.А., Кармазановский, Г.Г., & Грицкевич, А.А. (2022). Искусственный интеллект в диагностике и лечении мочекаменной болезни: обзор литературы. *Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения*, 8(1), 42–57. <https://doi.org/10.29188/2712-9217-2022-8-1-42-57>. EDN: <https://elibrary.ru/DRZBSD>
 13. Соловьёв, И.А., & Курочкина, О.Н. (2024). Приложения искусственного интеллекта в кардиологии: обзор. *Российский кардиологический журнал*, 29(11S),

5673. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-5673>. EDN: <https://elibrary.ru/SNQWYE>
14. Солодкий, В.А., Каприн, А.Д., Нуднов, Н.В., Харченко, Н.В., Ходорович, О.С., Запиров, Г.М., Шерстнёва, Т.В., Дибирова, Ш.М., & Канахина, Л.Б. (2023). Современные системы поддержки принятия врачебных решений на базе искусственного интеллекта для анализа цифровых маммографических изображений. *Вестник рентгенологии и радиологии*, 104(2), 151–162. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-151-162>. EDN: <https://elibrary.ru/ZMHPDG>
 15. Сперанская, А.А. (2022). Роль искусственного интеллекта в оценке прогрессирующих фиброзирующих болезней лёгких. *Терапевтический архив*, 94(3), 409–412. <https://doi.org/10.26442/00403660.2022.03.201407>. EDN: <https://elibrary.ru/QVCUWW>
 16. Трошина, Е.А., Захарова, С.М., Цыгулева, К.В., Ложкин, И.А., Королев, Д.В., Трухин, А.А., Зайцев, К.С., Солдатова, Т.В., & Гармаш, А.А. (2024). Применение искусственного интеллекта в ультразвуковой диагностике узловых образований щитовидной железы. *Клиническая и экспериментальная тиреоидология*, 20(1), 15–29. <https://doi.org/10.14341/ket12782>. EDN: <https://elibrary.ru/IOSPRQ>
 17. Трусов, Ю.А., Чупахина, В.С., Нуркаева, А.С., Яковенко, Н.А., Абленина, И.В., Латыпова, Р.Ф., Питке, А.П., Язовских, А.А., Иванов, А.С., Богатырева, Д.С., Попова, У.А., & Юзлекбаев, А.Ф. (2024). Применение искусственного интеллекта в диагностике кальцификации артерий. *Digital Diagnostics*, 5(1), 85–100. <https://doi.org/10.17816/DD623196>. EDN: <https://elibrary.ru/DDJDBN>
 18. Труфанов, Г.Е., & Ефимцев, А.Ю. (2023). Технологии искусственного интеллекта в МР-нейровизуализации. Взгляд рентгенолога. *Российский журнал персонализированной медицины*, 3(1), 6–17. <https://doi.org/10.18705/2782-3806-2023-3-1-6-17>. EDN: <https://elibrary.ru/KMOYDC>
 19. Филь, Т.С., & Бакулин, И.Г. (2024). Искусственный интеллект в диагностике и лечении воспалительных заболеваний кишечника (обзор литературы). *Колорпроктология*, 23(3), 136–149. <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2024-23-3-136-149>. EDN: <https://elibrary.ru/CEXWXX>
 20. Швороб, Д.С., Васяева, Т.А., Хрюкин, Е.А., & Папакина, А.В. (2025). Применение искусственного интеллекта в патологической анатомии. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*, 40(2), 211–217. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-2-211-217>. EDN: <https://elibrary.ru/VCDXNM>
 21. Adams, R., Henry, K.E., Sridharan, A., et al. (2022). Prospective, multi-site study of patient outcomes after implementation of the TREWS machine learning-based early warning system for sepsis. *Nature Medicine*, 28(7), 1455–1460. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01894-0>. EDN: <https://elibrary.ru/GXUQZG>

22. Al-Zaiti, S.S., Martin-Gill, C., Zègre-Hemsey, J.K., Bouzid, Z., Faramand, Z., Al-rawashdeh, M.O., et al. (2023). Machine learning for ECG diagnosis and risk stratification of occlusion myocardial infarction. *Nature Medicine*, 29(7), 1804–1813. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02396-3>. EDN: <https://elibrary.ru/IHEOEZ>
23. Boussina, A., Shashikumar, S.P., Malhotra, A., et al. (2024). Impact of a deep learning sepsis prediction model on quality of care and survival. *NPJ Digital Medicine*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00986-6>. EDN: <https://elibrary.ru/LDDYRE>
24. Cao, K., Xia, Y., Yao, J., Han, X., Lambert, L., Zhang, T., et al. (2023). Large-scale pancreatic cancer detection via non-contrast CT and deep learning. *Nature Medicine*, 29(12), 3033–3043. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02640-w>. EDN: <https://elibrary.ru/QPNNUU>
25. Eisemann, N., Bunk, S., Mukama, T., Baltus, H., Elsner, S.A., Gomille, T., et al. (2025). Nationwide real-world implementation of AI for cancer detection in population-based mammography screening. *Nature Medicine*, 31(3), 917–924. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03408-6>. EDN: <https://elibrary.ru/HZRIAD>
26. Groh, M., Badri, O., Daneshjou, R., Koochek, A., Harris, C., Soenksen, L.R., et al. (2024). Deep learning-aided decision support for diagnosis of skin disease across skin tones. *Nature Medicine*, 30(2), 573–583. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02728-3>. EDN: <https://elibrary.ru/NAQFAM>
27. Karsenti, D., Tharsis, G., Perrot, B., Cattan, P., Percie du Sert, A., Venezia, F., et al. (2023). Effect of real-time computer-aided detection of colorectal adenoma in routine colonoscopy (COLO-GENIUS): a single-centre randomised controlled trial. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 8(8), 726–734. [https://doi.org/10.1016/S2468-1253\(23\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S2468-1253(23)00104-8). EDN: <https://elibrary.ru/ORVAVB>
28. Khanna, A., Wolf, T., Frank, I., et al. (2025). Enhancing accuracy of operative reports with automated artificial intelligence analysis of surgical video. *Journal of the American College of Surgeons*, 240(5), 739–746. <https://doi.org/10.1097/XCS.0000000000001352>. EDN: <https://elibrary.ru/KBKJCK>
29. Lång, K., Josefsson, V., Larsson, A.-M., Larsson, S., Högberg, C., Sartor, H., et al. (2023). Artificial intelligence-supported screen reading versus standard double reading in the Mammography Screening with Artificial Intelligence trial (MASAI): a clinical safety analysis of a randomised, controlled, non-inferiority, single-blinded, screening accuracy study. *The Lancet Oncology*, 24(8), 936–944. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00298-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00298-X). EDN: <https://elibrary.ru/DMEAUK>
30. Leibig, C., Brehmer, M., Bunk, S., et al. (2022). Combining the strengths of radiologists and AI for breast cancer screening: a retrospective analysis. *The Lancet Digital Health*, 4(7), e507–e519. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00070-X). EDN: <https://elibrary.ru/UJQRYE>

31. Porto, B.M., & Fogliatto, F.S. (2024). Enhanced forecasting of emergency department patient arrivals using feature engineering approach and machine learning. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 24(1), 377. <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02788-6>. EDN: <https://elibrary.ru/DQOSMD>
32. Reddy, S. (2022). Explainability and artificial intelligence in medicine. *The Lancet Digital Health*, 4(4), e214–e215. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00029-2). EDN: <https://elibrary.ru/HVOMQM>
33. Singh, G. (2023). Artificial intelligence in colorectal cancer: a review. *Siberian Journal of Oncology*, 22(3), 99–107. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2023-22-3-99-107>. EDN: <https://elibrary.ru/EXXVEV>
34. Taylor-Phillips, S., & Freeman, K. (2022). Artificial intelligence to complement rather than replace radiologists in breast screening. *The Lancet Digital Health*, 4(7), e478–e479. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00094-2). EDN: <https://elibrary.ru/VCPLEW>

References

1. Borodulina, E.A., Gogoberidze, Yu.T., Prosvirkin, I.A., Borodulin, B.B., Vdoushkina, E.S., Povalyaeva, L.V., Zhilinskaya, K.V., Povalyaev, E.I., & Karas, S.I. (2025). Evaluation of the effectiveness of using artificial intelligence technologies for screening lung diseases in a municipal hospital. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 40(1), 209–217. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-1-209-217>. EDN: <https://elibrary.ru/PTTAQR>
2. Vasiliev, Yu.A., Vladzimirsky, A.V., Omelyanskaya, O.V., Reshetnikov, R.V., Blokhin, I.A., Kodenko, M.R., & Nanova, O.G. (2024). Overview of meta-analyses on the use of artificial intelligence in radiological diagnostics. *Medical Imaging*, 28(3), 22–41. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1425>. EDN: <https://elibrary.ru/QYASNZ>
3. Vasiliev, Yu.A., Vladzimirsky, A.V., Bondarchuk, D.V., Kozhikhina, D.D., Reshetnikov, R.V., Blokhin, I.A., Soloviev, A.V., & Gatin, D.V. (2023). The significance of artificial intelligence technologies for the prevention of defects in the work of a radiologist. *Medical Doctor and Information Technologies*, (2), 16–27. https://doi.org/10.25881/18110193_2023_2_16. EDN: <https://elibrary.ru/SYZAOQ>
4. Dolgusheva, Yu.A., Efremova, Yu.E., Gornyakova, N.B., Kudrina, V.G., Airapetyan, A.A., Mironov, N.Yu., Bogdanova, V.O., & Sorokin, E.V. (2024). Chronic heart failure: drug provision, dispensary observation, and prospects for using digital technologies. *Russian Medical Inquiry*, 8(7), 375–385. <https://doi.org/10.32364/2587-6821-2024-8-7-3>. EDN: <https://elibrary.ru/CPXJWW>
5. Kim, G.I., Blekanov, I.S., Ezhov, F.V., Kovalenko, L.A., Larin, E.S., Razumilov, E.S., Pugin, K.V., Dadashov, M.S., Pyagai, V.A., & Shmatov, D.V. (2024). Artificial

- intelligence methods in cardiovascular surgery and diagnosis of aortic and aortic valve pathology (literature review). *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 39(2), 36–45. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2024-39-2-36-45>. EDN: <https://elibrary.ru/TBHPDK>
6. Kovelkova, M.N., & Yakovleva, E.G. (2025). Artificial intelligence systems in the prevention and diagnosis of cardiovascular pathology in Russia (systematic review). *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 40(1), 28–41. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-1-28-41>. EDN: <https://elibrary.ru/ZKPMNP>
 7. Kulbakin, D.E., Choyzonov, E.L., Tolmachev, I.V., Starikov, Yu.V., Starikova, E.G., & Kaverina, I.S. (2022). Artificial intelligence in oncology: areas of application, prospects, and limitations. *Voprosy Onkologii*, 68(6), 691–699. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2022-68-6-691-699>. EDN: <https://elibrary.ru/LIKRKG>
 8. Musaeva, F.T., Sumenova, E.R., Islamgulov, A.Kh., Kumykov, Z.M., Elipkhanova, T.S., Ushaeva, A.I., Khasieva, A.S., Ozerova, E.S., Khusnutdinova, D.A., Nabiullina, A.A., Kulinskaya, Ya. Yu., Yakupova, R.R., & Mustafin, A.A. (2025). The role of artificial intelligence and new imaging methods in early diagnosis of pancreatic cancer: a scientific review. *Digital Diagnostics*, 6(2), 317–330. <https://doi.org/10.17816/DD670193>. EDN: <https://elibrary.ru/TFNTZA>
 9. Neroev, V.V., Zaitseva, O.V., Petrov, S.Yu., & Bragin, A.A. (2024). Application of artificial intelligence in ophthalmology: present and future. *Russian Ophthalmological Journal*, 17(2), 135–141. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-135-141>. EDN: <https://elibrary.ru/NWXIQQ>
 10. Neroev, V.V., Bragin, A.A., Zaitseva, O.V., & Yani, E.V. (2024). Development of a model for segmentation of ocular surface capillaries from slit-lamp images using artificial intelligence tools. *Ophthalmology Journal*, 21(1), 100–106. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-1-100-106>. EDN: <https://elibrary.ru/OHRNLM>
 11. Polushin, Yu.S., Shlyk, I.V., Smolin, N.S., & Timofeev, G.A. (2024). Digitalization in anesthesiology and resuscitology — a foundation for artificial intelligence? *Vestnik Anesteziologii i Reanimatologii*, 21(6), 6–16. <https://doi.org/10.24884/2078-5658-2024-21-6-6-16>. EDN: <https://elibrary.ru/QOEFRI>
 12. Pranovich, A.A., Ismailov, A.K., Karelskaya, N.A., Kostin, A.A., Karmazanovsky, G.G., & Gritskovich, A.A. (2022). Artificial intelligence in the diagnosis and treatment of urolithiasis: a literature review. *Russian Journal of Telemedicine and eHealth*, 8(1), 42–57. <https://doi.org/10.29188/2712-9217-2022-8-1-42-57>. EDN: <https://elibrary.ru/DRZBSD>
 13. Soloviev, I.A., & Kurochkina, O.N. (2024). Applications of artificial intelligence in cardiology: a review. *Russian Journal of Cardiology*, 29(11S), 5673. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-5673>. EDN: <https://elibrary.ru/SNQWYE>

14. Solodky, V.A., Kaprin, A.D., Nudnov, N.V., Kharchenko, N.V., Khodorovich, O.S., Zapirov, G.M., Sherstneva, T.V., Dibirova, Sh.M., & Kanakhina, L.B. (2023). Modern artificial intelligence-based clinical decision support systems for analysis of digital mammographic images. *Vestnik Rentgenologii i Radiologii*, 104(2), 151–162. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-151-162>. EDN: <https://elibrary.ru/ZMHPDG>
15. Speranskaya, A.A. (2022). The role of artificial intelligence in the assessment of progressive fibrosing lung diseases. *Terapevticheskii Arkhiv*, 94(3), 409–412. <https://doi.org/10.26442/00403660.2022.03.201407>. EDN: <https://elibrary.ru/QVCUWW>
16. Troshina, E.A., Zakharova, S.M., Tsyguleva, K.V., Lozhkin, I.A., Korolev, D.V., Trukhin, A.A., Zaitsev, K.S., Soldatova, T.V., & Garmash, A.A. (2024). Application of artificial intelligence in ultrasound diagnostics of thyroid nodules. *Clinical and Experimental Thyroidology*, 20(1), 15–29. <https://doi.org/10.14341/ket12782>. EDN: <https://elibrary.ru/IOSPRQ>
17. Trusov, Yu.A., Chupakhina, V.S., Nurkaeva, A.S., Yakovenko, N.A., Ablenina, I.V., Latypova, R.F., Pitke, A.P., Yazovskikh, A.A., Ivanov, A.S., Bogatyreva, D.S., Popova, U.A., & Yuzlekbaev, A.F. (2024). Application of artificial intelligence in the diagnosis of arterial calcification. *Digital Diagnostics*, 5(1), 85–100. <https://doi.org/10.17816/DD623196>. EDN: <https://elibrary.ru/DDJDBN>
18. Trufanov, G.E., & Efimtsev, A. Yu. (2023). Artificial intelligence technologies in MR neuroimaging. A radiologist's perspective. *Russian Journal for Personalized Medicine*, 3(1), 6–17. <https://doi.org/10.18705/2782-3806-2023-3-1-6-17>. EDN: <https://elibrary.ru/KMOYDC>
19. Fil, T.S., & Bakulin, I.G. (2024). Artificial intelligence in the diagnosis and treatment of inflammatory bowel disease (literature review). *Koloproktologia*, 23(3), 136–149. <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2024-23-3-136-149>. EDN: <https://elibrary.ru/CEXWXX>
20. Shvorob, D.S., Vasyaeva, T.A., Khryukin, E.A., & Papakina, A.V. (2025). Application of artificial intelligence in pathological anatomy. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 40(2), 211–217. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-2-211-217>. EDN: <https://elibrary.ru/VCDXNM>
21. Adams, R., Henry, K.E., Sridharan, A., et al. (2022). Prospective, multi-site study of patient outcomes after implementation of the TREWS machine learning-based early warning system for sepsis. *Nature Medicine*, 28(7), 1455–1460. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01894-0>. EDN: <https://elibrary.ru/GXUQGZ>
22. Al-Zaiti, S.S., Martin-Gill, C., Zègre-Hemsey, J.K., Bouzid, Z., Faramand, Z., Al-rawashdeh, M.O., et al. (2023). Machine learning for ECG diagnosis and risk stratification of occlusion myocardial infarction. *Nature Medicine*, 29(7), 1804–1813. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02396-3>. EDN: <https://elibrary.ru/IHEOEZ>

23. Boussina, A., Shashikumar, S.P., Malhotra, A., et al. (2024). Impact of a deep learning sepsis prediction model on quality of care and survival. *NPJ Digital Medicine*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00986-6>. EDN: <https://elibrary.ru/LDDYRE>
24. Cao, K., Xia, Y., Yao, J., Han, X., Lambert, L., Zhang, T., et al. (2023). Large-scale pancreatic cancer detection via non-contrast CT and deep learning. *Nature Medicine*, 29(12), 3033–3043. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02640-w>. EDN: <https://elibrary.ru/QPNNNU>
25. Eisemann, N., Bunk, S., Mukama, T., Baltus, H., Elsner, S.A., Gomille, T., et al. (2025). Nationwide real-world implementation of AI for cancer detection in population-based mammography screening. *Nature Medicine*, 31(3), 917–924. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03408-6>. EDN: <https://elibrary.ru/HZRIAD>
26. Groh, M., Badri, O., Daneshjou, R., Koochek, A., Harris, C., Soenksen, L.R., et al. (2024). Deep learning-aided decision support for diagnosis of skin disease across skin tones. *Nature Medicine*, 30(2), 573–583. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02728-3>. EDN: <https://elibrary.ru/NAQFAM>
27. Karsenti, D., Tharsis, G., Perrot, B., Cattan, P., Percie du Sert, A., Venezia, F., et al. (2023). Effect of real-time computer-aided detection of colorectal adenoma in routine colonoscopy (COLO-GENIUS): a single-centre randomised controlled trial. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 8(8), 726–734. [https://doi.org/10.1016/S2468-1253\(23\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S2468-1253(23)00104-8). EDN: <https://elibrary.ru/ORVAVB>
28. Khanna, A., Wolf, T., Frank, I., et al. (2025). Enhancing accuracy of operative reports with automated artificial intelligence analysis of surgical video. *Journal of the American College of Surgeons*, 240(5), 739–746. <https://doi.org/10.1097/XCS.0000000000001352>. EDN: <https://elibrary.ru/KBKJCK>
29. Lång, K., Josefsson, V., Larsson, A.-M., Larsson, S., Högberg, C., Sartor, H., et al. (2023). Artificial intelligence-supported screen reading versus standard double reading in the Mammography Screening with Artificial Intelligence trial (MASAI): a clinical safety analysis of a randomised, controlled, non-inferiority, single-blinded, screening accuracy study. *The Lancet Oncology*, 24(8), 936–944. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00298-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00298-X). EDN: <https://elibrary.ru/DMEAUK>
30. Leibig, C., Brehmer, M., Bunk, S., et al. (2022). Combining the strengths of radiologists and AI for breast cancer screening: a retrospective analysis. *The Lancet Digital Health*, 4(7), e507–e519. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00070-X). EDN: <https://elibrary.ru/UJQRYE>
31. Porto, B.M., & Fogliatto, F.S. (2024). Enhanced forecasting of emergency department patient arrivals using feature engineering approach and machine learning. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 24(1), 377. <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02788-6>. EDN: <https://elibrary.ru/DQOSMD>

32. Reddy, S. (2022). Explainability and artificial intelligence in medicine. *The Lancet Digital Health*, 4(4), e214–e215. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00029-2). EDN: <https://elibrary.ru/HVOMQM>
33. Singh, G. (2023). Artificial intelligence in colorectal cancer: a review. *Siberian Journal of Oncology*, 22(3), 99–107. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2023-22-3-99-107>. EDN: <https://elibrary.ru/EXXVEV>
34. Taylor-Phillips, S., & Freeman, K. (2022). Artificial intelligence to complement rather than replace radiologists in breast screening. *The Lancet Digital Health*, 4(7), e478–e479. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00094-2). EDN: <https://elibrary.ru/VCPLEW>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Беляев Дмитрий Анатольевич, профессор кафедры философии, политологии и теологии, главный специалист по научной работе и международному сотрудничеству, доктор философских наук

Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семёнова-Тян-Шанского; Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал) ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)»
ул. Ленина, 42, г. Липецк, 398020, Российская Федерация; ул. Краснознаменная, влд. 4, г. Липецк, 398006, Российская Федерация
dm.a.belyaev@gmail.com

Скрипкин Иван Николаевич, доцент кафедры социально-экономических наук, кандидат педагогических наук

Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал) ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)»
ул. Краснознаменная, влд. 4, г. Липецк, 398006, Российская Федерация
Ivan-skripkin@yandex.ru

Смирнов Михаил Юрьевич, доцент кафедры естественных и технических наук, кандидат физико-математических наук

Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал) ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)»
ул. Краснознаменная, влд. 4, г. Липецк, 398006, Российская Федерация
m.smirnov@mgutm.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Belyaev, Professor of the Department of Philosophy, Political Science and Theology, Chief Specialist for Scientific Work and International Cooperation, Doctor of Philosophy

Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky; Lipetsk Cossack Institute of Technology and Management (branch) of the "Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University)"

42, Lenin Str., Lipetsk, 398020, Russian Federation; 4, Krasnoznamennaya Str., Lipetsk, 398006, Russian Federation

dm.a.belyaev@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8062-1039>

Ivan N. Skripkin, Associate Professor of the Department of Social and Economic Sciences, Candidate of Pedagogical Sciences

Lipetsk Cossack Institute of Technology and Management (branch) of the "Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University)"

4, Krasnoznamennaya Str., Lipetsk, 398006, Russian Federation

Ivan-skripkin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4276-2081>

Mikhail Yu. Smirnov, Associate Professor of the Department of Natural and Technical Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Lipetsk Cossack Institute of Technology and Management (branch) of the "Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University)"

4, Krasnoznamennaya Str., Lipetsk, 398006, Russian Federation

m.smirnov@mgutn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9820-9253>

Поступила 08.12.2025

После рецензирования 11.01.2026

Принята 15.01.2026

Received 08.12.2025

Revised 11.01.2026

Accepted 15.01.2026

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: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1796](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1796)

EDN: [SMQDHU](https://www.edn.ru/SMQDHU)

УДК 616.12-005.4-06:616.142-008.6(571.51-25)



Определение факторов риска ИБС у пациентов с острым коронарным синдромом, госпитализированных в КМКБ № 20 г. Красноярск

Н.В. Аксютин^{1,2}, Т.Ю. Большакова¹, В.В. Козлов^{3,4}, А.Д. Нарожная¹,
А.М. Гряднева¹, И.А. Демичев^{1,2}, Е.Н. Кононов²

¹Красноярский государственный медицинский университет им. проф.

В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России, Красноярск, Российская Федерация

²Красноярская межрайонная клиническая больница №20 им. И.С. Берзона,
Красноярск, Российская Федерация

³Первый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова, Москва, Российская Федерация

⁴Академия Спорта Азербайджана, Баку, Азербайджан

Аннотация

Обоснование. Учитывая высокую распространенность ИБС, приводящую к большой смертности и летальности, с целью профилактики этого заболевания особое внимание уделяют коррекции модифицированных факторов риска.

Цель – определить различия в имеющихся факторах риска ИБС у пациентов с ОИМ и НС, находившихся на стационарном лечении в КМКБ №20 г. Красноярск за период с января по декабрь 2023 г.

Материалы и методы. Проведен анализ 522 историй болезней с ОКС. В первую группу отобрано 166 больных с ОИМ (96 мужчин, 70 женщин), во вторую группу - 356 пациентов с НС (170 мужчин, 186 женщин). Медиана возраста пациентов 1 группы (65,00 [54,00; 74,00] лет), 2 группы - (68,00 [60,00; 75,00]), $p > 0,05$. Статистическая обработка проводилась с использованием критерия χ^2 , Манна-Уитни, отношения шансов.

Результаты исследования. Табакокурение преобладает у пациентов с ОИМ по сравнению с НС (34,3% относительно 16,7%, $p < 0,0001$). Отношение шансов

показывает, что у пациентов с ИБС при наличии табакокурения риск развития ОИМ повышается в 2,6 раз. В группе ОИМ тенденция к преобладанию гипертриглицеридемии по сравнению с НС (29,3% относительно 21,3%, $p=0,059$). При этом более высокий уровень ТГ в группе больных с ОИМ в сравнении с пациентами с НС (1,22 [0,84; 1,87] относительно 1,04 [0,69; 1,61], $p<0,001$). По другим факторам риска ИБС различий нет. У пациентов, поступивших в КМКБ №20 им. И.С. Берзона г. Красноярск в 2023 году с ОКС, в случае подтвержденного ОИМ чаще выявлялся такой фактор риска, как табакокурение и был выше уровень ТГ по сравнению с пациентами с НС.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца; факторы риска; острый инфаркт миокарда; нестабильная стенокардия; дислипидемия; табакокурение; гипертриглицеридемия

Для цитирования. Аксютина, Н. В., Большакова, Т. Ю., Козлов, В. В., Нарожная, А. Д., Гриднева, А. М., Демичев, И. А., & Кононов, Е. Н. (2026). Определение факторов риска ИБС у пациентов с острым коронарным синдромом, госпитализированных в КМКБ № 20 г. Красноярск. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 588–604. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1796>

Determination of risk factors for coronary heart disease in patients with acute coronary syndrome hospitalized in Krasnoyarsk Interdistrict Clinical Hospital No. 20

N.V. Aksyutina^{1,2}, T.Yu. Bolshakova¹, V.V. Kozlov^{3,4}, A.D. Narozhnaya¹,
A.M. Gridneva¹, I.A. Demichev^{1,2}, E.N. Kononov²

¹Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V.F. Voyno-Yasenetsky, Ministry of Health of the Russian Federation, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Krasnoyarsk Interdistrict Clinical Hospital No. 20 named after I.S. Berzon, Krasnoyarsk, Russian Federation

³I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russian Federation

⁴Azerbaijan State Academy of Physical Culture and Sports, Baku, Azerbaijan

Abstract

Background. Given the high prevalence of coronary heart disease, which leads to a high mortality rate, special attention is paid to the correction of modified risk factors in order to prevent this disease.

Purpose. To determine the differences in the existing risk factors of coronary heart disease in patients AMI and NS who were hospitalized at the Krasnoyarsk Municipal Clinical Hospital No. 20 from January to December 2023.

Materials and methods. An analysis of 522 case histories with ACS was conducted. The first group selected 166 patients with AMI (96 men, 70 women), and in the second group - 356 patients with NS (170 men, 186 women). Median age of patients in group 1 (65.00 [54.00; 74.00] years), group 2 - (68.00 [60.00; 75.00]), $p > 0.05$. Statistical processing was carried out using the χ^2 , Mann-Whitney criterion, the odds ratio.

Results. Tobacco smoking prevails in patients with AMI compared with unstable angina (34.3% versus 16.7%, $p < 0.0001$). The odds ratio shows that in patients with coronary heart disease, the risk of AMI increases 2.6 times in the presence of smoking. In the AMI group, there was a tendency for hypertriglyceridemia to prevail compared with unstable angina (29.3% versus 21.3%, $p = 0.059$). At the same time, the TG level was higher in the group of patients with AMI compared with patients with unstable angina (1.22 [0.84; 1.87] versus 1.04 [0.69; 1.61], $p < 0.001$). There are no differences in other risk factors for coronary heart disease. In patients admitted to the I.S. Berzon Clinical Hospital No. 20. In Krasnoyarsk in 2023 with ACS, in the case of confirmed AMI, a risk factor such as smoking was more often detected and the TG level was higher compared to patients with unstable angina.

Keywords: coronary heart disease; risk factors; acute myocardial infarction; unstable angina; dyslipidemia; smoking; hypertriglyceridemia

For citation. N Aksyutina, N. V., Bolshakova, T. Yu., Kozlov, V. V., Narozhnaya, A. D., Gridneva, A. M., Demichev, I. A., & Kononov, E. N. (2026). Determination of risk factors for coronary heart disease in patients with acute coronary syndrome hospitalized in Krasnoyarsk Interdistrict Clinical Hospital No. 20. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 588–604. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1796>

Введение

В Российской Федерации, как и во всем мире, болезни системы кровообращения (БСК) являются глобальной проблемой [5; 14; 22].

Анализ структуры смертности от БСК показал, что наибольший удельный вес имеет ишемическая болезнь сердца (ИБС) [14]. В Красноярском крае в 2023 г. смертность от БСК увеличилась на 11% в сравнении с 2022 г. (коэффициент смертности в 2023 г. составил 192 человека на 100 тыс. населения, в 2022 г. – 171,9). В тоже время коэффициент смертности от инфаркта миокарда снизился в 2 раза (в 2023 г. – 10,8 человек, в 2022 г. – 20,5) [6]. Вероятно, это напрямую связано с применением современных технологий на этапе оказания экстренной медицинской помощи при остром коронарном синдроме (ОКС), который объединяет два клинических варианта: острый инфаркт миокарда (ОИМ) и нестабильную стенокардию (НС) [3; 15].

Учитывая распространенность ИБС, приводящую к высокой смертности, кардиологическое сообщество с целью профилактики этого заболевания

ния рекомендует уделять особое внимание коррекции модифицированных факторов риска [10; 12; 16]. К таковым относятся гиперлипидемия, табакокурение, ожирение, сахарный диабет, артериальная гипертензия, гиподинамия, острый и хронический стресс [4; 7; 10; 12].

Основными звеньями патогенеза ИБС являются дисфункция эндотелия и нарушение липидного обмена [1; 9; 17; 20; 21]. Согласно данным Российского регистра острого инфаркта миокарда (РЕГИОН-ИМ), наблюдается высокая частота гиперлипидемии у пациентов с ОИМ [11; 23].

Одним из значимых модифицируемых факторов риска всех клинических проявлений ИБС является артериальная гипертензия. При наличии дислипидемии риск развития ИБС увеличивается в 2-5 раз, а если у пациента помимо этого имеется артериальная гипертензия, риск ИБС уже увеличивается до 6 раз [10; 12; 15].

Наличие у пациента сахарного диабета приводит к увеличению риска развития ИБС в 3-4 раза. Среди больных ОИМ каждый четвертый – пятый пациент с ОИМ имеет сахарный диабет [7].

По результатам отечественных и международных исследований, табакокурение повышает риск возникновения ИБС в 2,2 раза, при этом риск развития стенокардии – в 2 раза, острого инфаркта миокарда – в 2 раза, внезапной смерти – в 4,9 раз [4].

Учитывая более высокую летальность при ОИМ (3,6%) в сравнении с НС (1,1%) при стандартизированном оказании медицинской помощи (по данным КМКБ №20, г. Красноярск) [2], мы провели исследование с целью определения различий в имеющихся факторах риска ИБС у больных с ОИМ и НС, находившихся на стационарном лечении в КМКБ №20 г. Красноярск за период с января по декабрь 2023 г.

Задачами исследования явились:

- Провести анализ историй болезни пациентов, находящихся на госпитализации в КМКБ №20 г. Красноярск с ОКС в 2023 г.
- Проанализировать имеющиеся факторы риска ИБС раздельно у больных с НС и у пациентов с ОИМ.
- Провести сравнительный анализ имеющихся факторов риска ИБС между группами больных с НС и ОИМ.

Материалы и методы

Проведен анализ 522 историй болезней больных, госпитализированных с диагнозом ОКС. Пациентов разделили на две группы. С ОИМ включили 166 пациентов (96 мужчин, 70 женщин), в группу с НС вошло 356 больных (170 мужчин, 186 женщин). Медиана возраста лиц первой группы

(65,00 [54,00; 74,00] лет) не имела статистически значимых отличий от медианы возраста пациентов второй группы (68,00 [60,00; 75,00]), $p > 0,05$. У пациентов проводилась оценка факторов риска ИБС по данным анамнеза, объективного исследования, а также по лабораторным показателям, включающим значения общего холестерина (ОХС), холестерина липопротеидов низкой плотности (ЛПНП), триглицеридов (ТГ). Дислипидемию устанавливали при уровне ОХС > 5 ммоль/л и/или ХС-ЛПНП $> 2,5$ ммоль/л, гипертриглицеридемию – при ТГ $> 1,7$ ммоль/л.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием критерия χ^2 (для качественных показателей), Манна-Уитни (для количественных показателей), отношения шансов при помощи пакета прикладных программ «EXCEL», «STATISTICA FOR WINDOWS 10.0», «IBM SPSS 20». При $p < 0,05$ полученные различия оценивались как статистически значимые.

Результаты исследования

Из имеющихся факторов риска ИБС у пациентов, включенных в исследование, нами получены различия между группой больных с ОИМ и с НС по наличию табакокурения и уровня гипертриглицеридемии.

В группе пациентов с диагностированным ОИМ табакокурение выявлялось статистически значимо чаще при сравнении с группой больных с НС (34,3% относительно 16,7%, $p < 0,0001$), рис. 1.



Рис. 1. Частота табакокурения в исследуемых группах.

Fig. 1. Smoking prevalence in the study groups.

Расчет отношения шансов показал, что у пациентов с диагностированной ИБС наличие табакокурения повышает риск развития ОИМ в 2,6 раз, рис. 2.

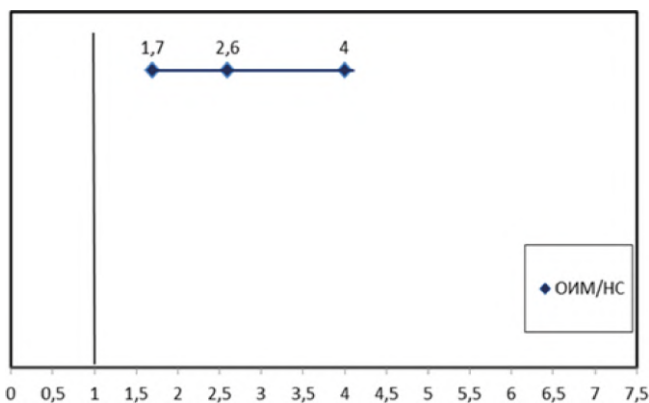


Рис. 2. Отношение шансов частоты табакокурения у больных с ОИМ.

Fig. 2. Odds ratio for the prevalence of smoking among patients with acute myocardial infarction.

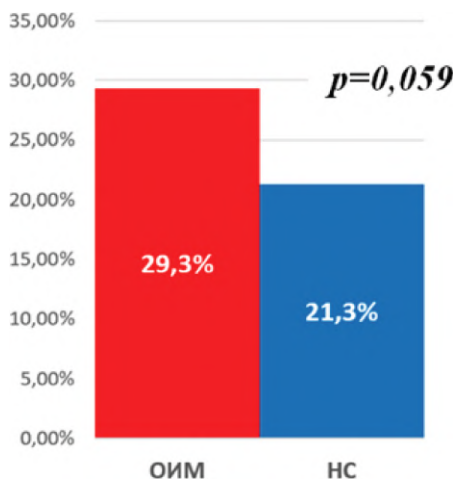


Рис. 3. Частота пациентов с гипертриглицеридемией в сравниваемых группах.

Fig. 3. Prevalence of patients with hypertriglyceridemia in the groups being compared.

У пациентов, включенных в исследование, статистический анализ показателей липидного профиля таких, как ОХС, ХС ЛПНП, ТГ, выявил, что

липидного спектра и адекватная гиполипидемическая терапия с акцентом на ТГ с целью уменьшения риска развития инфаркта миокарда. Лицам любой категории риска необходимо поддерживать целевой уровень триглицеридов $< 1,7$ ммоль/л [8]. Пациентам с наличием высокого и очень высокого риска для коррекции гипертриглицеридемии, согласно клиническим рекомендациям, рекомендуется назначить омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) и фибраты [8; 13]. В случае невозможности достижения целевого уровня ТГ $1,7$ - $2,3$ ммоль/л на фоне назначенной терапии статином, к лечению рекомендовано присоединить омега-3 ПНЖК в дозе до 2 г 2 раза в день; если уровень ТГ остается $> 2,3$ ммоль/л, тогда к статину следует добавить фенофибрат или препарат омега-3 ПНЖК в дозе до 2 г 2 раза в день; при наличии повышения уровня ТГ $> 5,0$ ммоль/л в лечение вводится назначение фенофибрата и препарата омега-3 ПНЖК в дозе до 2 г 2 раза в день [8; 13].

Наряду с изменениями липидного спектра и гипертриглицеридемией в развитии ОИМ играют роль и другие факторы риска, в том числе табакокурение [4; 16; 19]. Результаты отечественных и международных исследований свидетельствуют, что табакокурение повышает риск возникновения инфаркта миокарда в 2 раза [4]. У пациентов, находившихся на стационарном лечении в КМКБ №20 г. Красноярск в 2023 г., как показал статистический анализ, табакокурение увеличивает риск развития ОИМ $2,6$ раз, что значительно выше по сравнению с литературными данными. Пациенты-курильщики слабо мотивированы на отказ от курения, многие продолжают курить, даже находясь в стационаре. Учитывая это, необходимо активизировать работу по мотивации пациентов на отказ от табакокурения уже на стационарном этапе реабилитации с привлечением медицинских психологов, проведением школ по отказу от курения. С целью первичной профилактики ИБС необходимо более активно информировать население о возможности получения помощи при никотиновой зависимости в организованных центрах здоровья, а так же о существовании федеральной горячей линии для оказания помощи при отказе от табакокурения. Следует усилить меры профилактики табакокурения среди населения посредством новых информационных технологий, уделяя особое внимание лицам молодого возраста.

Список литературы

1. Абдуллаев, А. Х., Аляви, Б. А., Узоков, Ж. К., & Курмаева, Д. М. (2025). Влияемость и коррекция дислипидемии при ишемической болезни сердца у пожилых. *Российский журнал гериатрической медицины*, (2), 206–208. <https://doi.org/10.37586/2686-8636-2-2025-206-208>. EDN: <https://elibrary.ru/LQRZWS>

2. Аксюткина, Н. В., Большакова, Т. Ю., Нарожная, А. Д., & Гриднева, А. М. (2025). Анализ факторов риска у пациентов с острым коронарным синдромом, госпитализированных в КГБУЗ КМКБ №20 им. И.С. Берзона г. Красноярск. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 24(S5), 3. EDN: <https://elibrary.ru/WBVUFR>
3. Аксюткина, Н. В., Шульман, В. А., Никулина, С. Ю., Беспалов, А. В., Князева, И. С., Мордовский, В. С., ... & Севостьянова, И. И. (2018). Влияние реабилитации на качество жизни больных, перенесших острый коронарный синдром с экстренной ЧТКА и стентированием коронарных артерий (г. Красноярск). *В мире научных открытий*, 10(3), 77–99. <https://doi.org/10.12731/wsd-2018-3-77-99>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCOFB>
4. Баздырев, Е. Д., Максимов, С. А., Галимова, Н. А., Мулерова, Т. А., Индукаева, Е. В., Артамонова, Г. В., & Барбараш, О. Л. (2021). Связь курения с ишемической болезнью сердца в зависимости от других факторов сердечно-сосудистого риска. *Бюллетень сибирской медицины*, 20(1), 7–15. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2021-1-7-15>. EDN: <https://elibrary.ru/OFAFZB>
5. Бойцов, С. А., Шахнович, Р. М., Эрлих, А. Д., Терещенко, С. Н., Кукава, Н. Г., Рыгова, Ю. К., ... & Бельская, Е. В. (2021). Регистр острого инфаркта миокарда. РЕГИОН-ИМ — Российский регистр острого инфаркта миокарда. *Кардиология*, 61(6), 41–51. <https://doi.org/10.18087/cardio.2021.6.n1595>. EDN: <https://elibrary.ru/EVBEBV>
6. Болезни системы кровообращения. Организация кардиологической помощи населению Красноярского края. Реализация регионального проекта «Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями». (2024). Доклад о состоянии здоровья населения и организации здравоохранения Красноярского края по итогам деятельности за 2023 год / Министерство здравоохранения Красноярского края. Красноярск, 21–25. https://kraszdraz.ru/assets/content/image/files/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_1.pdf
7. Демидова, Т. Ю., & Ушанова, Ф. О. (2024). Нарушения липидного обмена у пациентов с сахарным диабетом 2 типа: фокус на гипертриглицеридемию. *FOCUS Эндокринология*, 5(2), 25–30. <https://doi.org/10.62751/2713-0177-2024-5-2-14>. EDN: <https://elibrary.ru/UQLBGU>
8. Ежов, М. В., Кухарчук, В. В., Сергиенко, И. В., Алиева, А. С., Анциферов, М. Б., Аншелес, А. А., ... & Шляхто, Е. В. (2023). Нарушения липидного обмена. Клинические рекомендации 2023. *Российский кардиологический журнал*, 28(5), 5471. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5471>. EDN: <https://elibrary.ru/YVZOWJ>

9. Захарьян, Е. А., Агеева, Е. С., Шрамко, Ю. И., Малый, К. Д., Гуртовая, А. К., & Ибрагимова, Р. Э. (2022). Современные представления о диагностической роли биомаркеров эндотелиальной дисфункции и возможностях ее коррекции. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*, 11(4S), 194–207. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2022-11-4S-194-207>. EDN: <https://elibrary.ru/QYTJGD>
10. Новикова, Р. А., Бохан, Н. А., Алексейчик, С. Е., & Панкратова, Ю. Ю. (2020). Прогнозирование возможного развития ишемической болезни сердца у молодых людей в зависимости от факторов риска и ее профилактика. *Военная медицина*, (4), 48–55. EDN: <https://elibrary.ru/IEVITE>
11. Обрезан, А. Г., Сережина, Е. К., & Шомин, А. В. (2023). Гипертриглицеридемия. Аспекты эпидемиологии и этиопатогенеза (обзор литературы). *Кардиология: новости, мнения, обучение*, 11(4), 14–21. <https://doi.org/10.33029/2309-1908-2023-11-4-14-21>. EDN: <https://elibrary.ru/XIGLSB>
12. Соловьев, О. В., & Шишкин, А. Н. (2021). Модифицируемые факторы риска ИБС. *Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения*, 16(2), 726–731. EDN: <https://elibrary.ru/HAVGPO>
13. Сусеков, А. В. (2020). Фенофибрат при лечении больных с гипертриглицеридемиями и атеросклерозом: новые данные. *Лечебное дело*, (1), 24–37. <https://doi.org/10.24411/2071-5315-2020-12189>. EDN: <https://elibrary.ru/XFLUWM>
14. Суслин, С. А., Кирьякова, О. В., Богатырева, Г. П., Измалков, Н. С., Садреева, С. Х., & Шешунова, Р. А. (2024). Болезни системы кровообращения как современная проблема общественного здоровья. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, (1), 540–560. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2024-1-540-560>. EDN: <https://elibrary.ru/NYLMUY>
15. Хасанжанова, Ф. О., Ташкенбаева, Э. Н., & Болтакулова, С. Д. (2021). Факторы риска, влияющие на течение нестабильных вариантов стенокардии у мужчин в молодом и пожилом возрасте с дислипидемией. *Журнал кардиореспираторных исследований*, (2), 87–91.
16. Хватова, Ю. Г., & Чернышев, А. В. (2024). Факторы риска ишемической болезни сердца и их профилактика. *Тамбовский медицинский журнал*, 6(2), 92–107. <https://doi.org/10.20310/2782-5019-2024-6-2-92-107>. EDN: <https://elibrary.ru/HLXOZD>
17. Шомин, А. В., & Сережина, Е. К. (2025). Распространенность гипертриглицеридемии среди пациентов кардиологического профиля. В *Фундаментальная наука и клиническая медицина – человек и его здоровье: Материалы XXVIII Международной медико-биологической конференции молодых исследователей, Санкт-Петербург, 26 апреля 2025 года* (pp. 148–149). Санкт-Петербург: Сциентиа. EDN: <https://elibrary.ru/FGAZKH>

18. Cardiovascular disease: risk assessment and reduction, including lipid modification. (2023). National Institute for Health and Care Excellence (NICE). PMID: 32200592.
19. Evidence reviews for smoking relapse prevention: Tobacco: preventing uptake, promoting quitting and treating dependence: update. (2021). National Institute for Health and Care Excellence (NICE). PMID: 36943947.
20. Si, S., Hou, L., Chen, X., Li, W., Liu, X., Liu, C., ... & Xue, F. (2022). Exploring the Causal Roles of Circulating Remnant Lipid Profile on Cardiovascular and Cerebrovascular Diseases: Mendelian Randomization Study. *Journal of epidemiology*, 32(5), 205–214. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20200305>. EDN: <https://elibrary.ru/TRQCYI>
21. Ray, K. K., Ference, B. A., Séverin, T., Blom, D., Nicholls, S. J., Shiba, M. H., ... & Santos, R. D. (2022). World Heart Federation Cholesterol Roadmap 2022. *Global heart*, 17(1), 75. <https://doi.org/10.5334/gh.1154>. EDN: <https://elibrary.ru/NVLDDP>
22. Visseren, F. L. J., Mach, F., Smulders, Y. M., Carballo, D., Koskinas, K. C., Böck, M., ... & ESC Scientific Document Group. (2021). 2021 ESC Guidelines on cardiovascular disease prevention in clinical practice. *European heart journal*, 42(34), 3227–3337. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab484>. EDN: <https://elibrary.ru/NP-GDXR>
23. Yanai, H., & Yoshida, H. (2021). Secondary dyslipidemia: its treatments and association with atherosclerosis. *Global health & medicine*, 3(1), 15–23. <https://doi.org/10.35772/ghm.2020.01078>. EDN: <https://elibrary.ru/WTICOM>

References

1. Abdullaev, A. Kh., Alyavi, B. A., Uzokov, Zh. K., & Kurmaeva, D. M. (2025). Variability and correction of dyslipidemia in coronary heart disease in elderly patients. *Russian Journal of Geriatric Medicine*, (2), 206–208. <https://doi.org/10.37586/2686-8636-2-2025-206-208>. EDN: <https://elibrary.ru/LQRZWS>
2. Aksyutina, N. V., Bolshakova, T. Yu., Narozhnaya, A. D., & Gridneva, A. M. (2025). Analysis of risk factors in patients with acute coronary syndrome hospitalized at KGBUZ KMKB No. 20 named after I. S. Berzon, Krasnoyarsk. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 24(S5), 3. EDN: <https://elibrary.ru/WBVUFR>
3. Aksyutina, N. V., Shulman, V. A., Nikulina, S. Yu., Besspalov, A. V., Knyazeva, I. S., Mordovsky, V. S., ... & Sevostyanova, I. I. (2018). The effect of rehabilitation on the quality of life of patients after acute coronary syndrome with emergency percutaneous transluminal coronary angioplasty and coronary artery stenting (Krasnoyarsk). *In the World of Scientific Discoveries*, 10(3), 77–99. <https://doi.org/10.12731/wsd-2018-3-77-99>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCOBf>
4. Bazdyrev, E. D., Maksimov, S. A., Galimova, N. A., Mulerova, T. A., Indukaeva, E. V., Artamonova, G. V., & Barbarash, O. L. (2021). Association of smoking with

- coronary heart disease depending on other cardiovascular risk factors. *Bulletin of Siberian Medicine*, 20(1), 7–15. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2021-1-7-15>. EDN: <https://elibrary.ru/OFAFZB>
5. Boytsov, S. A., Shakhnovich, R. M., Erlikh, A. D., Tereshchenko, S. N., Kukava, N. G., Rytova, Yu. K., ... & Belskaya, E. V. (2021). Acute myocardial infarction registry. REGION-IM – Russian registry of acute myocardial infarction. *Cardiology*, 61(6), 41–51. <https://doi.org/10.18087/cardio.2021.6.n1595>. EDN: <https://elibrary.ru/EVBEBV>
 6. Diseases of the circulatory system. Organization of cardiological care for the population of the Krasnoyarsk Krai. Implementation of the regional project “Combating cardiovascular diseases.” (2024). *Report on the health status of the population and organization of healthcare in the Krasnoyarsk Krai based on the results of activities for 2023* / Ministry of Healthcare of the Krasnoyarsk Krai. Krasnoyarsk, 21–25. https://kraszdav.ru/assets/content/image/files/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B-%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_1.pdf
 7. Demidova, T. Yu., & Ushanova, F. O. (2024). Lipid metabolism disorders in patients with type 2 diabetes mellitus: Focus on hypertriglyceridemia. *FOCUS Endocrinology*, 5(2), 25–30. <https://doi.org/10.62751/2713-0177-2024-5-2-14>. EDN: <https://elibrary.ru/UQLBGU>
 8. Ezhov, M. V., Kukharchuk, V. V., Sergienko, I. V., Alieva, A. S., Antsiferov, M. B., Ansheles, A. A., ... & Shlyakhto, E. V. (2023). Lipid metabolism disorders. Clinical guidelines 2023. *Russian Journal of Cardiology*, 28(5), 5471. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5471>. EDN: <https://elibrary.ru/YVZOWJ>
 9. Zakharyan, E. A., Ageeva, E. S., Shramko, Yu. I., Maly, K. D., Gurtovaya, A. K., & Ibragimova, R. E. (2022). Current concepts on the diagnostic role of endothelial dysfunction biomarkers and possibilities of its correction. *Complex Problems of Cardiovascular Diseases*, 11(4S), 194–207. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2022-11-4S-194-207>. EDN: <https://elibrary.ru/QYTJGD>
 10. Novikova, R. A., Bokhan, N. A., Alekseichik, S. E., & Pankratova, Yu. Yu. (2020). Prediction of possible development of coronary heart disease in young people depending on risk factors and its prevention. *Military Medicine*, (4), 48–55. EDN: <https://elibrary.ru/IEVITE>
 11. Obrezan, A. G., Serezhina, E. K., & Shomin, A. V. (2023). Hypertriglyceridemia. Aspects of epidemiology and etiopathogenesis (literature review). *Cardiology: News, Opinions, Training*, 11(4), 14–21. <https://doi.org/10.33029/2309-1908-2023-11-4-14-21>. EDN: <https://elibrary.ru/XIGLSB>
 12. Soloviev, O. V., & Shishkin, A. N. (2021). Modifiable risk factors for coronary heart disease. *Health — the Basis of Human Potential: Problems and Ways of Their Solution*, 16(2), 726–731. EDN: <https://elibrary.ru/HAVGPQ>

13. Susekov, A. V. (2020). Fenofibrate in the treatment of patients with hypertriglyceridemia and atherosclerosis: New data. *Therapeutic Practice*, (1), 24–37. <https://doi.org/10.24411/2071-5315-2020-12189>. EDN: <https://elibrary.ru/XFLUWM>
14. Suslin, S. A., Kiryakova, O. V., Bogatyreva, G. P., Izmalkov, N. S., Sadreeva, S. Kh., & Sheshunova, R. A. (2024). Diseases of the circulatory system as a modern public health problem. *Modern Problems of Healthcare and Medical Statistics*, (1), 540–560. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2024-1-540-560>. EDN: <https://elibrary.ru/NYLMUY>
15. Khasanzhanova, F. O., Tashkenbaeva, E. N., & Boltakulova, S. D. (2021). Risk factors affecting the course of unstable angina variants in young and elderly men with dyslipidemia. *Journal of Cardiorespiratory Research*, (2), 87–91.
16. Khvatova, Yu. G., & Chernyshev, A. V. (2024). Risk factors for coronary heart disease and their prevention. *Tambov Medical Journal*, 6(2), 92–107. <https://doi.org/10.20310/2782-5019-2024-6-2-92-107>. EDN: <https://elibrary.ru/HLXOZD>
17. Shomin, A. V., & Serezhina, E. K. (2025). Prevalence of hypertriglyceridemia among cardiological profile patients. In *Fundamental Science and Clinical Medicine – Man and His Health: Proceedings of the XXVIII International Medical and Biological Conference of Young Researchers, St. Petersburg, April 26, 2025* (pp. 148–149). St. Petersburg: Scientia. EDN: <https://elibrary.ru/FGAZKH>
18. Cardiovascular disease: Risk assessment and reduction, including lipid modification. (2023). *National Institute for Health and Care Excellence (NICE)*. PMID: 32200592.
19. Evidence reviews for smoking relapse prevention: Tobacco: Preventing uptake, promoting quitting and treating dependence: Update. (2021). *National Institute for Health and Care Excellence (NICE)*. PMID: 36943947.
20. Si, S., Hou, L., Chen, X., Li, W., Liu, X., Liu, C., ... & Xue, F. (2022). Exploring the causal roles of circulating remnant lipid profile on cardiovascular and cerebrovascular diseases: Mendelian randomization study. *Journal of Epidemiology*, 32(5), 205–214. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20200305>. EDN: <https://elibrary.ru/TRQCYI>
21. Ray, K. K., Ference, B. A., Séverin, T., Blom, D., Nicholls, S. J., Shiba, M. H., ... & Santos, R. D. (2022). World Heart Federation Cholesterol Roadmap 2022. *Global Heart*, 17(1), 75. <https://doi.org/10.5334/gh.1154>. EDN: <https://elibrary.ru/NVLDDP>
22. Visseren, F. L. J., Mach, F., Smulders, Y. M., Carballo, D., Koskinas, K. C., Böck, M., ... & ESC Scientific Document Group. (2021). 2021 ESC Guidelines on cardiovascular disease prevention in clinical practice. *European Heart Journal*, 42(34), 3227–3337. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab484>. EDN: <https://elibrary.ru/NPGDXR>
23. Yanai, H., & Yoshida, H. (2021). Secondary dyslipidemia: Its treatments and association with atherosclerosis. *Global Health & Medicine*, 3(1), 15–23. <https://doi.org/10.35772/ghm.2020.01078>. EDN: <https://elibrary.ru/WTICOM>

ВКЛАД АВТОРОВ

Аксютинна Н.В.: разработка концепции научной работы, редактирование черновика рукописи, оформление статьи.

Большакова Т.Ю.: анализ данных, написание статьи.

Козлов В.В.: статистическая обработка полученных результатов.

Нарожная А.Д.: сбор материала, проведение литературного обзора.

Гриднева А.М.: сбор материала, построение диаграмм, оформление рисунков.

Демичев И.А.: англоязычный перевод, написание актуальности.

Кононов Е.Н.: формирование базы данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Natalya V. Aksyutina: development of a scientific work concept, editing of a draft manuscript, and article formatting.

Tatyana Y. Bolshakova: data analysis, writing an article.

Vasily V. Kozlov: statistical processing of the obtained results.

Anastasia D. Narozhnaya: collecting material, conducting a literary review.

Alina M. Gridneva: collecting data, creating charts, and drawing diagrams.

Igor A. Demichev: english translation, writing relevance.

Evgeniy N. Kononov: database formation.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Аксютинна Наталья Валерьевна, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры факультетской терапии

Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России; Красноярская межрайонная клиническая больница №20 им. И.С. Берзона

ул. Партизана железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация;

ул. Инструментальная, 12, г. Красноярск, 660123, Российская Федерация

aks-n-v@yandex.ru

Большакова Татьяна Юрьевна, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры факультетской терапии

Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России

ул. Партизана железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация

tatjanabol@mail.ru

Козлов Василий Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры общественного здоровья и здравоохранения

*Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова; Академия Спорта Азербайджана
ул. Трубецкая, 8, стр. 2, г. Москва, 119991, Российская Федерация; просп.
Фатали Хана Хойского, 34, г. Баку, AZ1072, Азербайджан
kvv.doc@gmail.com*

Нарожная Анастасия Дмитриевна, студентка лечебного факультета

*Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России
ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
narozhnaya.a@bk.ru*

Гриднева Алина Максимовна, студентка лечебного факультета

*Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России
ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация
alinagridneva2@gmail.com*

Демичев Игорь Анатольевич, аспирант, врач функциональной диагностики

*Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России; Красноярская межрайонная клиническая больница №20 им. И.С. Берзона
ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Российская Федерация;
ул. Инструментальная, 12, г. Красноярск, 660123, Российская Федерация
igordemicev08788@gmail.com*

Кононов Евгений Николаевич, врач-кардиолог, главный врач

*Красноярская межрайонная клиническая больница №20 им. И.С. Берзона
ул. Инструментальная, 12, г. Красноярск, 660123, Российская Федерация
e.kononov-76@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalya V. Aksyutina, MD, Associate Professor, Professor of the Faculty Therapy Department

*Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V.F. Voyno-Yasenetsky, Ministry of Health of the Russian Federation; Krasnoyarsk Interdistrict Clinical Hospital No. 20 named after I.S. Berzon
1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation; 12, Instrumentalnaya Str., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation*

aks-n-v@yandex.ru

SPIN-code: 5028-3792

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4856-2729>

ResearcherID: F-3846-2016

Tatyana Y. Bolshakova, PhD in Medicine, Associate Professor, Associate Professor of the Faculty Therapy Department

Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V.F. Voyno-Yasenetsky, Ministry of Health of the Russian Federation

1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

tatjanabol@mail.ru

SPIN-code: 4934-1577

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9653-6026>

ResearcherID: AAN-7944-2020

Vasily V. Kozlov, PhD in Medicine, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Public Health and Public Health

I.M. Sechenov First Moscow State Medical University; Azerbaijan State Academy of Physical Culture and Sports

8, build. 2, Trubetskaya Str., Moscow, 119991, Russian Federation; 34, Fatali Khan Khoysky Ave., Baku, AZ1072, Azerbaijan

kvv.doc@gmail.com

SPIN-code: 7703-0013

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2389-3820>

Anastasia D. Narozhnaya, student

Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V.F. Voyno-Yasenetsky, Ministry of Health of the Russian Federation

1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

narozhnaya.a@bk.ru

SPIN-code: 5316-7891

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2503-6423>

Alina M. Gridneva, student

Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V.F. Voyno-Yasenetsky, Ministry of Health of the Russian Federation

1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

alinagridneva2@gmail.com

SPIN-code: 9840-4307

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7936-6042>

Igor A. Demichev, Post-Graduate Student, Doctor of Functional Diagnostics

*Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V.F. Voyno-Yasenetsky,
Ministry of Health of the Russian Federation; Krasnoyarsk Interdistrict Clinical
Hospital No. 20 named after I.S. Berzon*

*1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation; 12, In-
strumentalnaya Str., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation*
igordemicev08788@gmail.com

SPIN-code: 5619-2878

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0049-8163>

Evgeniy N. Kononov, Cardiologist, Chief Physician

*Krasnoyarsk Interdistrict Clinical Hospital No. 20 named after I.S. Berzon
12, Instrumentalnaya Str., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation*
e.kononov-76@mail.ru

SPIN-code: 7042-1010

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4816-6432>

Поступила 08.09.2025

После рецензирования 15.11.2025

Принята 18.11.2025

Received 08.09.2025

Revised 15.11.2025

Accepted 18.11.2025

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1450](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1450)EDN: [WHTXDK](https://www.edn.ru/WHTXDK)

УДК 338.43:004.9



Оценка влияния цифровой трансформации на результативность сельского хозяйства

А.Ю. Анисимов¹, П.Н. Машегов^{1,2}, А.Е. Трубин¹, И.О. Трубина¹¹Университет «Синергия», Москва, Российская Федерация²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Результативность сельскохозяйственного производства является важнейшим аспектом повышения продовольственной безопасности и обеспечения устойчивого роста в условиях значительного влияния внешних факторов. Ее повышение возможно на основе цифровой трансформации, которая является важным стратегическим императивом сельскохозяйственных предприятий для адаптации к современным трендам инновационного и технологического развития.

Цель исследования. Оценка влияния затрат на внедрение и использование цифровых технологий на результативность сельского хозяйства.

Материалы и методы. Для оценки влияния затрат на внедрение и использование цифровых технологий на показатели результативности сельскохозяйственных предприятий использовались вторичные статистические данные за период с 2016 г. по 2023 г. В качестве индикаторов результативности сельского хозяйства использовались валовая добавленная стоимость и прибыль сельскохозяйственных организаций. В качестве методов исследования использованы: библиометрический анализ, методы описательной статистики и предиктивно-каузальные методы. Для выявления причинно-следственных взаимосвязей между затратами на цифровые технологии и результативностью сельскохозяйственного производства использован статистический показатель Transfer Entropy, позволяющий определить как наличие, так и направления связи между переменными.

Результаты. Результаты исследования показали наличие причинно-следственных связей между затратами на внедрение цифровых технологий и расширение инновационной деятельности и результативности сельскохозяйственного произ-

водства. При этом установлено, что зависимость между уровнями затрат и результативностью носит нелинейный характер. На начальных этапах вложения в цифровизацию приводят к ограниченному эффекту из-за недостаточной адаптации инфраструктуры, однако по мере достижения определённого уровня инвестиций наблюдается более выраженное увеличение производительности и эффективности отрасли. При этом сделан вывод, что на данный момент уровень внедрения цифровых технологий остаётся недостаточным для значительного влияния на эффективность отрасли. В долгосрочной перспективе увеличение вложений в цифровизацию может существенно повысить производительность труда и экономический рост сельского хозяйства.

Ключевые слова: сельское хозяйство; цифровые технологии; затраты на внедрение цифровых технологий; инновационные технологии; государственная поддержка

Для цитирования. Анисимов, А. Ю., Машегов, П. Н., Трубин, А. Е., & Трубина, И. О. (2026). Оценка влияния цифровой трансформации на результативность сельского хозяйства. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 605–626. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1450>

Assessing the impact of digital transformation on agricultural performance

A.Yu. Anisimov¹, P.N. Mashegov^{1,2}, A.E. Trubin¹, I.O. Trubina¹

¹Synergy University, Moscow, Russian Federation

²Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. Agricultural production efficiency is a critical aspect of improving food security and ensuring sustainable growth in the face of significant external factors. This improvement is possible through digital transformation, which is a key strategic imperative for agricultural enterprises to adapt to modern trends in innovative and technological development.

Purpose. Assessing the impact of digital technology implementation costs on agricultural performance.

Materials and methods. Secondary statistical data for the period from 2016 to 2023 were used to assess the impact of digital technology implementation costs on agricultural enterprise performance. Gross value added and profit of agricultural organizations were used as indicators of agricultural performance. Research methods included bibliometric analysis, descriptive statistics, and predictive-causal methods. To identify causal relationships between digital technology expenditures and agricultural production efficiency,

the Transfer Entropy statistical indicator was used, allowing one to determine both the presence and direction of relationships between variables.

Results. The study's results revealed a cause-and-effect relationship between the costs of implementing digital technologies and expanding innovation and agricultural production performance. Furthermore, it was found that the relationship between costs and performance is nonlinear. Initially, investments in digitalization have a limited impact due to insufficient infrastructure adaptation. However, as a certain level of investment is reached, a more pronounced increase in productivity and efficiency is observed. It was concluded that the current level of digital technology adoption remains insufficient to significantly impact the sector's performance. In the long term, increased investment in digitalization could significantly improve labor productivity and economic growth in agriculture.

Keywords: agriculture; digital technologies; costs of implementing digital technologies; innovative technologies; government support

For citation. Anisimov, A. Yu., Mashegov, P. N., Trubin, A. E., & Trubina, I. O. (2026). Assessing the impact of digital transformation on agricultural performance. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 605–626. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1450>

Введение

Сельское хозяйство играет ключевую роль в глобальном производстве продовольствия и постоянно адаптируется к влиянию различных внутренних и внешних факторов [26]. Среди наиболее значительных факторов, оказывающих влияние на необходимость трансформации производственных и управленческих процессов в сельском хозяйстве, выступает глобальная тенденция цифровой трансформации [13]. Внедрение цифровых сельскохозяйственных технологий стало важным аспектом этого трансформационного процесса. Цифровые технологии сельского хозяйства включают широкий набор технологий, который сочетает в себе различные цифровые инструменты и платформы, направленные на преобразование традиционных методов ведения сельского хозяйства, позволяющие сельхозтоваропроизводителям эффективно планировать, контролировать и управлять как операционными, так и стратегическими аспектами своих производственных систем. Помимо устоявшихся технологий, таких как полевые датчики, глобальные системы позиционирования, телеметрия и автоматизация, процессы внедрения цифровых сельскохозяйственных технологий (ЦСТ) также характеризуются интеграцией Интернета и связи, облачных вычислений, больших данных, блокчейна и криптографии [1; 6; 12; 17]. Представленный набор цифровых

технологий обеспечивает не только процесс принятия решения, но и способствуют большей устойчивости производственных систем, обеспечивая доступ к дифференцированным рынкам [27].

Однако, важно отметить, что на современном этапе, учитывая потребность в больших объемах инвестиций для цифровизации сельского хозяйства, необходимо оценить степень их влияния на обеспечение прогрессивных темпов его роста. Оценку затрат на цифровизацию сельского хозяйства целесообразно осуществлять во взаимосвязи с оценкой затрат на инновационную деятельность, поскольку цифровые технологии являются составной частью комплексного процесса инновационного преобразования аграрного сектора. Инновационные разработки формируют основу для устойчивого и адаптивного внедрения цифровых решений, особенно в условиях аграрной специфики, варьирующей в зависимости от природно-климатических, экономических и социально-организационных факторов.

Целью исследования выступает оценка влияния затрат на внедрение и использование цифровых технологий на результативность сельского хозяйства. В качестве задач исследования поставлены: определение направлений влияния цифровых технологий на сельское хозяйство, а также оценка степени влияния их внедрения на результаты сельскохозяйственной деятельности. В качестве объекта исследования выступают факторы, обеспечивающие процессы эффективного развития сельскохозяйственного производства. Предметом исследования являются экономические механизмы, посредством которых инвестиции в цифровизацию воздействуют на результативность сельскохозяйственного производства.

В качестве гипотезы исследования выступает предположение о том, что рост затрат на внедрение цифровых технологий и расширение инновационной деятельности способствует повышению эффективности сельскохозяйственного производства, при этом указанная зависимость носит нелинейный характер, т.е. на начальных этапах вложения в цифровизацию могут давать ограниченный эффект вследствие недостаточной адаптации инфраструктуры, тогда как при достижении определённого порогового уровня вложений наблюдается более выраженное повышение результативности.

Материалы и методы

Подтверждение или опровержение выдвинутой нами в исследовании гипотезы и решение поставленных задач, в рамках достижения сформулированной цели, обеспечивается следующей методической дорожной картой, включающей в себя ряд этапов.

На первом этапе определен перечень отраслевых показателей, характеризующих результативность сельскохозяйственного производства, в качестве которых выбраны валовая добавленная стоимость (ВДС) и прибыль от продажи продукции сельскохозяйственных организаций. На втором этапе проведена оценка стационарности и линейности временных рядов и причинно-следственных связей с использованием нелинейного статистического показателя TE (Transfer Entropy), позволяющего учитывать сложные нелинейные взаимодействия между переменными.

В качестве зависимой переменной Y_1 выбрана НДС по подотрасли растениеводство и животноводство, охота и предоставление соответствующих услуг. Этот показатель позволяет определить, степень зависимости экономического роста подотрасли от влияния независимых переменных. В качестве зависимой переменной Y_2 выступает прибыль от продажи организаций подотрасли растениеводство и животноводство, охота и предоставление соответствующих услуг. Выбор прибыли от продажи в качестве переменной Y_2 обусловлен её высокой чувствительностью к изменению как внешнеэкономических условий, так и внутренних факторов эффективности хозяйствования, включая внедрение цифровых технологий, и позволяет оценить непосредственное воздействие инновационно-цифровых инвестиций на рентабельность и устойчивость функционирования сельскохозяйственных организаций.

В качестве независимых переменных выбраны: X_1 - объем средств государственной поддержки в рамках программ и мероприятий по развитию сельского хозяйства, млрд руб. (поскольку государственная поддержка имеет большое значение для внедрения инноваций в агропромышленном комплексе), X_2 - внутренние затраты на научные исследования и разработки, млрд, руб. X_3 - удельный вес затрат на инновационную деятельность в общем объеме отгруженных товаров, %, X_4 - затраты организации на внедрение и использование цифровых технологий.

Результаты и обсуждение

Обеспечение качественного развития сельского хозяйства, укрепление продовольственной безопасности и инновации в сельскохозяйственных технологиях тесно взаимосвязаны. Приоритетным направлением развития аграрной науки и техники является рациональное развитие технологий, а технологический прогресс является важнейшей движущей силой устойчивого роста сельскохозяйственного производства.

Цифровизация сельского хозяйства на современном этапе становится важным направлением государственной политики, направленной на обе-

спечение продовольственной безопасности, импортозамещение основных продуктов питания, а также повышение эффективности функционирования сельхозпроизводителей.

Создание условий для цифровизации сельского хозяйства поставлено в качестве одной из важных задач Проекта «Цифровое сельское хозяйство» [3] посредством разработки и внедрения платформенных решений и цифровых технологий, направленных на повышение производительности сельскохозяйственных предприятий. Интеграция цифровых технологий в сельское хозяйство в условиях государственной поддержки будет способствовать переходу к следующему поколению индустриального сельского хозяйства, а именно сельского хозяйства 4.0, также называемого умным или цифровым сельским хозяйством.

На современном этапе вопросы влияния технологического прогресса на обеспечение сбалансированного роста сельского хозяйства широко обсуждаются в академической литературе. Среди наиболее приоритетных направлений исследования оценки влияния цифровых технологий выделяют: создание и поддержание платформ [1; 10], использование технологий точного земледелия [13; 15], внедрение технологий искусственного интеллекта и интернета вещей [4; 8; 14], механизмы государственной поддержки цифровой трансформации сельского хозяйства [6; 7], повышение эффективности функционирования сельскохозяйственных предприятий [2; 9; 18; 24].

В результате исследования [1; 2; 13; 15; 23] сделан вывод о том, что внедрение цифровых технологий может способствовать экономическому развитию и росту результативности сельского хозяйства. Однако результаты исследований [9; 18; 24] противоречивы. Так, С.А. Банниковым [2], И.Г. Паршутиной [9] установлено, что внедрение цифровых технологий способствует изменению в методах сельскохозяйственного производства, качестве управления и эффективности производства, а также приводит к повышению производительности факторов производства в сельском хозяйстве. Однако Б. Мэттьюс [24] отметил, что для реализации полного потенциала цифровых технологий в экономике сельского хозяйства и сельских территорий необходим значительный временной горизонт. В отсутствие зрелых систем цифрового развития и механизмов регулирования это может привести к новым рискам для развития сельскохозяйственной отрасли. Как и другие ресурсы, цифровые технологии ориентированы на получение прибыли. Однако, ограниченность маневра для поиска источника в сельской местности, низкий технический порог цифрового развития

сельского хозяйства, отсутствие ИКТ инфраструктуры делают цифровизацию значительно менее активной.

Рост сельского хозяйства в основном являются функцией взаимодействия между такими показателями как климатические условия, площадь сельскохозяйственных угодий, численность работников, количество сельскохозяйственных предприятий, а также величина имеющихся финансовых ресурсов. Внедрение цифровых и инновационных производственных технологий способно привести к крупномасштабной изменчивости урожайности, фенологии и типа сельскохозяйственных культур. В большинстве случаев окружающая среда не может быть изменена, однако, внедрение цифровых технологий способно привести к прогрессивным изменениям, особенно в сложных экономических и климатических условиях [24]. Например, С. Цзяо и соавторы [27] обосновали, что темпы роста производства зерна превысили темпы роста потребления удобрений, отчасти благодаря технологическим инновациям.

Х. Дэн и соавторы [20], взяв в качестве объекта исследования 13 основных зернопроизводящих регионов, проанализировал пространственно-временную корреляционную реакцию уровня экстенсивного сельского хозяйства и внедрения цифровых технологий в зернопродуктовый комплекс. В результате этим автором было установлено, что всестороннее развитие научно-технических инноваций характеризуется устойчивой тенденцией к росту, а уровень скоординированного развития сельского хозяйства значительно улучшился. М. Херреро и др. [19] на основе оценки масштабов инноваций в производстве зерна, землепользовании и выбросах предложили направления совершенствования использования инновационных технологий. Л. Луо и др. [23] обосновали, что при различных моделях управления сельским хозяйством сельхозтоваропроизводители будут демонстрировать различные технологические достижения, чтобы соответствовать производственным факторам и достигать оптимальных условий производства. Соответственно, можно отметить, что сельское хозяйство, основанное на цифровых технологиях, представляет собой одну из форм модернизации аграрного сектора.

Систематизируя влияние цифровых и инновационных технологий на сельскохозяйственное производство, можно выделить два ключевых аспекта. С одной стороны, использование передовых цифровых технологий, таких как интернет вещей, большие данные и технологии дистанционного зондирования, позволило оптимизировать распределение существующих факторов производства, а также повысить эффективность их использова-

ния и производительность сельского хозяйства за счет технологического прогресса. С другой стороны, развитие и применение цифровых технологий превратили данные в новый фактор производства, способствуя изменению структуры факторов производства и инновациям методов производства. Различия в распределении факторов производства между отраслями могут объяснять вариации в эффективности производства.

Применение цифровых и инновационных технологий добавило к традиционным факторам сельскохозяйственного производства, таким как земля, труд и капитал, новый элемент – информацию. По мере того, как информация входит в функцию сельскохозяйственного производства в качестве нового элемента, зависимость и структуры соответствия различных ресурсных элементов коренным образом меняются. Поток информации может быть обработан с помощью цифровых технологий, что создает предпосылки для автоматизации технологии сельскохозяйственного производства. Цифровые технологии, такие как интернет вещей и облачные вычисления, улучшают структуру элементов сельскохозяйственных ресурсов, усиливают совершенствование управления производственными процессами и достигают цели повышения эффективности распределения элементов ресурсов и снижения затрат на управление в процессах сельскохозяйственного производства. Также важно учитывать, что сельскохозяйственные производители стремятся максимизировать собственную выгоду при принятии решений о внедрении цифровых технологий в производство, рассчитывая получить максимально возможную выгоду при наименьшей сумме затрат на внедрение и использование цифровых технологий. Соответственно основными мотивами их внедрения выступает снижение производственных затрат и повышения рентабельности производства [8]. В связи с чем требуют более детальной экономической оценки следующие вопросы: во-первых, основные технологии, активно применяемые в аграрном секторе (рисунок 1), во-вторых – какова степень их влияния на результативность сельскохозяйственного производства.

Как видно на рисунке 1, в условиях цифровой трансформации агропромышленного комплекса прослеживается тенденция изменения структуры используемых цифровых технологий. Так, заметный рост можно отметить в использовании таких технологий, как цифровые платформы, технологии искусственного интеллекта и цифровые двойники. Технологии интернета вещей (IoT) и технологии больших данных также демонстрируют значительный рост. В 2023 году облачные сервисы применялись 1285 организациями, что на 10,5% больше по сравнению с 2021 годом (1162) и на 75%

больше по сравнению с 2022 годом (733). Технологии RFID использовались 770 организациями в 2023 году, что на 28% больше по сравнению с 2022 годом (602).



Рис. 1. Динамика цифровых технологий, используемых в сельском хозяйстве

Источник: <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>

Fig. 1. Trends in Digital Technologies Used in Agriculture

Source: <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>

Промышленные роботы и аддитивные технологии показывают меньшую степень распространённости, но также демонстрируют рост. В 2023 году промышленные роботы использовались 344 организациями, что на 6% меньше по сравнению с 2021 годом (366), но на 4,5% больше по сравнению с 2022 годом (329). Снижение числа организаций, использующих промышленных роботов, может быть обусловлено совокупностью таких факторов, как ухудшение экономической конъюнктуры, ограничения и перебои в поставках оборудования и комплектующих вследствие санкционного давления. Применение аддитивных технологий увеличилось до 88 организаций в 2023 году, что в два раза больше по сравнению с 2022 годом и на 2,3% больше по сравнению с 2021 годом. Соответственно, можно отметить, что в аграрном секторе наблюдается рост применения цифровых технологий. Особенно значительно увеличилось использование технологий интернета вещей, обработки больших данных и цифровых платформ.

Внедрение указанных технологий направлено на формирование высокоэффективных, устойчивых и адаптивных аграрных систем, позволяющих оперативно реагировать на различные внешние вызовы, в том числе

изменение климатических условий, колебания рыночных цен на сельскохозяйственную продукцию, а также изменяющиеся требования потребителей (таблица 1).

Таблица 1.

Цифровые технологии в сельском хозяйстве**Table 1. Digital Technologies in Agriculture**

Блок технологии	Сельскохозяйственные технологии	Эффекты от внедрения
Геоинформационные системы (ГИС)	GPS-картирование, дроны, спутниковый мониторинг	Оптимизация использования ресурсов, повышение урожайности
Цифровые платформы	ERP-системы (1C:Агро), Cropio, Climate FieldView, агро-маркетплейсы	Централизация управления, аналитика, оптимизация логистики
Большие данные	Анализ урожайности, поведенческий анализ потребителей, прогнозирование урожая	Принятие решений на основе данных, снижение издержек
Искусственный интеллект	Диагностика заболеваний растений по фото, роботы-сборщики, предиктивная аналитика	Автоматизация и повышение точности агропроцессов
Облачные сервисы	Хранение данных, онлайн-CRM, удалённый мониторинг	Повышение оперативности обработки данных, снижение IT-затрат
Интернет вещей (IoT)	Умные поливочные системы, сенсоры температуры, GPS-ошейники	Автоматизация мониторинга, точное управление ресурсами
RFID (радиочастотная идентификация)	Метки на скот, логистика, учёт семян и ресурсов	Прослеживаемость, контроль запасов
Цифровой двойник	Виртуальные модели ферм, симуляция урожайности, цифровое тестирование	Моделирование и оптимизация производства
Промышленные роботы и линии	Роботы для дойки, сбора урожая, автоматизация упаковки	Снижение ручного труда, повышение производительности
Аддитивные технологии (3D-печать)	Печать запчастей, изготовление индивидуальных деталей, прототипирование	Быстрые ремонты, снижение затрат на производство

Источник: составлено авторами на основе [1-25]

Source: Compiled by the authors based on [1-25]

Для проверки выдвинутой гипотезы о нелинейном влиянии инвестиций в цифровые технологии и инновации на повышение эффективности

сельскохозяйственного производства проведем графическое представление динамики темпов прироста прибыли, ВДС, а также затрат на внедрение и использование цифровых технологий (рисунок 2).

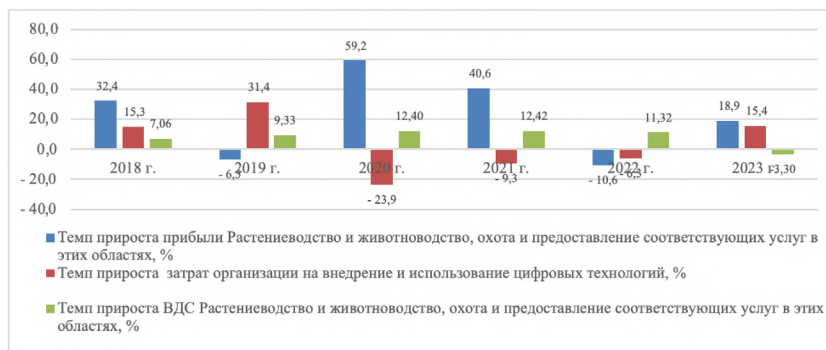


Рис. 2. Темпы прироста ВДС, прибыли организаций растениеводства и животноводства, охоты и предоставления соответствующих услуг и темпы прироста затрат организации на внедрение и использование цифровых технологий
Источник: составлено авторами на основе данных <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts>

Fig. 2. Growth rates of gross domestic product (GDP), profits of organizations engaged in crop production, livestock production, hunting, and related services, and growth rates of organizations' expenditures on the implementation and use of digital technologies
Source: Compiled by the authors based on data from <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts>

Оценка темпов прироста прибыли в сельскохозяйственном секторе, а также темпов прироста затрат организаций на внедрение и использование цифровых технологий в период с 2018 по 2023 год позволяет выявить ряд значимых закономерностей, свидетельствующих о взаимодействии экономических и технологических факторов в аграрной экономике. В целом, темпы прироста прибыли в сельском хозяйстве демонстрируют выраженную волатильность, колеблясь в диапазоне от -10,6 % (2022 г.) до 59,2 % (2020 г.). При этом наиболее высокие значения зафиксированы в 2020 (59,2 %) и 2021 годах (40,6 %), что связано с адаптацией аграрных предприятий к вызовам, вызванным пандемией COVID-19, а также с переориентацией на внутренний рынок, стабилизацией ценовой конъюнктуры и, возможно, усилением цифровой трансформации. Однако в 2022 году наблюдается резкое снижение прибыли, что может быть связано с геополитическими факторами, инфляционным давлением и ростом издержек на фоне нестабильности логистических цепочек. В 2023 году зафиксирован частичный рост до 18,9 %, В рассматриваемом периоде отмечается ряд разнонаправ-

ленных изменений, так, в 2018 году темп прироста составил 15,3 %, в 2019 году достиг максимального значения в 31,4 %, что отражает начальную фазу активной цифровизации аграрного сектора. В 2020 и 2021 годах наблюдается спад на 23,9% и 9,3% соответственно, что может быть обусловлено перераспределением финансовых ресурсов в условиях пандемии и повышенной экономической неопределённости. Однако уже в 2022 году темп прироста затрат стабилизируется, а в 2023 году вновь демонстрирует рост на 15,4 %, указывая на возобновление инвестиционной активности в цифровые технологии и укрепление стратегического курса на цифровую трансформацию отрасли. Сопоставление двух показателей позволяет выдвинуть предположение о наличии опосредованной, но положительной корреляции между технологической модернизацией и экономическими результатами сельхозпредприятий. Анализ динамики темпов прироста прибыли в сельскохозяйственном секторе и темпов прироста затрат на цифровизацию в период с 2018 по 2023 год позволяет выдвинуть предположение о нестационарности временных рядов, что обусловлено значительной волатильностью, наличием резких скачков, разнонаправленные изменения и отсутствием устойчивого тренда, что свидетельствует о влиянии внешних экономических, геополитических и институциональных факторов, а также указывают на нестабильность математических ожиданий и дисперсий во времени, типичных для нестационарных процессов. Нестационарность данных обуславливает, для оценки причинно-следственных связей, использовать метод TE (Transfer Entropy, метод переноса энтропии) позволяющий выявлять направленные и потенциально нелинейные зависимости между временными рядами путём измерения снижения неопределённости о будущем состоянии одной переменной при условии знания прошлого другой.

Результаты оценки причинно-следственных связей между переменными, представлены в таблице 2.

Для интерпретации результатов использована нормализованная форма показателя Transfer Entropy (TE), значения которого приведены к диапазону $[0;1]$. Нормализация позволяет рассматривать TE как долю снижения неопределённости относительно будущего состояния результирующей переменной при учёте информации о прошлом значении фактора. Величина TE характеризует объём информации, который передаётся от одной переменной к другой в значениях условной энтропии. Значения показателя, приближающиеся к нулю, указывают на отсутствие направленного влияния, а значения, стремящиеся к единице на полное объяснение динамики результирующего

показателя зависимой переменной [7; 14]. Значения Transfer Entropy для всех предикторов к переменной $Y1$ составляют 0,4056, что свидетельствует о наличии устойчивой причинно-следственной связи и указывает на наличие значимого предиктивного потенциала в отношении изменения валовой добавленной стоимости в аграрной отрасли.

Таблица 2.

Результаты оценки причинно-следственных связей**Table 2. Results of the Causal Analysis**

Фактор	Описание	TE	
		$Y1$ Валовая добавленная стоимость	$Y2$ Прибыль от продажи продукции сельскохозяйственных организаций
X1	Объем средств государственной поддержки в рамках программ и мероприятий по развитию сельского хозяйства	0,4056	0,4056
X2	Внутренние затраты на научные исследования и разработки, млрд руб.	0,4056	0,1556
X3	Удельный вес затрат на инновационную деятельность в общем объеме отгруженных товаров, %	0,4056	0,4056
X4	Затраты организации на внедрение и использование цифровых технологий, млрд руб.	0,4056	0,4056

Источник: рассчитано авторами на основе <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts>, <https://www.fedstat.ru/indicator/58039>

Source: Calculated by the authors based on <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts>, <https://www.fedstat.ru/indicator/58039>

Значения Transfer Entropy для оценки влияния $X1$, $X3$, $X4$ на $Y2$ также свидетельствует о существенной причинной зависимости. Полученные значения в результате оценки методом переноса энтропии демонстрируют, что финансовые показатели сельского хозяйства (в частности, прибыль) в большей степени обусловлены мерами прямой экономической поддержки ($X1$), инновационной активностью ($X3$) и цифровой трансформацией ($X4$), нежели фундаментальными научными исследованиями ($X2$), эффект от которых может проявляться с временным лагом. Резюмируя результаты оценки, можно отметить наличие значимых и потенциально причинных связей между затратами на внедрение и использование цифровых технологий и ключевыми макроэкономическими показателями аграрного сектора

(Y1 и Y2). Однако, учитывая, что в предшествующие периоды объем этих затрат был незначительным, их влияние на ВДС и прибыль до недавнего времени оставалось ограниченным. Следовательно, при продолжении тенденции увеличения затрат можно ожидать более выраженного положительного эффекта на ВДС.

Заключение

Результаты проведенной оценки влияния цифровой трансформации на результативность сельскохозяйственного производства позволяют сделать следующие выводы. Цифровизация сельского хозяйства представляет собой важное направление модернизации аграрного сектора, выступающее неотъемлемой частью инновационного развития. Цифровые технологии трансформируют традиционные формы ведения сельского хозяйства, способствуя переходу от экстенсивной к интенсивной модели за счёт включения информации в качестве нового фактора производства. Это ведёт к реорганизации ресурсной структуры: информация, обработанная с помощью цифровых инструментов, становится ключевым элементом в цепочке принятия решений, управления производственными процессами и распределения ресурсов. Статистические данные свидетельствуют о стабильной тенденции роста применения цифровых решений в аграрном секторе. Так, в 2023 году облачные сервисы использовались 1285 организациями, что на 10,5% больше по сравнению с 2021 годом (1162 организации) и на 75% больше по сравнению с 2022 годом (733 организации). Технологии интернета вещей продемонстрировали рост до 770 организаций, что на 28% больше по сравнению с 2022 годом. Существенный рост наблюдается также в использовании цифровых платформ и технологий искусственного интеллекта. Несмотря на то, что такие технологии, как промышленные роботы и аддитивное производство, применяются реже, они демонстрируют положительную динамику.

Результаты количественной оценки на основе статистического показателя Transfer Enthropy подтвердили наличие устойчивых и направленных причинно-следственных связей между затратами на внедрение цифровых технологий, мерами государственной поддержки, инновационной активности и показателями результативности сельскохозяйственного производства. В частности, можно отметить, что прямые меры государственной поддержки (X1), инновационная активность (X3) и затраты на цифровизацию (X4) обладают наиболее выраженным направленным влиянием на прибыль и валовую добавленную стоимость, затраты на фундаментальные научные исследования (X2) демонстрируют более слабое влияние на при-

быть, что может быть связано с временным лагом реализации эффектов от внедрения результатов научных исследований в деятельность сельскохозяйственных организаций.

Анализ с использованием ТЕ подтверждает, что цифровая трансформация и инновации являются значимыми драйверами результативности сельскохозяйственных организаций, продолжение тенденции роста инвестиций в цифровизацию и инновации, при условии эффективного управления проектами и инфраструктурной поддержки, вероятно, будет способствовать дальнейшему укреплению производственных показателей. Вместе с тем, наблюдаемая волатильность временных рядов свидетельствует о высокой чувствительности показателей отрасли к внешним экономическим, геополитическим и институциональным факторам, что требует системного подхода при планировании политики цифровой трансформации.

Полученные результаты также позволяют сделать вывод о необходимости поэтапного расширения внедрения цифровых и инновационных технологий, интеграции краткосрочных мер государственной поддержки с долгосрочными стратегиями развития, а также системного мониторинга и управления процессом их реализации для создания предпосылки для стабильного улучшения производственной эффективности и финансовой устойчивости аграрных организаций. При этом, именно прямые меры государственной поддержки (X_1) выступают доминирующим инструментом воздействия на результативность сельскохозяйственного производства, что подтверждается максимальными значениями Transfer Entropy к валовой добавленной стоимости (Y_1) и прибыли (Y_2), равными 0,4056. Полученные показатели указывают на наличие устойчивой и направленной причинно-следственной связи, отражающей способность государственных субсидий и программ стимулирования обеспечивать ресурсы для модернизации производственных процессов, внедрения цифровых технологий и реализации инновационных проектов, а также создавать условия для повышения финансовой устойчивости и предсказуемости экономических результатов организаций в условиях высокой волатильности отрасли.

Список литературы

1. Амирова, Э. Ф., Зокин, А. Л., Чистяков, М. С., & Косников, С. Н. (2021). Основные направления комплексного научно-технологического развития цифровой платформы аграрной экономики России. *Управленческий учет*, (4), 201–208.
2. Банников, С. А., Гарбузова, Т. Г., & Лосев, А. Н. (2023). Цифровая зрелость сельского хозяйства: результаты исследований и методика оценки. *Вестник*

- НГИЭИ, (10), 67–77. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-10-67-77>. EDN: <https://elibrary.ru/GHMGMG>
2. *Ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство»: официальное издание.* (2019). М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 48 с.
 3. Зацаринный, А. А., Меденников, В. И., & Райков, А. Н. (2023). Интеграция приложений искусственного интеллекта в единую цифровую платформу АПК. *Информационное общество*, (1), 127–138. https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_127. EDN: <https://elibrary.ru/NMKKLZ>
 4. Катаев, М. Ю., Пасько, О. А., & Карташов, Е. Ю. (2023). Анализ практических возможностей применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. *Вестник КрасГАУ*, (1), 54–62. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-1-54-62>. EDN: <https://elibrary.ru/EEAPOS>
 5. Макаров, Д. И. (2022). Развитие государственной поддержки отраслей агропромышленного комплекса в России. В *Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов* (с. 299–303).
 6. Мурашова, Н. В. (2021). Формирование механизма цифровой трансформации сельского хозяйства. *Вестник НГИЭИ*, (9), 129–138. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-9-129-138>. EDN: <https://elibrary.ru/KLGCHG>
 7. Осовин, М. Н. (2024). Внедрение технологий искусственного интеллекта на предприятиях агропродовольственного комплекса России: проблемы и направления их решения. *Продовольственная политика и безопасность*, 11(3), 553–568. <https://doi.org/10.18334/ppib.11.3.121322>. EDN: <https://elibrary.ru/DIHLTQ>
 8. Паршутина, И. Г., Солодовник, А. И., & Амелина, А. В. (2023). Анализ влияния цифровизации и интернета вещей на производительность труда в экономике. *Вестник аграрной науки*, (4), 155–163. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.4.155>. EDN: <https://elibrary.ru/WKJYIU>
 9. Райков, А. Н. (2021). Концепция цифровой платформы российского сельского хозяйства, обеспечивающая сходимость к целям. *Информатизация и связь*, (1), 64–73. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2021-12-1-64-73>. EDN: <https://elibrary.ru/KPVVRU>
 10. 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/PHRXAM>
 11. Стельмашонок, Е. В., & Стельмашонок, В. Л. (2021). Цифровая трансформация агропромышленного комплекса: анализ перспектив. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(2), 336–365. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-2-336-365>. EDN: <https://elibrary.ru/UUMMYD>

12. Такун, А., Макрак, С., & Такун, С. (2021). Методологические аспекты оценки эффективности цифровых технологий в точном земледелии. *Наука и инновации*, (3), 11–16. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2021-3-11-16>. EDN: <https://elibrary.ru/PBHOHQ>
13. Юрченко, И. Ф. (2021). Перспективы технологий Интернета вещей в агропроизводстве. *Мелиорация и гидротехника*, 11(1), 67–80. <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-1-67-80>. EDN: <https://elibrary.ru/HZESEL>
14. Якушев, В. П. (2019). Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета «умное сельское хозяйство» России. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, (2), 11–15. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/11-15>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBFLJJ>
15. Deng, H., Jing, X., & Shen, Z. (2022). Internet technology and green productivity in agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81441–81451. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21370-z>. EDN: <https://elibrary.ru/BRHGNN>
16. Dovganeva, Yu. A., Katrashova, Yu. V., & Kirillova, T. V. (2023). The ecosystem of vertical farms: A conceptual framework. *Food Systems*, 6(4), 504–511. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-504-511>. EDN: <https://elibrary.ru/KXMYUD>
17. Gao, Q., Cheng, C., Sun, G., & Li, J. (2022). The impact of digital inclusive finance on agricultural green total factor productivity: Evidence from China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 905644. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.905644>. EDN: <https://elibrary.ru/HTRNEB>
18. Herrero, M., Thornton, P. K., Mason-D'Croz, D., Palmer, J., Bodirsky, B. L., Pradhan, P., ... & Rockström, J. (2021). Articulating the effect of food systems innovation on the Sustainable Development Goals. *The Lancet Planetary Health*, 5(1), e50–e62. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30277-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30277-1). EDN: <https://elibrary.ru/KVVPPO>
19. Jiao, S., Lu, Y., & Wei, G. (2022). Soil multitrophic network complexity enhances the link between biodiversity and multifunctionality in agricultural systems. *Global Change Biology*, 28(1), 140–153. <https://doi.org/10.1111/gcb.15917>. EDN: <https://elibrary.ru/LEGTGX>
20. Liu, Z., & Xin, L. (2019). Has China's Belt and Road Initiative promoted its green total factor productivity? Evidence from primary provinces along the route. *Energy Policy*, 129, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.045>.
21. Lungarella, M., Pitti, A., & Kuniyoshi, Y. (2007). Information transfer at multiple scales. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 76(5), 056117.
22. Luo, L., Zhao, C., Wang, E., Raza, A., & Yin, C. (2022). *Bacillus amyloliquefaciens* as an excellent agent for biofertilizer and biocontrol in agriculture: An overview for its mechanisms. *Microbiological Research*, 259, 127016. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127016>. EDN: <https://elibrary.ru/YXDAFQ>

23. Matthews, B. H. (2019). Hidden constraints to digital financial inclusion: The oral-literate divide. *Development in Practice*, 29(8), 1014–1028.
24. Plotnikov, V., Nikitin, Y., Maramygin, M., & Ilyasov, R. (2021). National food security under institutional challenges (Russian experience). *International Journal of Sociology and Social Policy*, 41(1–2), 139–153. <https://doi.org/10.1108/IJSSP-03-2020-0074>. EDN: <https://elibrary.ru/FFRHYZ>
25. Papadopoulos, G., Arduini, S., Uyar, H., Psiroukis, V., Kasimati, A., & Fountas, S. (2024). Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100441. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441>. EDN: <https://elibrary.ru/BVIYEL>
26. Potgieter, A. B., Zhao, Y., Zarco-Tejada, P. J., Chenu, K., Zhang, Y., Porker, K., & Chapman, S. (2021). Evolution and application of digital technologies to predict crop type and crop phenology in agriculture. *In Silico Plants*, 3, diab017. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab017>. EDN: <https://elibrary.ru/CGRRCY>
27. Schreiber, T. (2000). Measuring information transfer. *Physical Review Letters*, 85(2), 461. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.461>. EDN: <https://elibrary.ru/LOIRFJ>
28. Dudkin, I. V., Dolgoplova, N. V., Zhilyakov, D. I., et al. (2023). Substantiation of the weed control system when placing grain production in microzones of the Central Chernozem region. *E3S Web of Conferences*, 390, 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339002011>. EDN: <https://elibrary.ru/UXLTRV>

References

1. Amirova, E. F., Zokin, A. L., Chistyakov, M. S., & Kosnikov, S. N. (2021). Main directions of comprehensive scientific and technological development of the digital platform of Russia's agrarian economy. *Management Accounting*, (4), 201–208.
2. Bannikov, S. A., Garbuzova, T. G., & Losev, A. N. (2023). Digital maturity of agriculture: Research results and assessment methodology. *Bulletin of NGIEI*, (10), 67–77. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-10-67-77>. EDN: <https://elibrary.ru/GHMGMG>
3. *Departmental project "Digital Agriculture": Official publication*. (2019). Moscow: FGBNU «Rosinformagrotekh». 48 p.
4. Zatsarinny, A. A., Medennikov, V. I., & Raikov, A. N. (2023). Integration of artificial intelligence applications into the unified digital platform of the agro-industrial complex. *Information Society*, (1), 127–138. https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_127. EDN: <https://elibrary.ru/NMKKLZ>
5. Kataev, M. Yu., Pasko, O. A., & Kartashov, E. Yu. (2023). Analysis of practical possibilities of using unmanned aerial vehicles in agriculture. *Bulletin of KrasGAU*, (1), 54–62. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-1-54-62>. EDN: <https://elibrary.ru/EEAPOS>

6. Makarov, D. I. (2022). Development of state support for the sectors of the agro-industrial complex in Russia. In *Current problems of society, economy and law in the context of global challenges* (pp. 299–303).
7. Murashova, N. V. (2021). Formation of the mechanism of digital transformation of agriculture. *Bulletin of NGIEI*, (9), 129–138. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-9-129-138>. EDN: <https://elibrary.ru/KLGCHG>
8. Osovin, M. N. (2024). Implementation of artificial intelligence technologies at enterprises of the agro-food complex of Russia: Problems and directions for their solution. *Food Policy and Security*, 11(3), 553–568. <https://doi.org/10.18334/ppib.11.3.121322>. EDN: <https://elibrary.ru/DIHLTQ>
9. Parshutina, I. G., Solodovnik, A. I., & Amelina, A. V. (2023). Analysis of the impact of digitalization and the Internet of Things on labor productivity in the economy. *Bulletin of Agrarian Science*, (4), 155–163. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.4.155>. EDN: <https://elibrary.ru/WKJYIU>
10. Raikov, A. N. (2021). The concept of a digital platform for Russian agriculture ensuring convergence to goals. *Informatization and Communication*, (1), 64–73. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2021-12-1-64-73>. EDN: <https://elibrary.ru/KPVVRU>
11. Seitov, S. K. (2024). Distribution of support volumes among subjects of the agro-industrial complex in the Krasnoyarsk Territory. *Science of Krasnoyarsk*, 13(3), 65–86. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2024-13-3-258>. EDN: <https://elibrary.ru/PHPXAM>
12. Stelmashonok, E. V., & Stelmashonok, V. L. (2021). Digital transformation of the agro-industrial complex: Analysis of prospects. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(2), 336–365. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-2-336-365>. EDN: <https://elibrary.ru/UUMMYD>
13. Takun, A., Makrak, S., & Takun, S. (2021). Methodological aspects of evaluating the effectiveness of digital technologies in precision agriculture. *Science and Innovation*, (3), 11–16. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2021-3-11-16>. EDN: <https://elibrary.ru/PBHOHQ>
14. Yurchenko, I. F. (2021). Prospects of Internet of Things technologies in agricultural production. *Melioration and Hydraulic Engineering*, 11(1), 67–80. <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-1-67-80>. EDN: <https://elibrary.ru/HZESEL>
15. Yakushev, V. P. (2019). Digital technologies of precision agriculture in implementing the priority of “smart agriculture” in Russia. *Bulletin of the Russian Agricultural Science*, (2), 11–15. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/11-15>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBFLJJ>
16. Deng, H., Jing, X., & Shen, Z. (2022). Internet technology and green productivity in agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81441–81451. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21370-z>. EDN: <https://elibrary.ru/BRHGNN>

17. Dovganeva, Yu. A., Katrashova, Yu. V., & Kirillova, T. V. (2023). The ecosystem of vertical farms: A conceptual framework. *Food Systems*, 6(4), 504–511. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-504-511>. EDN: <https://elibrary.ru/KXMYUD>
18. Gao, Q., Cheng, C., Sun, G., & Li, J. (2022). The impact of digital inclusive finance on agricultural green total factor productivity: Evidence from China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 905644. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.905644>. EDN: <https://elibrary.ru/HTRNEB>
19. Herrero, M., Thornton, P. K., Mason-D'Croz, D., Palmer, J., Bodirsky, B. L., Pradhan, P., ... & Rockström, J. (2021). Articulating the effect of food systems innovation on the Sustainable Development Goals. *The Lancet Planetary Health*, 5(1), e50–e62. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30277-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30277-1). EDN: <https://elibrary.ru/KVVPPO>
20. Jiao, S., Lu, Y., & Wei, G. (2022). Soil multitrophic network complexity enhances the link between biodiversity and multifunctionality in agricultural systems. *Global Change Biology*, 28(1), 140–153. <https://doi.org/10.1111/gcb.15917>. EDN: <https://elibrary.ru/LEGTXG>
21. Liu, Z., & Xin, L. (2019). Has China's Belt and Road Initiative promoted its green total factor productivity? Evidence from primary provinces along the route. *Energy Policy*, 129, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.045>.
22. Lungarella, M., Pitti, A., & Kuniyoshi, Y. (2007). Information transfer at multiple scales. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 76(5), 056117.
23. Luo, L., Zhao, C., Wang, E., Raza, A., & Yin, C. (2022). *Bacillus amyloliquefaciens* as an excellent agent for biofertilizer and biocontrol in agriculture: An overview for its mechanisms. *Microbiological Research*, 259, 127016. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127016>. EDN: <https://elibrary.ru/YXDAFQ>
24. Matthews, B. H. (2019). Hidden constraints to digital financial inclusion: The oral-literate divide. *Development in Practice*, 29(8), 1014–1028.
25. Plotnikov, V., Nikitin, Y., Maramygin, M., & Ilyasov, R. (2021). National food security under institutional challenges (Russian experience). *International Journal of Sociology and Social Policy*, 41(1–2), 139–153. <https://doi.org/10.1108/IJSSP-03-2020-0074>. EDN: <https://elibrary.ru/FFRHYZ>
26. Papadopoulos, G., Arduini, S., Uyar, H., Psiroukis, V., Kasimati, A., & Fountas, S. (2024). Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100441. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441>. EDN: <https://elibrary.ru/BVIYEL>
27. Potgieter, A. B., Zhao, Y., Zarco-Tejada, P. J., Chenu, K., Zhang, Y., Porker, K., & Chapman, S. (2021). Evolution and application of digital technologies to predict crop type and crop phenology in agriculture. *In Silico Plants*, 3, diab017. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab017>. EDN: <https://elibrary.ru/CGRRCY>

28. Schreiber, T. (2000). Measuring information transfer. *Physical Review Letters*, 85(2), 461. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.461>. EDN: <https://elibrary.ru/LOIRFJ>
29. Dudkin, I. V., Dolgoplova, N. V., Zhilyakov, D. I., et al. (2023). Substantiation of the weed control system when placing grain production in microzones of the Central Chernozem region. *E3S Web of Conferences*, 390, 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339002011>. EDN: <https://elibrary.ru/UXLTRV>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Анисимов Александр Юрьевич, кандидат экономических наук, доцент, заместитель директора по учебно-методической работе факультета информационных технологий, доцент кафедры информационного менеджмента им. профессора В.В. Дика
Университет «Синергия»
ул. Мецанская, 9/14 стр. 1, г. Москва, 129090, Российская Федерация
anisimov_au@mail.ru

Машегов Петр Николаевич, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры информационного менеджмента им. профессора В.В. Дика; профессор кафедры информатики
Университет «Синергия»; Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
ул. Мецанская, 9/14 стр. 1, г. Москва, 129090, Российская Федерация;
Стремянный пер., 36, г. Москва, 115054, Российская Федерация
yand-man@yandex.ru

Трубин Александр Евгеньевич, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой цифровой экономики
Университет «Синергия»
ул. Мецанская, 9/14 стр. 1, г. Москва, 129090, Российская Федерация
niburt@yandex.ru

Трубина Ирина Олеговна, кандидат экономических наук, доцент, заместитель декана факультета бизнеса, доцент кафедры информационного менеджмента им. профессора В.В. Дика
Университет «Синергия»
ул. Мецанская, 9/14 стр. 1, г. Москва, 129090, Российская Федерация
i-j-i@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexander Yu. Anisimov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Academic and Methodological Affairs at the Faculty of Information Technology, Associate Professor in the Professor V.V. Dik Department of Information Management

Synergy University

9/14, Bldg. 1, Meshchanskaya Str., Moscow, 129090, Russian Federation

anisimov_au@mail.ru

SPIN-code: 9732-9601

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8113-4523>

Scopus Author ID: 57194047333

Petr N. Mashegov, Doctor of Economics, Professor, Professor in the V.V. Dik Department of Information Management; Professor in the Department of Computer Science

Synergy University; Plekhanov Russian University of Economics

9/14, Bldg. 1, Meshchanskaya Str., Moscow, 129090, Russian Federation; 36,

Stremyanny Lane, Moscow, 115054, Russian Federation

yand-man@yandex.ru

SPIN-code: 3407-7189

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6984-010X>

Alexander E. Trubin, Ph.D. in Economics, Associate Professor, Chair of the Department of Digital Economy

Synergy University

9/14, Bldg. 1, Meshchanskaya Str., Moscow, 129090, Russian Federation

niburt@yandex.ru

SPIN-code: 5097-5521

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-5679>

Irina O. Trubina, Ph.D. in Economics, Associate Professor, Associate Dean of the School of Business, Associate Professor in the Professor V.V. Dik Department of Information Management

Synergy University

9/14, Bldg. 1, Meshchanskaya Str., Moscow, 129090, Russian Federation

i-j-i@yandex.ru

SPIN-code: 1231-9169

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8691-3999>

Поступила 21.09.2025

После рецензирования 17.11.2025

Принята 25.12.2025

Received 21.09.2025

Revised 17.11.2025

Accepted 25.12.2025

Опыт регионов / Experience of Regions

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1402](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1402)

EDN: [WKYPPK](https://www.edn.ru/entry/WKYPPK)

УДК 338.43:636:339.5



Животноводческая политика Китая в условиях продовольственной безопасности и геоэкономической интеграции

А.В. Бредихин¹, В.Н. Закопырин², Д.И. Измайлова³

¹*Институт Китая и современной Азии Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация*

²*Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний,
Рязань, Российская Федерация*

³*Донецкий национальный университет экономики и торговли имени
Михаила Туган-Барановского, Донецк, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. В статье исследуется животноводческая политика Китая в контексте экспорта продукции в страны-участницы Шанхайской организации сотрудничества (ШОС). Анализируются основные направления государственной политики, включая регулирование производства, санитарно-ветеринарные требования, экспортную стратегию и меры поддержки отрасли. Представлена роль КНР в системе экспортных перспектив стран-участниц наднационального интеграционного объединения.

Целью исследования выступает рассмотрение структуры и особенностей развития животноводства в КНР, а также его влияние на внутренний рынок и экспортные возможности в страны ШОС.

Материалы и методы. В статье выявлены ключевые факторы, влияющие на эффективность политики и экспортный потенциал, а также перспективы трансфера технологий и развития сотрудничества в рамках региона. Авторами используется контент-анализ, сравнительный методы позволяющие провести теоретический обзор животноводческой политики Китая.

Результаты. Исследователи считают, что в дальнейшем китайские власти примут ряд действенных средств, направленных на развитие животноводческой отрасли и связанных с биологическими и климатическими особенностями регионов осуществления интенсивного сельского хозяйства. При этом Китай претендует

на ведущую позицию в качестве экспортера животноводческой продукции среди стран-участниц ШОС.

Ключевые слова: животноводческая политика; Китай; экспорт; ШОС; продовольственная безопасность; продукция животноводства; государственное регулирование экспорта; продовольственное обеспечение; ветеринарные требования; кролиководство; технологический трансфер

Для цитирования. Бредихин, А. В., Закопырин, В. Н., & Измайлова, Д. И. (2026). Животноводческая политика Китая в условиях продовольственной безопасности и геоэкономической интеграции. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 627–640. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1402>

China's animal-breeding policy in the context of food security and socioeconomic integration

A.V. Bredikhin¹, V.N. Zakopyrin², D.I. Izmailova³

¹*Institute of China and Contemporary Asia of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service, Ryazan, Russian Federation*

³*Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, Russian Federation*

Abstract

Background. The article examines China's livestock policy in the context of exporting products to the member countries of the Shanghai Cooperation Organization (SCO). The main directions of state policy are analyzed, including production regulation, sanitary and veterinary requirements, export strategy, and measures to support the industry. The article presents the role of the People's Republic of China in the export prospects of the member countries of the supranational integration association.

The **purpose** of the scientific research is to examine the structure and features of the development of livestock farming in China, as well as its impact on the domestic market and export opportunities to the SCO countries.

Materials and methods. The article identifies key factors affecting the effectiveness of policies and export potential, as well as the prospects for technology transfer and development of cooperation within the region. The authors use content analysis and comparative methods to conduct a theoretical review of China's livestock policy.

Results. The researchers believe that in the future, the Chinese authorities will adopt a number of effective measures aimed at developing the livestock industry and related

to the biological and climatic characteristics of the regions where intensive agriculture is carried out. At the same time, China claims a leading position as an exporter of livestock products among the SCO member countries.

Keywords: animal husbandry policy; China; exports; SCO; food security; animal products; state regulation of exports; food supply; veterinary requirements; rabbit farming; technology transfer

For citation. Bredikhin, A. V., Zakopyrin, V. N., & Izmailova, D. I. (2026). China's animal-breeding policy in the context of food security and geoeconomic integration. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 627–640. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1402>

Введение

Современный многополярный мир имеет свои особенности распределения производства тех или иных сфер продукции. Они напрямую связаны с деятельностью наднациональных интеграционных объединений. Нарастающее влияние Китайской Народной Республики (КНР) на глобальный рынок продуктов животноводства и её стратегическое партнёрство со странами-участницами Шанхайской организации сотрудничества (ШОС) определяют актуальность исследования животноводческой политики КНР в контексте экспортных потоков в регион ШОС.

«Шанхайская организация сотрудничества как новый международный институт заняла прочную позицию в политической жизни стран Центральной Азии. Сегодня под эгидой ШОС реализуется несколько крупных проектов, способных резко изменить жизнь региона, а в более широком плане – поменять баланс сил на евразийском континенте в пользу Китая» (А. Каукенов) [8]. Определяя роль ШОС в геополитическом контексте А.В. Бредихин указывает, что организация «формирует новую архитектуру глобального мира и задаёт политические и экономические тренды его развития» [6]. По данным Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, с 2015 по 2023 гг. внешнеторговый товарооборот России со странами ШОС увеличился в 2,9 раза (с \$120,1 млрд до \$342,3 млрд), экспорт товаров из стран ШОС в Россию за соответствующий период увеличился в 2,4 раза (с \$51,8 млрд до \$125,9 млрд), импорт – в 3,2 раза (с \$68,2 млрд до \$216,4 млрд) [13]. Сравнительный анализ показателей экспорта и импорта в 2022 г. представлен в таблице 1.

Глобализация продовольственных рынков, сопровождаемая ростом численности населения и повышением уровня жизни, особенно в развивающихся странах, приводит к значительному увеличению спроса на

продукты питания животного происхождения. Данный тренд противоречит доминирующим в странах коллективного Запада продовольственным подходом, однако всецело ложится в конструктивное русло евразийской цивилизации. Если по мнению российских исследователей экспорт продукции растительного происхождения из отдельных приграничных регионов может иметь нестабильный характер [4], то животноводческий сектор экспортной экономики выступает одним из наиболее быстро развивающихся, а по мнению руководителя федерального центра «Агроэкспорт» Ильи Ильюшина к 2030 году экспорт мясной продукции из России в страны ШОС может «превысить \$3,8 млрд., около \$1,5 млрд составит мясо птицы, а \$1,3 млрд – свинина» [16].

Таблица 1.

**Объем взаимного товарооборота в 2022 г.
между странами-участниками ШОС в млн. долл. США [10].**

Table 1. Bilateral trade volume in 2022 among SCO member states, in millions of U.S. dollars [10].

		Импорт								Общий объем экспорта
		Китай	Россия	Казах- стан	Узбеки- стан	Кыргыз- стан	Та- джики- стан	Индия	Паки- стан	
Экспорт	Китай	/	49 484	12 807	5 044	6 312	1 612	74 924	16 183	166 368
	Россия	57 321	/	14 287	3 908	1 559	953	7 308	169	85 506
	Казахстан	7 823	5 602	/	1 981	604	653	1 573	2	18 239
	Узбекистан	1 763	2 035	1 206	/	634	190	10	94	5 931
	Кыргызстан	81	281	347	139	/	57	3	2	911
	Таджикистан	84	37	103	144	10	/	0,3	0,1	380
	Индия	17 279	2 871	194	193	29	25	/	1 186	21 777
	Пакистан	2 037	141	83	22	2	8	66	/	2 360
Общий объем импорта		86 389	60 452	29 027	11 443	9 152	3 498	83 885	17 636	298 325
Консолидированный товарооборот со странами ШОС		252 757	169 254	56 124	17 365	10 062	3 878	105 662	19 996	712 569

Обеспечение продовольственной безопасности, понимаемой как наличие устойчивого доступа к достаточной, безопасной и питательной пище для всех слоёв населения, становится первостепенной задачей для государств-членов ШОС, многие из которых демонстрируют высокий уровень зависимости от импорта продовольствия, включая продукцию животноводства [12].

Научная новизна исследования. По мнению авторов, анализ животноводческой политики Китая, её воздействия на внутренний рынок и,

впоследствии, на экспортные возможности, приобретает критическую значимость для понимания динамики продовольственного обеспечения в регионе ШОС. Актуализируется данный аспект не только во внешнеэкономической сфере, но и в агропромышленном секторе, выступая значительным фактором интеграции стран-участниц Шанхайской организации сотрудничества, перспективы кластеризации различных секторов экономики наднационального интеграционного образования.

Более того, глубокая интеграция китайской экономики в экономические системы стран-участниц ШОС, проявляющаяся в масштабных инфраструктурных проектах, торговых соглашениях и инвестиционных потоках, формирует особую среду для исследования, требующую учёта множественных факторов, включая геополитические и геоэкономические аспекты развития региона. «Китай стал самым привлекательным местом для иностранных инвестиций, объем которых стабильно превышает 100 млрд долл. в год, но в последнее время он еще и вывозит капитал на такие же суммы, вкладывая его как в развивающиеся страны, так и в страны Запада» (М.А. Чернов) [17].

Сопряженность агрокластера Китая и глобальных процессов находит отражение и в том, что расширение экспорта овощей привлекло внимание политиков к международным правилам безопасности пищевых продуктов [18]. Подобные тенденции наблюдаются и в животноводческой сфере. Практической значимостью исследования выступает формирование рекомендации для руководящих органов ШОС, а также профильных ведомств Российской Федерации и Китайской Народной Республики по созданию совместных агрокластеров в приграничной зоне, направленных на общий рынок ШОС.

Цель исследования – осуществить теоретический обзор животноводческой политики Китая, определив ключевые факторы, влияющие на её эффективность и отражающиеся на экспортных потоках в страны ШОС.

Задачи исследования:

- Дать оценку экспортному сектору животноводческой продукции Китая.
- Оценить влияние государственной политики на экспортный потенциал.
- Выявить перспективные направления сотрудничества со странами ШОС.

Материалы и методы

Авторами исследования используются контент-анализ и метод сравнительного анализа отчетной документации и новостей информационных ресурсов Шанхайской организации сотрудничества, позволяющие представить максимально точно теоретический анализ исследования.

Результаты исследований и их обсуждение

Определение ключевых терминов является необходимым условием для проведения строгого научного анализа. Под животноводческой политикой нами понимается совокупность государственных мер, направленных на регулирование производства, переработки и сбыта продукции животноводства, включая финансовую поддержку, санитарно-ветеринарные требования, контроль качества и экспортную политику [7]. Продовольственная безопасность определяется как состояние, при котором население имеет устойчивый доступ к достаточному количеству безопасной и питательной пищи для активной и здоровой жизни, при этом учитываются факторы доступа, доступности и устойчивости продовольственных систем [3]. Шанхайская организация сотрудничества (ШОС) – межправительственная региональная организация, объединяющая страны Евразии, целью которой является укрепление региональной стабильности и сотрудничество в различных сферах, включая экономику и продовольственную безопасность [11]. Экспорт в данном случае означает вывоз продукции животноводства из КНР в страны-участницы ШОС.

Несмотря на значительные масштабы производства, животноводческая отрасль в КНР характеризуется неоднородностью развития, обусловленной географическими, климатическими и социально-экономическими факторами. В то время как в восточных регионах животноводство выполняет преимущественно вспомогательную функцию, в западных, северо-западных и северных аридных и горных областях (Внутренняя Монголия, Синьцзян, Тибет) формирует самостоятельную отрасль, специализируясь на разведении крупного рогатого скота, овец и коз, адаптированных к суровым условиям. Структура отрасли демонстрирует явное преобладание свиноводства, обеспечивающего около 66% потребляемого в стране мяса. Производство мяса птицы занимает второе место по объёму, существенно уступая свинине, но демонстрируя стабильный рост.

Молочное животноводство, напротив, находится на относительно низком уровне развития, преимущественно концентрируясь в periurbanizированных зонах. Высокий уровень технологического развития наблюдается в отдельных сегментах, особенно в крупном промышленном свиноводстве и птицеводстве, в то время как традиционные методы животноводства по-прежнему широко распространены, особенно в сельских районах.

Развитие животноводства в Китае напрямую связано с государственной политикой, направленной на обеспечение продовольственной безопасности и стимулирование экономического роста. Правительство активно

поддерживает модернизацию отрасли, инвестируя в развитие инфраструктуры, внедрение инновационных технологий и повышение эффективности производства. Однако, стратегическое планирование сталкивается с необходимостью балансирования между увеличением объемов производства и решением проблем экологической устойчивости и биологической безопасности, что обусловлено опасениями по поводу зоонозных последствий, отчасти из-за смешения между выращиваемыми видами, людьми и перелетными птицами и отчасти из-за популярности рынков живых животных, что может привести к распространению различных видов заболеваний среди населения [19].

Государственная политика Китая в области животноводства характеризуется интенсивным развитием, ориентированным на удовлетворение растущего внутреннего спроса и наращивание экспортного потенциала, в частности, в рамках Шанхайской организации сотрудничества (ШОС). Исключая внешние кризисы, Китай разработал особый подход в рамках своего уникального политико-экономического контекста, уделяя особое внимание административной ответственности в управлении продовольственной безопасностью, что значительно отличается от западных методологий, подчёркивая разнообразие глобальных подходов к управлению продовольственными системами [20]. Ключевые стратегические векторы включают:

- стимулирование внедрения передовых агротехнологий, направленных на повышение продуктивности животноводства;
- разведение высокопродуктивных пород скота и птицы, активное применение селекционных программ;
- профилактику и контроль заболеваний животных посредством строгих ветеринарно-санитарных норм и регулярного мониторинга;
- создание экономических стимулов для фермеров, таких как компенсационные выплаты, субсидии на инвестиции, финансовую помощь в борьбе с болезнями, льготы по транспортировке;
- решение экологических проблем, связанных с животноводством, в том числе, усовершенствование методов утилизации отходов жизнедеятельности животных и оптимизацию использования земельных ресурсов;
- регулирование рынка кормов, включая разработку и внедрение государственных стандартов качества и безопасности кормов (GB 13078-2017, GB 10648-2013) и запрет на использование определенных лекарственных средств и добавок (Официальное уведомление Министерства сельского хозяйства КНР 250);

- установление строгих санитарных норм на всех этапах производства, от содержания животных до переработки продукции (GB 12694-2016, GB 31650.1-2022, GB 2760—2024, GB12693-2023), включая введение принципов надлежащей производственной практики (GMP) в молочной промышленности [9];
- стимулирование перехода к экологически устойчивым методам ведения животноводческого хозяйства, предусмотренных поправками к Закону о животноводстве 2022 года. Реализация этих мер направлена на повышение конкурентоспособности китайского животноводства на международном рынке и обеспечение продовольственной безопасности страны.

Несмотря на значительные успехи, китайское животноводство сталкивается и с рядом проблем, включая проблему нехватки земли вблизи крупных животноводческих комплексов и замедление темпов экономического роста.

Экспорт китайской продукции животноводства в страны-участницы Шанхайской организации сотрудничества (ШОС) определен как внутренними факторами (производственные мощности, государственная политика субсидирования и стимулирования экспорта), так и внешними (потребности целевых рынков, конкурентная среда, геополитическая ситуация).

Китай экспортирует в страны ШОС широкий ассортимент продукции: охлажденную и замороженную свинину, птицу (курятину, утятину), яйца, молочную продукцию (молоко, йогурты, сыры), субпродукты и консервы. Географическая направленность экспорта сосредоточена преимущественно на государствах Центральной Азии и частично на Южной Азии, при этом объемы поставок коррелируют с уровнем экономического развития и демографическими показателями целевых стран.

Перспективной на наш взгляд отраслью экспортного животноводства выступает кролиководство. Крупный кролиководческий бизнес в Китае разделяется на два основных направления:

- вертикально интегрированные холдинги (China Kangda Foodstuffs Co.), в состав которых также входят фермы по выращиванию птицы, производства мясопереработки и выделыванию шкур;ок;
- предприятия, осуществляющие комплексную переработку сырья (от убоя кроликов до получения конечной продукции) (Sichuan «Ha Ge» Group), включающие также фабрики по пошиву изделий из кожи и меха, исследовательский центр и комбикормовые заводы [5].

Учет целевых рынков выявляет значительные различия в потребностях стран ШОС. Россия, обладая обширными территориями и развитым

сельским хозяйством, демонстрирует умеренный спрос на специфические виды китайской продукции животноводства, например, на высококачественную птицеводческую продукцию (доля рынка Китая – около 7% в 2024 году), в то время как Казахстан и Узбекистан испытывают более высокую потребность в свинине (соответственно 12% и 15% рынка в 2024 году), обусловленную развитием внутреннего потребления и дефицитом собственного производства [9].

Густонаселенные страны Пакистан (20% рынка Китая в 2024 году) и Индия, показывают значительный потенциал для импорта как птицеводческой, так и свиноводческой продукции, однако сталкиваются с жесткими санитарно-ветеринарными требованиями и высоким уровнем конкуренции со стороны местных производителей. Кыргызстан и Таджикистан, характеризующиеся ограниченными внутренними производственными мощностями, демонстрируют высокий спрос на широкий спектр продукции животноводства из Китая, включая молочную продукцию (доля рынка Китая в Кыргызстане составила 18% в 2024 году) и яйца [9].

Цена, как правило, является конкурентным преимуществом китайской продукции, особенно в сегментах массового потребления, однако в некоторых сегментах (например, в производстве высококачественной молочной продукции) китайские производители сталкиваются с жесткой конкуренцией со стороны местных производителей и импортеров из других стран.

Выводы

Доминирующая роль Китая в региональной сельскохозяйственной торговле, обусловленная масштабами его производства и государственной поддержкой агропромышленного комплекса формирует большие возможности для импортирующих стран ШОС (увеличение доступности продовольствия, снижение цен).

Перспективы дальнейшего сотрудничества заключаются в трансфере китайских технологий в области интенсивного животноводства, повышения продуктивности и биобезопасности, а также в развитии совместных научно-исследовательских проектов, направленных на адаптацию китайских технологий к специфическим климатическим и экономическим условиям стран-партнеров.

Набирающая всю большую популярность кролиководческая отрасль Китая в сопряжении с текущими геоэкономическими тенденциями способствует необходимости расширения промышленного производства кроликов, формированию общих агрокластеров России и Китая, в том числе в при-

границной зоне [5], способных в комплексе с иными аспектами совместной экологической политики стать мощным драйвером развития регионов [2].

Список литературы

1. Асаналиев, У. А., & Бредихин, А. В. (2024). Роль ШОС для стран ЕАЭС в современный период. *Евразийский юридический журнал*, (4-191), 487–488. EDN: <https://elibrary.ru/DKYRTJ>
2. Баженова, О. П., Костерова, В. В., & Адам, А. А. (2024). Трансграничная река Иртыш как источник экосистемных услуг. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(6), 103–126. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-6-1015>. EDN: <https://elibrary.ru/FGXUYZ>
3. Бекбергенова, Д. Е., & Баранник, В. А. (2022). Продовольственная безопасность Российской Федерации. *Экономика и бизнес: теория и практика*, 4(1), 38–44. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2022-4-1-38-43>. EDN: <https://elibrary.ru/QVSFEJ>
4. Бочаров, С. М., Бутакова, М. М., & Соколова, О. Н. (2024). Количественная оценка экспорта продукции растительного происхождения Алтайского края. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(4), 437–453. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-4-877>. EDN: <https://elibrary.ru/FTULCL>
5. Бредихин, А. В. (2025). Основные характеристики развития кролиководства в Китае. *Journal of Agriculture and Environment*, (4-56). <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.56.13>. EDN: <https://elibrary.ru/UJGFOI>
6. Бредихин, А. В. (2023). Перспективы развития Шанхайской организации сотрудничества. *Современная Азия: политика, экономика, общество*, (1), 11–16. <https://doi.org/10.48647/ISCA.2023.43.86.001>. EDN: <https://elibrary.ru/WNPVSM>
7. Голубева, О. Л. (2015). Структура современных целей и задач государственной аграрной политики в сфере животноводства. *Вестник СМУС74*, (3-10). EDN: <https://elibrary.ru/ULYDKL>
8. Каукунов, А. (2007). Политика Китая в Шанхайской организации сотрудничества. *Центральная Азия и Кавказ*, (3-51). EDN: <https://elibrary.ru/PWBNLH>
9. КНР Агроэкспорт 2024. Получено с https://agrodev.ru/f/obzor_ved_knr.pdf
10. Лукина, А. А., & Гильяно, А. А. (2024). Динамика взаимной торговли в странах ШОС: анализ ключевых показателей. *Вестник науки*, (4-6(75)), 184–192. EDN: <https://elibrary.ru/XSANXE>
11. Малышев, Д. В. (2021). Шанхайская организация сотрудничества и ее роль в системе современных международных отношений (к 20-летию создания ШОС). *Вестник Московского университета. Серия 25. Международные отношения и мировая политика*, 13(4), 81–104. <https://doi.org/10.48015/2076-7404-2021-13-4-81-104>. EDN: <https://elibrary.ru/EQNZRQ>

12. Казакова, Л. В. (Сост.). (2016). *Мировая продовольственная система: краткий курс лекций для магистров направления подготовки 38.04.01 «Экономика»*. ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». 32–34.
13. Решетников: товарооборот со странами ШОС обновил исторический максимум. *Ведомости*. <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2025/09/06/1137290-tovarooborot-obnovil>
14. Бредихин, А. В. (Отв. ред.). (2025). *Российское кролиководство*. АНО ЦЭМИ. 85 с. EDN: <https://elibrary.ru/НТΥΚQГ>
15. Бредихин, А. В. (Отв. ред.). (2025). *Российское кролиководство. Том 2*. АНО ЦЭМИ. 79 с. EDN: <https://elibrary.ru/TVGBRD>
16. Россия планирует увеличить экспорт мясной продукции до \$3,8 млрд к 2030 году. *Диалог ШОС*. <https://scomedia.ru/10516>
17. Чернов, М. А. (2022). ШОС и БРИКС: особенности участия Китая. *Молодой ученый*, (47-442), 376–379. EDN: <https://elibrary.ru/EYIMTG>
18. Dou, L., Yanagishima, K., Li, X., Li, P., & Nakagawa, M. (2015). Food safety regulation and its implication on Chinese vegetable exports. *Food Policy*, 57, 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.09.007>.
19. Wei, X., Lin, W., & Hennessy, D. A. (2015). Biosecurity and disease management in China's animal agriculture sector. *Food Policy*, 54, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.04.005>.
20. Zhang, Y., & Lu, S. (2024). Food politics in China: How strengthened accountability enhances food security. *Food Policy*, 128, 102692. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102692>. EDN: <https://elibrary.ru/FNZVVD>

References

1. Asanaliyev, U. A., & Bredikhin, A. V. (2024). The role of the SCO for EAEU countries in the modern period. *Eurasian Law Journal*, (4-191), 487–488. EDN: <https://elibrary.ru/DKYRTJ>
2. Bazhenova, O. P., Kosterova, V. V., & Adam, A. A. (2024). The transboundary river Irtysh as a source of ecosystem services. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(6), 103–126. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-6-1015>. EDN: <https://elibrary.ru/FGXUYZ>
3. Bekbergenova, D. E., & Barannik, V. A. (2022). Food security of the Russian Federation. *Economics and Business: Theory and Practice*, 4(1), 38–44. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2022-4-1-38-43>. EDN: <https://elibrary.ru/QVSFEJ>
4. Bocharov, S. M., Butakova, M. M., & Sokolova, O. N. (2024). Quantitative assessment of the export of plant-origin products from the Altai Territory. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(4), 437–453. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-4-877>. EDN: <https://elibrary.ru/FTULCL>

5. Bredikhin, A. V. (2025). Main characteristics of rabbit farming development in China. *Journal of Agriculture and Environment*, (4-56). <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.56.13>. EDN: <https://elibrary.ru/UJGFOI>
6. Bredikhin, A. V. (2023). Prospects for the development of the Shanghai Cooperation Organisation. *Modern Asia: Politics, Economics, Society*, (1), 11–16. <https://doi.org/10.48647/ICCA.2023.43.86.001>. EDN: <https://elibrary.ru/WNPVSM>
7. Golubeva, O. L. (2015). Structure of modern goals and objectives of state agrarian policy in the livestock sector. *Vestnik SMUS74*, (3-10). EDN: <https://elibrary.ru/ULYDKL>
8. Kaukenov, A. (2007). China's policy in the Shanghai Cooperation Organisation. *Central Asia and the Caucasus*, (3-51). EDN: <https://elibrary.ru/PWBNLH>
9. PRC Agroexport 2024. Retrieved from https://agrodv.ru/f/obzor_ved_knr.pdf
10. Lukina, A. A., & Giliano, A. A. (2024). Dynamics of mutual trade in SCO countries: Analysis of key indicators. *Vestnik Nauki*, (4-6(75)), 184–192. EDN: <https://elibrary.ru/XSANXE>
11. Malyshev, D. V. (2021). The Shanghai Cooperation Organisation and its role in the system of modern international relations (on the 20th anniversary of the SCO). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Series 25. International Relations and World Politics*, 13(4), 81–104. <https://doi.org/10.48015/2076-7404-2021-13-4-81-104>. EDN: <https://elibrary.ru/EQNZRQ>
12. Kazakova, L. V. (Comp.). (2016). *The world food system: A brief course of lectures for master's students in the field of training 38.04.01 "Economics"*. Saratov State Agrarian University. 32–34.
13. Reshetnikov: Trade turnover with SCO countries reached a historic high. *Vedomosti*. <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2025/09/06/1137290-tovarooborot-obnovil>
14. Bredikhin, A. V. (Ed.). (2025). *Russian rabbit farming*. ANO CEMI. 85 p. EDN: <https://elibrary.ru/HTYKQG>
15. Bredikhin, A. V. (Ed.). (2025). *Russian rabbit farming. Vol. 2*. ANO CEMI. 79 p. EDN: <https://elibrary.ru/TVGBRD>
16. Russia plans to increase meat product exports to \$3.8 billion by 2030. *SCO Dialogue*. <https://scomedia.ru/10516>
17. Chernov, M. A. (2022). The SCO and BRICS: Features of China's participation. *Molodoy Uchenyy*, (47-442), 376–379. EDN: <https://elibrary.ru/EYIMTG>
18. Dou, L., Yanagishima, K., Li, X., Li, P., & Nakagawa, M. (2015). Food safety regulation and its implication on Chinese vegetable exports. *Food Policy*, 57, 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.09.007>.
19. Wei, X., Lin, W., & Hennessy, D. A. (2015). Biosecurity and disease management in China's animal agriculture sector. *Food Policy*, 54, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.04.005>.

20. Zhang, Y., & Lu, S. (2024). Food politics in China: How strengthened accountability enhances food security. *Food Policy*, 128, 102692. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102692>. EDN: <https://elibrary.ru/FNZVVD>

ВКЛАД АВТОРОВ

Бредихин А.В.: общее руководство направлением исследования, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Закопырин В.Н.: работа с источниками, интерпретация результатов.

Измайлова Д.И.: работа с источниками, интерпретация результатов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anton V. Bredikhin: general management of the research direction, interpretation of the results, preparation of the article text.

Vladimir N. Zakopyrin: work with sources, interpretation of the results.

Dzhamilya I. Izmailova: work with sources, interpretation of the results.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Бредихин Антон Викторович, доктор исторических наук, ведущий научный сотрудник Центра “Россия, Китай, мир”

Институт Китая и современной Азии Российской академии наук

Нахимовский проспект, 32, г. Москва, 117218, Российская Федерация

bredikhin90@yandex.ru

Закопырин Владимир Николаевич, кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры административного и финансового права

Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний

ул. Сенная, 1, г. Рязань, 390000, Российская Федерация

bob503660@yandex.ru

Измайлова Джамиля Ибрагимовна, кандидат философских наук, доцент

Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского

ул. Щорса, 31, г. Донецк, ДНР, 283050, Российская Федерация

jamilyushka@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTORS

Anton V. Bredikhin, Doctor of Historical Sciences, Leading Researcher at the Center “Russia, China, the World”

*Institute of China and Contemporary Asia of the Russian Academy of Sciences
32, Nakhimovsky Prospekt, Moscow, 117218, Russian Federation
bredikhin90@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-3854>*

Vladimir N. Zakopyrin, Candidate of Legal Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Administrative and Financial Law
*Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service
1, Sennaya Str., Ryazan, 390000, Russian Federation
bob503660@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7589-4112>*

Dzhamilya I. Izmailova, Candidate of Philosophy, Associate Professor
*Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky
31, Shchorsa Str., Donetsk, 283050, Russian Federation
jamilyushka@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5011-8846>*

Поступила 09.07.2025

После рецензирования 09.10.2025

Принята 17.11.2025

Received 09.07.2025

Revised 09.10.2025

Accepted 17.11.2025

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

- Влияние типа темперамента на десинхронизацию параметров артериального давления у жителей северного региона**
Д.В. Суринов, О.Н. Рагозин, И.А. Шевнин, А.А. Бейсембаев 11
- Факторы естественной противоинойфекционной резистентности сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres: связь с составом кишечного микробиома и ассоциации с зоотехническими показателями продуктивности**
Д.Г. Дерябин, Л.В. Власенко, И.Ф. Каримов, Г.К. Дускаев 29
- Применение фитопрепарата при микст-инвазиях у лабораторных животных и для коррекции нарушений репродуктивных функций**
О.Б. Жданова, О.В. Часовских 55
- Дозозависимое влияние цитрата кальция на процессы минерализации, эндокринные функции и метаболический статус у кур-несушек**
К.С. Нечитайло, Т.Н. Холодилина, Е.А. Сизова, Д.Е. Шошин, К.В. Рязанцева, Е.В. Яушева 72

ЭКОЛОГИЯ

- Оценка способов нейтрализации запахов животноводческих комплексов**
Н.А. Зырянова, С.А. Пашаян, О.А. Столбова, К.А. Сидорова, А.Б. Саткеева, О.А. Драгич 103
- Влияние эндофитных грибов на формирование устойчивости у *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. к засухе**
П.А. Кузьмин, П.А. Крылов, П.А. Панасенко, А.А. Олейников 134

Оценка эффективности улавливания CO₂ растениями-сидератами в агроэкосистемах

*П.А. Курынцева, А.Р. Камалова, С.И. Красовская,
Н.А. Пронович, С.Ю. Селивановская* 157

ПОЧВОВЕДЕНИЕ**Изучение влияния катионных ПАВ на гидрофильно-гидрофобные свойства бентонита Таганского месторождения**

*А.А. Соколов, Р.В. Симонов, С.А. Сидяков, Л.В. Переломов,
И.В. Шахгельдян, Ю.М. Атрощенко* 187

**ФИЗИОЛОГИЯ
И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ****Изучение полифенольного состава листьев и коры *Salix alba* L. и *Populus nigra* L., произрастающих на юге России**

А.Ф. Рябуха, И.В. Плетнева, А.Н. Гейсман, М.М. Корнеев 208

**БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА
И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ****Пробиотические свойства молочнокислых бактерий, выделенных из репродуктивной системы коров экоферм Северо-Запада России**

*Е.А. Ёылдырым, В.А. Филиппова, И.А. Ключникова, К.А. Соколова,
Л.А. Ильина, А.А. Савичева, Е.А. Корочкина* 226

Липопептидные биосурфактанты для повышения нефтеотдачи: характеристика и эффективность

*А.С. Гордеев, А.А. Кириченко, Л.Р. Бикташева,
Х. Абдалджалил, П.А. Курынцева* 252

Полиамины – как факторы старения и долголетия у птиц в сравнении с млекопитающими: обзор

*Д.А. Устьянцев, М.Г. Маклецова, Г.А. Зеленкова,
Н.А. Кочеткова, Е.В. Плеханова, А.П. Зеленков* 267

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

The interplay between technology, institutions, and culture:

Pathways to sustainable palm oil practices in Indonesia

A. Kurnia, A. Nugroho, A. Anhar, A.H. Hamid 300

Multivariate analysis of spike traits to identify optimal phenotypic profiles of productive tiller number in novel hybrid soft winter wheat breeding lines

G.O. Dekin, V.A. Burlutskiy 320

Implementing nitrogen and its varieties to predict spring wheat productivity using DSSAT crop simulation modeling

S.G. Okbagabir, A. Hassouni, M.H. Al-Mamoori, Y. Wang, A.A. Ahmed, E.N. Pakina 336

Эффективность черенкования

и экономическая оценка производства посадочного материала голубики в необогреваемой теплице

Г.С. Габриелян, Г.А. Унанян, К.А. Маргарян, А.А. Манвелян, М.А. Казарян, Ж.А. Акопян 353

Урожайность озимой ржи в зависимости от норм посева и предшественников в Центральном Нечерноземье

А.С. Шкуркина, Д.В. Виноградов, Т.В. Зубкова, К.Д. Сазонкин 374

Формирование урожайности зерна яровой твердой пшеницы в зависимости от различных условий влагообеспеченности и минерального питания

А.Ю. Тимохин, В.С. Юсов, В.В. Михайлов, М.С. Шаповал 388

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ

Молекулярное генотипирование генов E1-E4 и оценка их прогностической значимости для селекции скороспелых сортов сои (*Glycine max* (L.) Merr)

П.Д. Тимкин, П.М. Линская, А.С. Зажигалкина, А.П. Галиченко, А.А. Пензин 407

**АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ,
ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ****Оценка нематодицидного действия
биоизлагаемых полимерных гранул, содержащих
изотиоцианаты, на *Globodera rostochiensis***

А.А. Суханова, К.Е. Заболотная, А.А. Чураков,
С.Н. Сырцов, Е.В. Брилькова, А.Н. Бояндин427

**САДОВОДСТВО, ОВОЩЕВОДСТВО,
ВИНОГРАДАРСТВО И ЛЕКАРСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ****Изучение влияния состава субстрата
на химический состав плодовых тел съедобных грибов**

А.В. Третьякова, О.В. Прокудина, А.С. Мяжкова,
Р.В. Симонов, Г.В. Песцов454

**ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО,
ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ,
ОЗЕЛЕНЕНИЕ, ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ****Естественные ареалы видов рода *Populus* spp. в южных регионах
Кыргызстана: фенологические особенности и перспективы
использования в городском озеленении**

Р.Р. Абсатаров, Б.Н. Шамшиев469

**Исследования состояния вырубок
в Могочинском лесничестве Забайкальского края**

А.В. Шемякина, Д.А. Голубев, Д.В. Павлов,
К.Е. Гула, Н.А. Каюмов484

ГИГИЕНА**Сравнительное изучение различных
питательных сред для изоляции возбудителей
из крови больных висцеральным лейшманиозом**

А.Э. Салехов, Ш.Н. Алиева, Ф.И. Гусейнова,
З.З. Абсейнова, С.Н. Эйвазлы, Ш.Н. Джанахмедова,
Э.А. Исмаилова, Ш.М. Бабаева503

ОБЩЕСТВЕННОЕ ЗДОРОВЬЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И СОЦИОЛОГИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, МЕДИКО-СОЦИАЛЬНАЯ ЭКСПЕРТИЗА

Барьеры индивидуальной мобильности людей с инвалидностью в современном обществе

Г.В. Жигунова, Ю.А. Афонькина, Е.В. Скалабан 522

Применение форсайт-технологий в межведомственном взаимодействии региона для повышения эффективности наркопрофилактики

*А.В. Ахохова, З.З. Урусова, М.Т. Кубачева,
М.А. Мусукова, И.Б. Айдамирова 544*

Технологии искусственного интеллекта в системе здравоохранения: общий обзор потенциальных возможностей и рисков

Д.А. Беляев, И.Н. Скрипкин, М.Ю. Смирнов 567

Определение факторов риска ИБС у пациентов с острым коронарным синдромом, госпитализированных в КМКБ № 20 г. Красноярск

*Н.В. Аксюткина, Т.Ю. Большакова, В.В. Козлов,
А.Д. Нарожная, А.М. Гриднева, И.А. Демичев, Е.Н. Кононов 588*

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка влияния цифровой трансформации на результативность сельского хозяйства

А.Ю. Анисимов, П.Н. Машегов, А.Е. Трубин, И.О. Трубина 605

ОПЫТ РЕГИОНОВ

Животноводческая политика Китая в условиях продовольственной безопасности и геоэкономической интеграции

А.В. Бредихин, В.Н. Закопырин, Д.И. Измайлова 627

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 641

CONTENTS

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

The influence of temperament type on blood pressure desynchronization in residents of the Northern Region

D.V. Surinov, O.N. Ragozin, I.A. Shevnin, A.A. Beisembaev 11

Innate immunity components in the blood serum of Arbor Acres broiler chickens: Links with the gut microbiome composition and associations with zootechnical productivity indicators

D.G. Deryabin, L.V. Vlasenko, I.F. Karimov, G.K. Duskaev 29

Application of phytopreparation in mixed infections in laboratory animals and for correction of reproductive function disorders

O.B. Zhdanova, O.V. Chasovskikh 55

Dose-dependent effect of calcium citrate on mineralization, endocrine regulation, and metabolic status in laying hens

K.S. Nechitailo, T.N. Kholodilina, E.A. Sizova, D.E. Shoshin, K.V. Ryazantseva, E.V. Yausheva 72

ECOLOGY

Methods of neutralization of atmospheric air odors by animal waste substances

N.A. Zyryanova, S.A. Pashayan, O.A. Stolbova, K.A. Sidorova, A.B. Satkeeva, O.A. Dragich 103

The effect of endophytic fungi on the formation of resistance in *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. to the drought

P.A. Kuzmin, P.A. Krylov, P.A. Panasenکو, A.A. Oleynikov 134

Assessment of CO₂ sequestration efficiency by cover crops in agroecosystems

P.A. Kuryntseva, A.R. Kamalova, S.I. Krasovskaya, A.N. Pronovich, S.Yu. Selivanovskaya 157

SOIL SCIENCE

Study of the influence of cationic surfactants on hydrophilic-hydrophobic properties of bentonite from the Tagansky deposit

*A.A. Sokolov, R.V. Simonov, S.A. Sydyakov, L.V. Perelomov,
I.V. Shakhkheldyan, Yu.M. Atroshchenko* 187

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

Study of the polyphenol composition of the leaves and bark of *Salix alba* L. and *Populus nigra* L., growing in southern Russia

A.F. Ryabukha, I.V. Pletneva, A.N. Geisman, M.M. Korneev 208

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

Probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from the reproductive system of cows on eco-farms in the North-West of Russia

*E.A. Yildirim, V.A. Fillipova, I.A. Klyuchnikova, K.A. Sokolova,
L.A. Ilina, A.A. Savicheva, E.A. Korochkina* 226

Lipopeptide biosurfactants for enhanced oil recovery: characterization and efficiency

*A.S. Gordeev, A.A. Kirichenko, L.R. Biktasheva,
H. Abdaljalil, P.A. Kuryntseva* 252

Polyamines as factors of aging and longevity in birds compared to mammals: review

*D.A. Ustyantsev, M.G. Makletsova, G.A. Zelenkova,
N.A. Kochetkova, E.V. Plekhanova, A.P. Zelenkov* 267

GENERAL AGRICULTURE AND CROP PRODUCTION

The interplay between technology, institutions, and culture: Pathways to sustainable palm oil practices in Indonesia

A. Kurnia, A. Nugroho, A. Anhar, A.H. Hamid 300

Multivariate analysis of spike traits to identify optimal phenotypic profiles of productive tiller number in novel hybrid soft winter wheat breeding lines

G.O. Dekin, V.A. Burlutskiy 320

Implementing nitrogen and its varieties to predict spring wheat productivity using DSSAT crop simulation modeling

S.G. Okbagabir, A. Hassouni, M.H. Al-Mamoori, Y. Wang, A.A. Ahmed, E.N. Pakina 336

Cutting propagation efficiency and economic evaluation of blueberry planting material production in an unheated greenhouse

G.S. Gabrielyan, G.H. Hunanyan, K.A. Margaryan, A.A. Manvelyan, M.H. Ghazaryan, J.A. Akopian 353

Winter rye yield depending on seeding rates and precursors in the Central Non-Chernozem Region

A.S. Shkurkina, D.V. Vinogradov, T.V. Zubkova, K.D. Sazonkin 374

Formation of grain yield of spring hard wheat depending on various conditions of moisture supply and mineral nutrition

A.Yu. Timokhin, V.S. Yusov, V.V. Mikhailov, M.S. Shapoval 388

**BREEDING, SEED PRODUCTION,
AND BIOTECHNOLOGY**

Molecular genotyping of *E1-E4* genes and assessment of their predictive significance for breeding early-maturing soybean (*Glycine max* (L.) Merr) varieties

P.D. Timkin, P.M. Linskaya, A.S. Zazhigalkina, A.P. Galichenko, A.A. Penzin 407

**AGRICULTURAL CHEMISTRY, SOIL SCIENCE, PLANT
PROTECTION AND QUARANTINE**

Evaluation of the nematicidal effect of biodegradable polymer-based granules containing isothiocyanates on *Globodera rostochiensis*

A.A. Sukhanova, K.E. Zabolotnaya, A.A. Churakov, S.N. Syrtsov, E.V. Brilkova, A.N. Boyandin 427

HORTICULTURE, VEGETABLE GROWING, VITICULTURE, AND MEDICINAL CROPS

Study of the effect of substrate composition on the chemical composition of fruit bodies of edible mushrooms

A.V. Tretyakova, O.V. Prokudina, A.S. Myagkova,

R.V. Simonov, G.V. Pestsov 454

FOREST SCIENCE, SILVICULTURE, FOREST CULTIVATION, AGROFORESTRY, GREENING, FOREST PYROLOGY, AND FOREST INVENTORY

Natural habitats of *Populus* spp. species in the southern regions of Kyrgyzstan: phenological features and prospects for urban landscaping

R.R. Absatarov, B.N. Shamshiev 469

Studies of the state of logging in the Mogochinsky forestry of the Trans-Baikal Territory

A.V. Shemyakina, D.A. Golubev, D.V. Pavlov,

K.E. Gula, N.A. Kayumov 484

HYGIENE

Comparative study of various nutrition media for isolation of pathogens from the blood of patients with visceral leishmaniasis

A.E. Salekhov, Sh.N. Aliyeva, F.H. Huseynova, Z.Z. Abseyanova,

S.N. Eyyazli, Sh.N. Janahmadova, E.A. Ismayilova, Sh.M. Babayeva 503

PUBLIC HEALTH, HEALTH ORGANIZATION, SOCIOLOGY OF HEALTH, MEDICAL AND SOCIAL EXPERTISE

Barriers to individual mobility of people with disabilities in modern society

G.V. Zhigunova, Yu.A. Afonkina, E.V. Skalaban 522

Application of foresight technologies in interdepartmental interaction of the region to enhance the efficiency of drug prevention

A.V. Akhokhova, Z.Z. Urusova, M.T. Kubacheva,

M.A. Musukova, I.B. Aidamirova 544

**Artificial intelligence technologies in the healthcare system:
a general overview of potential opportunities and risks***D.A. Belyaev, I.N. Skripkin, M.Y. Smirnov* 567**Determination of risk factors for coronary heart disease
in patients with acute coronary syndrome hospitalized in Krasnoyarsk
Interdistrict Clinical Hospital No. 20***N.V. Aksyutina, T.Yu. Bolshakova, V.V. Kozlov,
A.D. Narozhnaya, A.M. Gridneva, I.A. Demichev, E.N. Kononov* 588**INTERDISCIPLINARY RESEARCH****Assessing the impact of digital transformation
on agricultural performance***A.Yu. Anisimov, P.N. Mashegov, A.E. Trubin, I.O. Trubina* 605**EXPERIENCE OF REGIONS****China's animal-breeding policy in the context of food security
and geoeconomic integration***A.V. Bredikhin, V.N. Zakopyrin, D.I. Izmailova* 627**RULES FOR AUTHORS** 641

Подписано в печать 30.04.2026. Дата выхода в свет 30.04.2026. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 46,74. Тираж 50 экз. Свободная цена. Заказ SJLSA182/026. Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Издательство «Авторская Мастерская» (ИП Давгуненко А.А. ИНН 344210747590). Адрес типографии: ул. Проезд Добролюбова 3 стр. 2, г. Москва, 127254, Россия.