

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

Siberian journal of Life Sciences and Agriculture

SjLSA

www.discover-journal.ru



Volume 17, Number 3
2025

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

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

**Volume 17, Number 3
2025**

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 17, № 3, 2025 / Vol. 17, No 3, 2025

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
Свидетельство регистрации
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, 2025

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)

Рапорт 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)

Рожко Татьяна Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого (Красноярск, 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 Фаилевна, 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 госу-

дарственный 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 Afforestation 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. Gryazkin, Doctor of Biological Sciences, Professor, Saint-Petersburg State Forest Technical

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ainash P. Nauanova, Doctor of Biological Sciences, Professor, S.Seifullin Kazakh AgroTechnical 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 Research 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. Popolzhukhina, 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)

Tatyana V. Rozhko, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V.F. Voyno-Yasenetsky (Krasnoyarsk, 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. Savelyeva, 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, Michurinsk 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

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1273

EDN: BNERMJ

УДК 615:664.66.022.39



Научная статья

**ИЗМЕНЕНИЕ ЛАТЕНТНОГО ПЕРИОДА
БОЛЕВОЙ РЕАКЦИИ КРЫС ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ
ПЕРОРАЛЬНОМ ПРИЕМЕ ПИЩЕВЫХ
КОНЦЕНТРАТОВ «RESVERATROL» И «ЭНОАНТ»**

*Хусаинов Д.Р., Нагаева Е.И., Трибрат Н.С.,
Аудинов И.Д., Туманянц К.Н., Бульхина С.Д.*

Аннотация

Биологический спектр активности природных полифенолов крайне широк: антиоксидантное воздействие, иммуномодулирующее, кардио-протекторное, нейропротекторное, противовоспалительное и целый ряд других эффектов [5; 6]. В научных исследованиях последних лет уделено заметное внимание изучению противоболевого потенциала природных полифенолов, который непосредственно показан в болевых тестах на животных [9].

В настоящем исследовании была поставлена следующая **цель**: сравнить противоболевую активность пищевой добавки с повышенным содержанием природных полифенолов винограда «Эноант» с ресвератролом (концентрат ресвератрола «Resveratrol») и аспирином.

Методы: исследование проведено в два этапа: на первом этапе 40 крыс-самцов линии Wistar возрастом 7,5-8 месяцев делились на 4 группы – «контроль» (10 особей), «аспирин» (10 особей), «ресвератрол» (10 особей) и «эноант» (10 особей). Крысы группы «ресвератрол» употребляли перорально раствор ресвератрола в дозе 20 мг/кг в сутки в течении 30 дней, группы «эноант» – раствор эноанта в дозе 20 мг/кг в сутки в течении

30 дней. На 15-тый и 30-тый дни крысы всех групп тестировались в болевом тесте «Горячая пластина». Аспирин в виде суспензии вводили только в дни тестирования перорально (0,4 мл) с помощью стандартного зонда в дозе 100 мг/кг за 90 минут до регистрации латентного периода болевой реакции в тесте «Горячая пластина».

Для исследования в тесте «Отдергивание хвоста» также было использовано 40 крыс-самцов линии Wistar возрастом 7,5-8 месяцев и все методические приемы соответствовали уже описанным для теста «Горячая пластина».

На втором этапе исследования, мы повторили все описанные исследовательские мероприятия с новыми группами крыс, но с важным отличием: тестирование животных проводилось только на 30-тый день при однократном пероральном введении аспирина в дозе 100 мг/кг группам «Аспирин», «Ресвератрол+Аспирин» и «Эноант+Аспирин» на фоне тридцатидневного приема Ресвератрола и Эноанта.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы GraphPad Prism 8 с использованием критерия Шапиро-Уилка, метода Краскелла-Уоллеса и теста Дана. При парном сравнении был использован критерий Манна-Уитни. Различия считались значимыми при $p < 0,05$.

Показано: тридцатидневный прием ресвератрола и пищевого концентрата «Эноант» в дозе 20 мг/кг приводит к формированию значимого противоболевого эффекта, который по своей выраженности сопоставим с антиноцицептивным влиянием аспирина.

Следовательно, тридцатидневный прием крымского безалкогольного продукта «Эноант» оказывает выраженное обезболивающее воздействие, которое сопоставимо с ресвератролом и аспирином. Значит «Эноант» – это не только источник полифенолов, витаминов, биоэлементов; но и перспективное средство обезболивания, которое может облегчить симптомы хронической боли и повысить качество жизни у людей с подобными проблемами.

Ключевые слова: ресвератрол; Эноант; латентный период болевой реакции; обезболивание; циклооксигеназа

Для цитирования. Хусаинов, Д. Р., Нагаева, Е. И., Трибрат, Н. С., Аидинов, И. Д., Туманянц, К. Н., & Бульхина, С. Д. (2025). Изменение латентного периода болевой реакции крыс при длительном пероральном приеме пищевых концентратов «Resveratrol» и «Эноант». *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 11-30. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1273>

Original article

THE LATENT PERIOD CHANGES IN THE PAIN RESPONSE OF RATS WITH PROLONGED CONSUMPTION OF FOOD CONCENTRATES “RESVERATROL” AND “ENOANT”

*Khusainov D.R., Nagaeva E.I., Tribirat N.S.,
Aidinov I.D., Tumanyantz K.N., Bulhina S.D.*

Abstract

The biological effectiveness of polyphenols is significant, including multiple effects, such as antioxidant, immunomodulatory, cardioprotective, neuroprotective and anti-inflammatory, among others [5; 6]. Recent scientific studies have demonstrated the analgesic potential of natural polyphenols, which was directly shown in pain tests on animals [9]. The **goal** of this study was to compare the analgesic activity of a dietary supplement containing high concentrations of grape polyphenols, such as the food concentrate “Enoant” and the resveratrol with aspirin.

Methods. The study was carried out in two stages. In the first stage, 40 male Wistar rats aged between 7,5 and 8 months were divided into four groups: control (10 rats), aspirin (10 rats), the “resveratrol” (10 rats), and the food concentrate “Enoant” (10 rats). The rats in the resveratrol group were given a solution of resveratrol orally at a dose of 20 mg/kg per day for a period of 30 days. The rats in the food concentrate “Enoant” group were given a corresponding solution orally at the same dose per day for the same period. All groups were tested in the Hot Plate Test on 15 and 30 days. Aspirin (“Merk”, Germany) in the form of a suspension was administered orally only on testing days (0.4 ml) using a standard probe at a dose of 100 mg/kg 90 minutes before recording the latent period of pain response (LPPR) in the “Hot Plate” test.

40 male Wistar rats aged between 7,5 and 8 months were used in Tail Flick Test. The approach and all the methods techniques were corresponded to the Hot Plate Test.

At the second stage of the study, we repeated all the described research activities, but with an important difference: the testing was performed only on the 30th day with oral administration of aspirin at a dose of 100 mg/kg in the groups of the “Aspirin”, “Resveratrol + Aspirin” and “Enoant + Aspirin” groups against the background of thirty-days intake of Resveratrol and Enoant.

Statistical data processing was performed in GraphPad Prism 8, using the Shapiro-Wilk test, the Kruskal-Wallis test and the Dunn's test. The paired comparison used the Mann-Whitney U test. Differences were considered at significant $p < 0,05$.

Results. It was shown that a thirty-day consumption of resveratrol and the food concentrate "Enoant" at a dose of 20 mg/kg resulted in a significant analgesic effect, similar to the analgesic effect of aspirin. Therefore, a thirty-day consumption of the Crimean alcohol-free the food concentrate "Enoant" has a pronounced analgesic action that is similar to that of resveratrol and aspirin. It means that the food concentrate "Enoant" with is rich of polyphenols, vitamins, and bioelements, but also a promising pain reliever that could help alleviate the symptoms of chronic pain and improve the quality of life for people suffering with similar health problems.

Keywords: resveratrol; Enoant; latent period of pain response; anesthesia; cyclooxygenase

For citation. Khusainov, D. R., Nagaeva, E. I., Tribat, N. S., Aidinov, I. D., Tumanyantz, K. N., & Bulhina, S. D. (2025). The latent period changes in the pain response of rats with prolonged consumption of food concentrates "Resveratrol" and "Enoant". *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 11-30. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1273>

Введение

Биологический спектр активности природных полифенолов крайне широк: антиоксидантное воздействие, иммуномодулирующее, кардиопротекторное, нейропротекторное, противовоспалительное и целый ряд других эффектов [5; 6]. В научных исследованиях последних лет уделено заметное внимание изучению противоболевого потенциала природных полифенолов, который непосредственно показан в болевых тестах на животных [9].

Принятым и распространенным в мировой розничной торговой сети является концентрат ресвератрола «Resveratrol», но в естественных продуктах человек получает ресвератрол с целой «палитрой» других полифенолов и иных соединений. Поэтому, использование экстрактов с высоким содержанием полифенолов на основе натурального сырья, таких как «Эноант», представляется более естественным способом диетологической коррекции.

Отмечается, что ресвератрол способен снижать и облегчать болевые ощущения, например, в период постменопаузы у женщин [15]. Также показан противовоспалительный эффект для экстракта полифенолов из виноградной лозы [2] и логично предположить, что эти экстракты будут обладать и противоболевым эффектом. Возможный механизм такого обезболивания – это блокада ЦОГ, которая отмечена для ресвератрола [8; 9].

В связи с этим, в настоящем исследовании была поставлена следующая **цель**: сравнить противоболевую активность пищевой добавки с повышенным содержанием природных полифенолов винограда «Эноант» с ресвератролом (концентрат ресвератрола «Resveratrol») и аспирином.

Методы и принципы исследования

Исследование проведено в два этапа: на первом этапе 40 крыс-самцов линии Wistar возрастом 7,5-8 месяцев делились на 4 группы – «контроль» (10 особей), «аспирин» (10 особей), «ресвератрол» (10 особей) и «эноант» (10 особей). У крыс сформированных групп регистрировалось фоновое (стартовое) значение латентного периода болевой реакции (ЛПБР) в тесте «Горячая пластина» (“Hot Plate” Bioseb, France) по стандартной методике: температура пластины 55°C, болевая реакция – облизывание лап или подпрыгивание, как правило, с яркой вокализацией. Животные группы «контроль» не подвергались каким-либо воздействиям и оставались нативными на протяжении всего эксперимента. Крысы группы «ресвератрол» («Dr. Mercola», США) употребляли перорально раствор ресвератрола в дозе 20 мг/кг в сутки в течении 30 дней, группы «эноант» («РЕССФУД», Россия) – раствор Эноанта в дозе 20 мг/кг в сутки в течении 30 дней. На 15-тый и 30-тый дни крысы всех групп тестировались в болевом тесте «Горячая пластина» по стандартной методике: температура пластины 55°C, болевая реакция – облизывание лап или подпрыгивание, как правило, с яркой вокализацией. Важно отметить, что животные групп «ресвератрол» и «эноант» продолжали получать соответствующие пищевые добавки в дни тестирования. С учетом длительности приема использованных пищевых добавок их употребление организовывалось посредством добавления в питьевую воду. Для этого предварительно в течении пяти дней в группах животных «ресвератрол» и «эноант» замерялся объем употребленной стандартизированной питьевой воды и рассчитывалось его среднее значение. Следует сказать, что результат совпадал с литературными данными [1; 3]: на одну крысу приходилось около 35 мл/сутки и на пять крыс питьевой объем составлял 175 мл/сутки. После в усредненном объеме разводили ресвератрол в дозе 20 мг/кг или Эноант в расчете 20 мг/кг массы полифенолов. Следовательно, суточная доза полифенолов, которую употребляли крысы сопоставима с максимальной для человека – порядка 1 г/сутки [6; 14].

Аспирин (Merk, Германия) в виде суспензии вводили в дни тестирования перорально (0,4 мл) с помощью стандартного зонда в дозе 100 мг/кг за 90

минут до регистрации латентного периода болевой реакции (ЛПБР) в тесте «Горячая пластина». Для смягчения кислотности аспирина суспензия препарата готовилась на основе стандартного раствора Рингера для теплокровных (ООО «Гемотек», Россия). Следует сказать, что всем другим группам крыс за 90 минут перед регистрацией болевой реакции через зонд вводили перорально 0,4 мл раствора Рингера для теплокровных, тем самым унифицируя условия эксперимента для всех исследованных групп животных.

При регистрации ЛПБР в тесте «Горячая пластина» после каждого животного установка тщательно протиралась до суха, выжидалось время до стабилизации температуры платформы на уровне 55°C.

Для исследования в тесте «Отдергивание хвоста» (“Tail flick” Panlab, Spain) также было использовано 40 крыс-самцов линии Wistar возрастом 7,5-8 месяцев и все методические приемы соответствовали уже описанным для теста «Горячая пластина». Отметим то, что фокус светового потока был выставлен на значение 60 единиц от максимального значения 99; а также в предварительном отборе выбраковывались те животные, которые не отдергивали хвост при явном болевом ощущении, а пытались выбраться из фиксирующего пенала. Дополнительно укажем, что для упрощения удаления элементов биологического загрязнения установки под пенал с крысой помещали обычный лист бумаги. Пенал располагался до фиксирующих выступов, животное в пенале помещалось так, чтобы хвост полностью был снаружи. На рисунке 1 наглядно представлены фото животных при регистрации ЛПБР в тестах «Горячая пластина» и «Отдергивание хвоста».

На втором этапе исследования, мы повторили все описанные исследовательские мероприятия, но с важным отличием: тестирование животных проводилось только на 30-тый день при однократном пероральном введении аспирина в дозе 100 мг/кг группам «Аспирин», «Ресвератрол+Аспирин» и «Эноант+Аспирин» на фоне тридцатидневного приема ресвератрола и Эноанта.

На всех этапах эксперимента соблюдались необходимые требования содержания животных по длине светового дня (12/12 часов), температурному режиму (20 – 24 °C), доступности питьевых растворов, для кормления использовался стандартизированный сухой корм ООО «Белгородские корма» ГОСТ 23469-2019, применялся стандартизированный посуточный кукурузный подстил для грызунов от ООО «Зилубаг», животные обитали в стандартных клетках по 5 особей и т.д. Кроме того, поддерживались условия стерильности растворов, зондов, дозаторов, химической посуды и всех других использованных элементов.



«Горячая пластина» Hot plate



«Отдергивание хвоста» Tail flick

Рис. 1. Регистрация латентного периода болевой реакции крыс в тестах «Горячая пластина» и «Отдергивание хвоста».

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы GraphPad Prism 8. Нормальность распределения данных в массивах оценивали с помощью критерия Шапиро-Уилка. На старте исследования (подбор животных и формирование всех групп) в каждом этапе отбирались животные с близкими показателями ЛПБР для обоих тестов, поэтому в начале исследования во всех группах массив данных подчинялся параметрическому распределению, а также между группами отсутствовали статистически значимые отличия по критерию Барлета и дисперсионному анализу с критерием Тьюки. Следовательно, были сформированы группы животных с однотипной болевой реакцией по значению ЛПБР. Далее в эксперименте у ряда групп распределение данных не соответствовало нормальному, поэтому мы использовали непараметрические критерии и численные показатели выражены в виде медианы (Me) и квартилей (Q1 и Q3). Множественный статистический анализ проводили с использованием метода Краскелла-Уоллеса и теста Дана. При парном сравнении был использован критерий Манна-Уитни. Различия считались значимыми при $p < 0,05$.

Основные результаты исследования

На первом этапе исследования, выяснено, что по истечении 15 дней перорального употребления крысами ресвератрола и Энонта ЛПБР в тесте «Горячая пластина» не отличался от контрольного значения, но, при этом, не имел достоверных отличий и от группы «Аспирин» (рис. 2).

ЛПБР группы «Аспирин» составил 9,6 (8,85; 10,88) сек и ожидаемо отличался от контрольного значения 5,55 (4,87; 6,15) сек достоверно при уровне значимости $p < 0,001$.

В тесте «Отдергивание хвоста» ЛПБР после 15 дней перорального употребления крысами ресвератрола и Эноанта, также, не достигал достоверного уровня отличий ни от контроля, ни от группы «Аспирин» (рис. 3). В группе «Аспирин» ЛПБР составлял 6,7 (5,92; 7,71) сек и значительно отличался от контрольных значений 3,8 (2,75; 4,35) при $p < 0,01$.

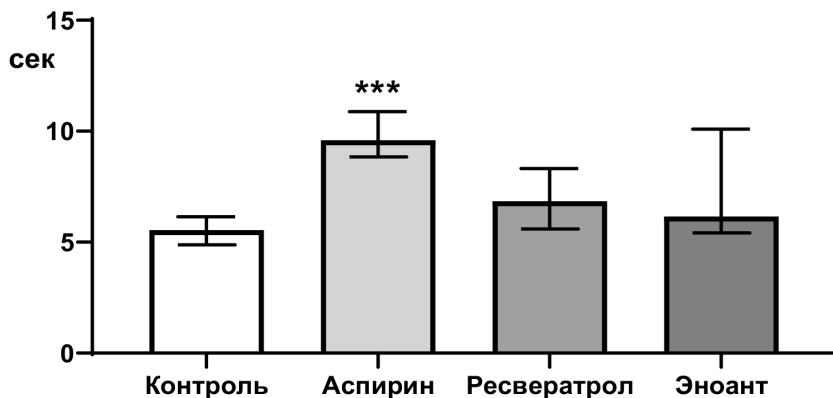


Рис. 2. Значение латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Горячая пластина» на 15-тый день перорального приема Ресвератрола и Эноанта.
Примечания: сек – секунды; представлены медиана и квартили Q1, Q3; Контроль – значение латентного периода болевой реакции крыс в группе «Контроль», Аспирин – в группе «Аспирин», Ресвератрол – в группе «Ресвератрол», Эноант – в группе «Эноант»; *** – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,001$.

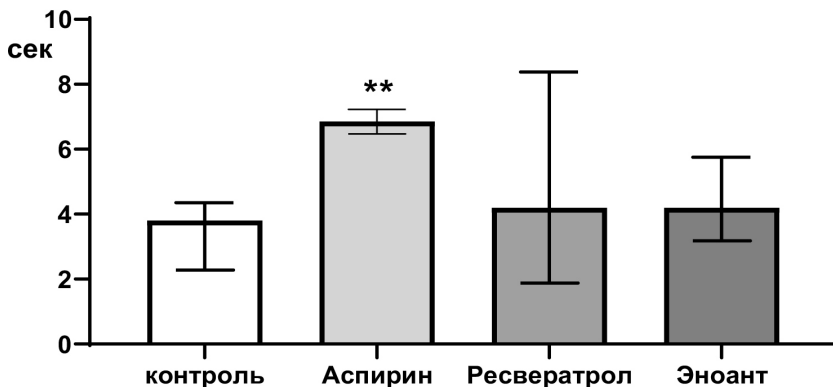


Рис. 3. Значение латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Отдергивание хвоста» на 15-тый день перорального приема Ресвератрола и Эноанта.
Примечания: ** – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,01$; остальные обозначения, что и на рис. 2.

По истечении 30 дней перорального употребления крысами Ресвератрола и Энонта ЛПБР в тесте «Горячая пластина» достигал достоверного уровня отличий в группе «Ресвератрол» и «Энонт» (рис. 4). При этом, ЛПБР увеличивался от 5,65 (5,27; 6,17) сек в контроле до 10,25 (8,05; 14,38) секунды в группе «Ресвератрол» при $p < 0,01$, в группе «Энонт» значение ЛПБР составляло 9,35 (7,7; 10,98) секунды при $p < 0,05$. При сравнении ЛПБР групп крыс «Ресвератрол», «Энонт» и «Аспирин» друг с другом достоверных отличий не выявлено.

Напомним, что мы проводили измерение ЛПБР на 30 день и в группах «Контроль» и «Аспирин». И, очевидно, между этими группами проявлялся достоверный уровень отличий: ЛПБР в группе «Контроль» составлял 5,65 (5,27; 6,17) сек, а в группе «Аспирин» – 9,75 (11,58; 8,17) сек при $p < 0,01$.

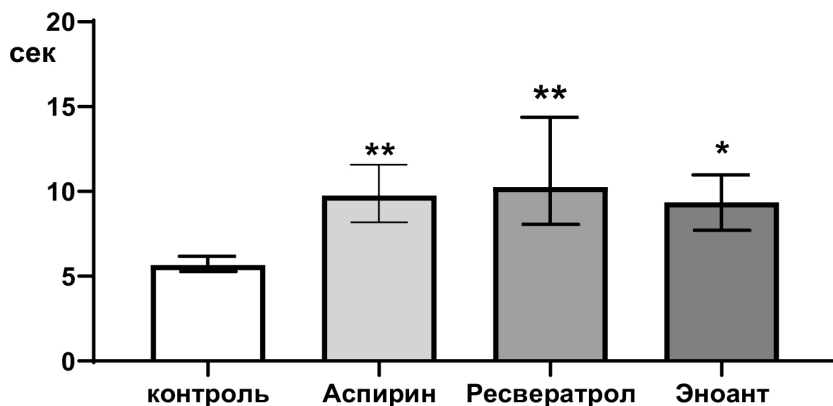


Рис. 4. Значение латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Горячая пластина» на 30-тый день перорального приема Ресвератрола и Энонта. Примечания: ** – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,01$; * – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,05$; остальные обозначения, что и на рис. 2.

В тесте «Отдергивание хвоста» по истечении 30 дней перорального употребления крысами Ресвератрола и Энонта мы наблюдаем схожие эффекты, которые были описаны для теста «Горячая пластина» (рис. 5). Итак, ЛПБР в группе «Ресвератрол» составлял 10,85 (5,75; 14,85) секунды и отличался от контрольных значений 3,70 (2,32; 4,20) при $p < 0,001$. В группе «Энонт» ЛПБР также был более длительным по сравнению с контролем и по медиане равнялся 8,7 (4,52; 12,55) секунды при уровне значимости $p < 0,01$. Также, при сравнении ЛПБР между группами крыс «Ресвератрол», «Энонт» и «Аспирин» достоверных отличий не выявля-

но. При этом, ЛПБР в группе «Аспирин» на 30 день составил 7,8 (6,75; 9,50) секунды, что достоверно превышало латентность болевой реакции контрольных животных при $p < 0,01$.

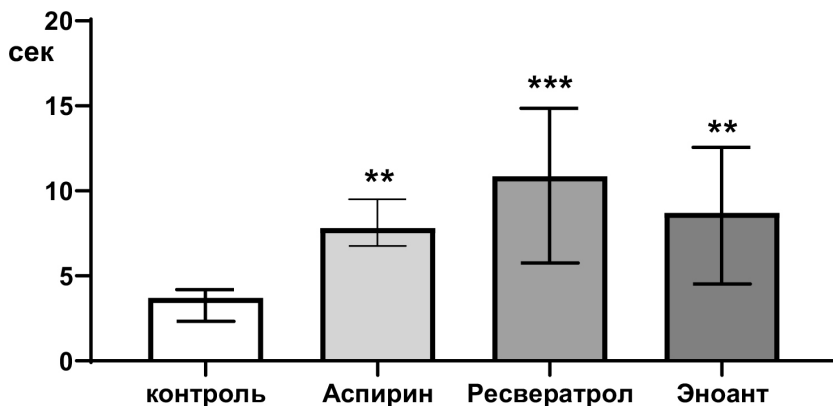


Рис. 5. Значение латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Отдергивание хвоста» на 30-тый день перорального приема Ресвератрола и Эноанта.

Примечания: ** – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,01$; остальные обозначения, что и на рис. 2.

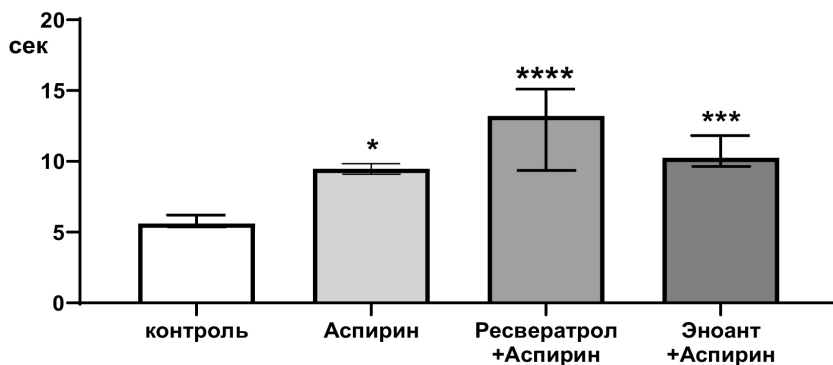


Рис. 6. Значение латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Горячая пластина» при пероральном введении аспирина на фоне тридцатидневного приема Ресвератрола и Эноанта.

Примечания: Ресвератрол+Аспирин – значение латентного периода болевой реакции крыс, которым на тридцатый день приема Ресвератрола перорально вводили аспирин, Эноант+Аспирин – значение латентного периода болевой реакции крыс, которым на тридцатый день приема Эноанта перорально вводили аспирин; **** – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,0001$; *** – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,001$; * – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,05$.

На втором этапе исследования мы регистрировали значение ЛПБР при пероральном введении аспирина на фоне тридцатидневного приема крысами Ресвератрола и Эноанта. На рисунке 6 визуализированы показатели ЛПБР в тесте «Горячая пластина» в контрольной группе его значение составляло 5,6 (5,37; 6,2) секунды, в группе «Аспирин» 9,75 (8,25; 10,4) секунды при $p < 0,05$ по сравнению с контролем; в группе «Ресвератрол+Аспирин» – 13,2 (9,35; 15,1) секунды при $p < 0,0001$ и в группе «Эноант+Аспирин» – 10,25 (9,65; 11,83) секунды при $p < 0,001$.

В тесте «Отдергивание хвоста» ЛПБР в контрольной группе равнялся 3,5 (2,7; 3,62) секунды, в группе «Аспирин» 9,45 (6,37; 10,63) секунды при $p < 0,01$ по сравнению с контролем; в группе «Ресвератрол+Аспирин» – 9,5 (6,85; 11,75) секунды при $p < 0,001$ и в группе «Эноант+Аспирин» – 9,5 (6,87; 12,58) секунды при $p < 0,001$ (рис. 7).

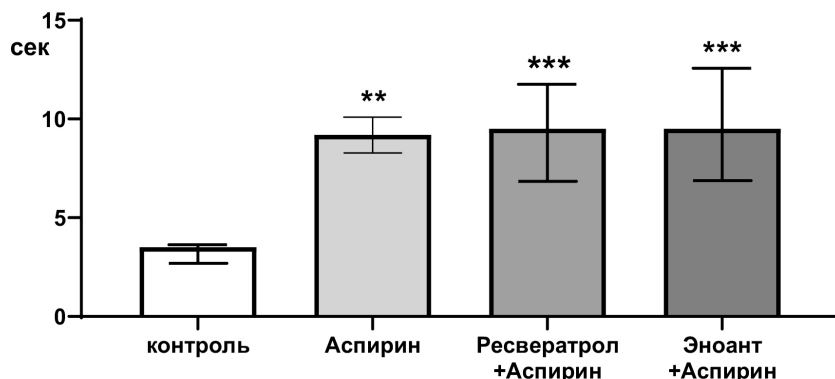


Рис. 7. Значение латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Отдергивание хвоста» при пероральном введении аспирина на фоне тридцатидневного приема Ресвератрола и Эноанта.

Примечания: ** – отличия от значений контрольной группы при $p < 0,01$; остальные обозначения, что и на рис. 6.

При сравнении ЛПБР между группами крыс «Ресвератрол+Аспирин», «Эноант+Аспирин» и «Аспирин», как в тесте «Горячая пластина», так и в тесте «Отдергивание хвоста» достоверных отличий не выявлено.

Отметим, что с применением критерия Манна-Уитни мы провели сравнение ЛПБР между группами «Ресвератрол» – «Ресвератрол+Аспирин» и «Эноант» – «Эноант+Аспирин» и в обоих случаях не выявили достоверных отличий между ЛПБР указанных групп животных.

Обсуждение

Полученные данные позволяют утверждать, что тридцатидневный прием Эноанта в дозе 20 мг/кг приводит к формированию противоболевого эффекта, который по своей выраженности близок к антиноцицептивному влиянию ресвератрола, а также не уступает аспирину.

В ряде исследований противоболевой активности и других эффектов полифенолов и их экстрактов используются достаточно высокие дозы 200 – 400 мг/кг [7, 9], но мы ставили задачу приблизить нашу экспериментальную модель к рекомендациям, которые характерны для человека. Так, обычно полифенолы употребляются несколько десятков дней и максимальной безопасной дозой, например, по ресвератролу является 1 г/сутки [14], допускаются и немного большие дозы [6]. Поэтому, мы и использовали суточную дозу 20 мг/кг, которая в пересчете на человека массой 50 кг составляет 1 г/сутки, массой 70 кг – 1,4 г/сутки. Для полифенолов отмечается накопительный эффект [5], что проявилось и в нашем исследовании на 15 день перорального употребления ресвератрола ЛПБР крыс находился в промежуточном положении: не отличался от группы контроль и группы «Аспирин». На тридцатый день ЛПБР группы крыс «Ресвератрол» становился достоверно более длительным по сравнению с контролем и уравнивался с группой «Аспирин». Аналогичная зависимость отмечена и по ЛПБР группы «Эноант», что указывает на сходный с ресвератролом накопительный эффект.

Опираясь на литературные данные [8; 9; 13] и наш экспериментальный результат мы склонны считать, что основным механизмом антиноцицептивного эффекта ресвератрола и Эноанта является блокада системы ЦОГ. Аргументом в пользу высказанного предположения является следующий экспериментальный факт: динамика ЛПБР в группе «Эноант» не отличается от группы «Ресвератрол» и на тридцатый день не отличается от группы «Аспирин»; при введении аспирина на фоне приема Эноанта ЛПБР, по сути, остался на прежнем уровне. Следовательно, в паре Аспирин-Эноант не проявился эффект функциональной суммации или антагонизма. При этом, идентичные зависимости выявлены и в группе «Ресвератрол». Описанные экспериментальные феномены более вероятны в том случае, когда механизм обезболивания исследованных агентов реализуется через взаимосвязанные или идентичные системы (мишени) и на выраженном уровне эффекта суммация уже невозможна или незначительна, и антагонизм маловероятен. Кроме того, в случае блокады ЦОГ должен проявляться противовоспалитель-

ный эффект, который и отмечен для ресвератрола и полифенольных экстрактов [2; 4].

Дополнительным фактором, который может оказывать влияние на болевое восприятие является изменение психоэмоционального состояния животных. Показано, что ресвератрол обладает антидепрессантной активностью и смягчает стресс индуцированные поведенческие изменения у животных [11; 12], психоэмоциональные эффекты Эноанта описываются в нашей предыдущей публикации [10]. Мы склонны считать, что психоэмоциональные эффекты полифенолов являются вспомогательным фактором, который способен немного усилить противоболевое воздействие.

По результатам настоящего исследования мы предлагаем схему основного вероятного механизма обезболивающего эффекта полифенолов и, в частности, Эноанта (схема 1).

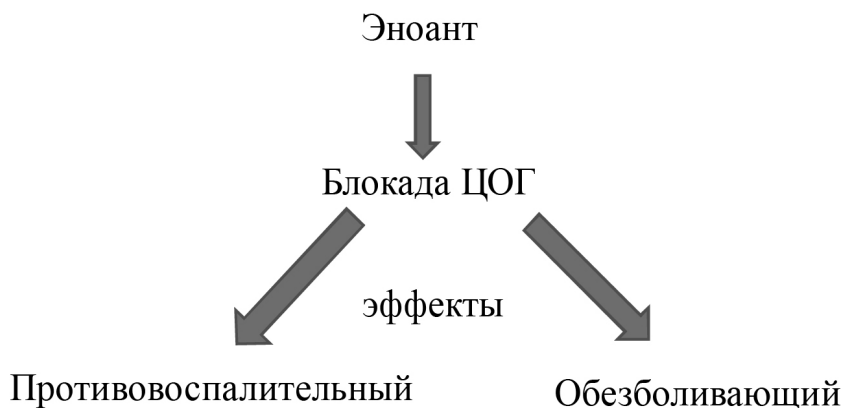


Схема 1. Вероятный механизм эффектов Эноанта.

Подводя итог, заключим следующее: крымский безалкогольный продукт «Эноант» при тридцатидневном приеме оказывает выраженное обезболивающее воздействие, которое сопоставимо с ресвератролом и аспирином. Значит «Эноант» – это не только источник полифенолов, биоэлементов; но и перспективное средство обезболивания, которое может облегчить симптомы хронической боли и повысить качество жизни у людей с подобными проблемами.

Информация о конфликте интересов. Между авторами отсутствует конфликт интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Экспериментальная физиология и биофизика» в рамках инициативной темы № АААА-А21-121011990099-6.

Список литературы

1. Власов, А. А., Чекменёва, В. В., Шаталова, Г. Ю. (2010). Влияние различного рациона питания на питьевой режим у крыс. *Образовательный вестник «Сознание»*, 12(6), 324-325. EDN: <https://elibrary.ru/sgjlkf>
2. Петренко, В. И., Кубышкин, А. В., Фомочкина, И. И., Сорокина, Л. Е., Шевандова, А. А., Черноусова, И. В., Огай, Ю. А. (2020). Исследование противовоспалительного и антидиабетического действия полифенолов винограда на экспериментальной модели метаболического синдрома. *Виноградарство и виноделие*, 49, 243-245. EDN: <https://elibrary.ru/zgggsu>
3. Беляков, В. И., Инюшкина, Е. М., Громова, Д. С., Инюшкин, А. Н. (2021). *Лабораторные крысы: содержание, разведение и биоэтические аспекты использования в экспериментах по физиологии поведения: учебное пособие*. Самара: Издательство Самарского университета. 96 с. ISBN: 978-5-7883-1612-3 EDN: <https://elibrary.ru/mpwuif>
4. Трибрат, Н. С., Румянцева, З. С., Горбунов, А. А., Ибрагимова, М. А., Джелдубаева, Э. Р., Хусаинов, Д. Р., Велишаева, О. В. (2022). Оценка противовоспалительной активности ресвератрола в модели фетровой гранулемы. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*, 8(3), 177-195. EDN: <https://elibrary.ru/hjcmmf>
5. Бобрышева, Т. Н., Анисимов, Г. С., Золоторева, М. С., Бобрышев, Д. В., Будкевич, Р. О., Москалев, А. А. (2023). Полифенолы как перспективные биологически активные соединения. *Вопросы питания*, 92(1), 92-107. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107> EDN: <https://elibrary.ru/hacwfz>
6. Цейликман, В. Э., Лукин, А. А. (2022). Биологическая активность ресвератрола. *Международный научно-исследовательский журнал*, 4-2(118), 131-136. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.095> EDN: <https://elibrary.ru/fdoxme>
7. Magaji, M. G., Iniaghe, L. O., Abolarin, M., Abdullahi, O. I., Magaji, R. A. (2017). Neurobehavioural evaluation of resveratrol in murine models of anxiety and schizophrenia. *Metab Brain Dis*, 32(2), 437-442. <https://doi.org/10.1007/s11011-016-9927-6> EDN: <https://elibrary.ru/aoapmw>
8. Calamini, B., Ratia, K., Malkowski, M. G., Cuendet, M., Pezzuto, J. M., Santarsiero, B. D., Mesecar, A. D. (2010). Pleiotropic mechanisms facilitat-

- ed by resveratrol and its metabolites. *Biochem J*, 429(2), 273-282. <https://doi.org/10.1042/BJ20091857>
9. Ahmed, S., Ahmed, K. S., Rahman, M. N., Hossain, H., Han, A., Geng, P., Daula, A. F. M. S. U., & Mamun, A. A. (2024). Polyphenols and extracts from *Zingiber roseum* (Roxb.) Roscoe leaf mitigate pain, inflammation and pyrexia by inhibiting cyclooxygenase-2: an in vivo and in silico studies. *Front. Pharmacol.*, 15, 1344123. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1344123> EDN: <https://elibrary.ru/zqafac>
 10. Khusainov, D. R., Tribat, N. S., Lukyantseva, A. N., Chuyan, E. N., Biryukova, E. A., Dzheldubaeva, E. R., Ablyakimova, V. L., & Verhoturov, N. (2021). Psychoactive effects of “Enoant” and “Resveratrol” in Wistar rats of both sexes. *BIO Web of Conferences*, 40, 02009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20214002009> EDN: <https://elibrary.ru/veftq>
 11. Ardianto, C., Budiatin, A. S., Sumartha, I. N. B., Nurrahmi, N., Rahmadi, M., & Khotib, J. (2021). Resveratrol ameliorates physical and psychological stress-induced depressive-like behavior. *J Basic Clin Physiol Pharmacol*, 32(4), 335-340. <https://doi.org/10.1515/jbcpp-2020-0437> EDN: <https://elibrary.ru/zhdhrhi>
 12. Zarebavani, M., Baghaei Naeini, F., Farahvash, A., Moradi, F., & Dashti, N. (2023). Resveratrol attenuates chronic social isolation stress-induced affective disorders: Involvement of NF- κ B/NLRP3 axis. *J Biochem Mol Toxicol*, 37(5), e23311. <https://doi.org/10.1002/jbt.23311> EDN: <https://elibrary.ru/vxmjrj>
 13. Pignet, A. L., Schellnegger, M., Hecker, A., Kohlhauser, M., Kotzbeck, P., & Kamolz, L. P. (2021). Resveratrol-Induced Signal Transduction in Wound Healing. *Int. J. Mol. Sci.*, 22, 12614. <https://doi.org/10.3390/ijms222312614> EDN: <https://elibrary.ru/ziuchj>
 14. Wang, F., & Chatterjee, S. (2017). Dominant carbons in trans- and cis-resveratrol isomerization. *J. Phys. Chem.*, 121(18), 4745-4755. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02115> EDN: <https://elibrary.ru/yfenaj>
 15. Wong, R. H., Evans, H. M., & Howe, P. R. (2017). Resveratrol supplementation reduces pain experience by postmenopausal women. *Menopause*, 24(8), 916-922. <https://doi.org/10.1097/GME.0000000000000861>

References

1. Vlasov, A. A., Chekmenyova, V. V., Shatalova, G. Yu. (2010). Influence of different diets on drinking regimen in rats. *Educational Bulletin “Consciousness”*, 12(6), 324-325. EDN: <https://elibrary.ru/sgjlkf>
2. Petrenko, V. I., Kubyskhin, A. V., Fomochkina, I. I., Sorokina, L. E., Shevandova, A. A., Chernousova, I. V., Ogay, Yu. A. (2020). Study of anti-inflamma-

- tory and anti-diabetic effects of grape polyphenols in an experimental model of metabolic syndrome. *Viticulture and Winemaking*, 49, 243-245. EDN: <https://elibrary.ru/zgggsu>
3. Belyakov, V. I., Inyushkina, E. M., Gromova, D. S., Inyushkin, A. N. (2021). *Laboratory rats: maintenance, breeding and bioethical aspects of use in behavioral physiology experiments: textbook*. Samara: Samara University Publishing House, 96 p. ISBN: 978-5-7883-1612-3 EDN: <https://elibrary.ru/mpwuif>
 4. Tribat, N. S., Rumyantseva, Z. S., Gorbunov, A. A., Ibragimova, M. A., Dzheldubaeva, E. R., Khusainov, D. R., Velishaeva, O. V. (2022). Evaluation of anti-inflammatory activity of resveratrol in a felt granuloma model. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 8(3), 177-195. EDN: <https://elibrary.ru/hjcmmf>
 5. Bobrysheva, T. N., Anisimov, G. S., Zolotoreva, M. S., Bobryshev, D. V., Budkevich, R. O., Moskalev, A. A. (2023). Polyphenols as promising biologically active compounds. *Voprosy Pitania*, 92(1), 92-107. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107> EDN: <https://elibrary.ru/hacwzf>
 6. Tseilikman, V. E., Lukin, A. A. (2022). Biological activity of resveratrol. *International Research Journal*, 4-2(118), 131-136. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.095> EDN: <https://elibrary.ru/fdoxme>
 7. Magaji, M. G., Iniaighe, L. O., Abolarin, M., Abdullahi, O. I., Magaji, R. A. (2017). Neurobehavioural evaluation of resveratrol in murine models of anxiety and schizophrenia. *Metab Brain Dis*, 32(2), 437-442. <https://doi.org/10.1007/s11011-016-9927-6> EDN: <https://elibrary.ru/aoapmw>
 8. Calamini, B., Ratia, K., Malkowski, M. G., Cuendet, M., Pezzuto, J. M., Santarsiero, B. D., Mesecar, A. D. (2010). Pleiotropic mechanisms facilitated by resveratrol and its metabolites. *Biochem J*, 429(2), 273-282. <https://doi.org/10.1042/BJ20091857>
 9. Ahmed, S., Ahmed, K. S., Rahman, M. N., Hossain, H., Han, A., Geng, P., Daula, A. F. M. S. U., & Mamun, A. A. (2024). Polyphenols and extracts from *Zingiber roseum* (Roxb.) Roscoe leaf mitigate pain, inflammation and pyrexia by inhibiting cyclooxygenase-2: an in vivo and in silico studies. *Front. Pharmacol.*, 15, 1344123. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1344123> EDN: <https://elibrary.ru/zqafac>
 10. Khusainov, D. R., Tribat, N. S., Lukyantseva, A. N., Chuyan, E. N., Biryukova, E. A., Dzheldubaeva, E. R., Ablyakimova, V. L., & Verhoturov, N. (2021). Psychoactive effects of “Enoant” and “Resveratrol” in Wistar rats of both sexes. *BIO Web of Conferences*, 40, 02009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20214002009> EDN: <https://elibrary.ru/vefttq>

11. Ardianto, C., Budiatin, A. S., Sumartha, I. N. B., Nurrahmi, N., Rahmadi, M., & Khotib, J. (2021). Resveratrol ameliorates physical and psychological stress-induced depressive-like behavior. *J Basic Clin Physiol Pharmacol*, 32(4), 335-340. <https://doi.org/10.1515/jbcpp-2020-0437> EDN: <https://elibrary.ru/zhdrhi>
12. Zarebavani, M., Baghaei Naeini, F., Farahvash, A., Moradi, F., & Dashti, N. (2023). Resveratrol attenuates chronic social isolation stress-induced affective disorders: Involvement of NF- κ B/NLRP3 axis. *J Biochem Mol Toxicol*, 37(5), e23311. <https://doi.org/10.1002/jbt.23311> EDN: <https://elibrary.ru/vxmjrf>
13. Pignet, A. L., Schellnegger, M., Hecker, A., Kohlhauser, M., Kotzbeck, P., & Kamolz, L. P. (2021). Resveratrol-Induced Signal Transduction in Wound Healing. *Int. J. Mol. Sci.*, 22, 12614. <https://doi.org/10.3390/ijms222312614> EDN: <https://elibrary.ru/ziuchj>
14. Wang, F., & Chatterjee, S. (2017). Dominant carbons in trans- and cis-resveratrol isomerization. *J. Phys. Chem.*, 121(18), 4745-4755. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02115> EDN: <https://elibrary.ru/yfenaaj>
15. Wong, R. H., Evans, H. M., & Howe, P. R. (2017). Resveratrol supplementation reduces pain experience by postmenopausal women. *Menopause*, 24(8), 916-922. <https://doi.org/10.1097/GME.0000000000000861>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Хусаннов Денис Рашидович, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры физиологии человека и животных и биофизики, Институт биохимических технологий, экологии и фармации
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
пр-т Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
gangliu@yandex.ru

Нагаева Елена Ивановна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры теории и методики физической культуры, факультет медицинской реабилитации, физической культуры и спорта, Ордена Трудового Красного Знамени Медицинский институт имени С. И. Георгиевского
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
пр-т Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
enagaeva75@mail.ru

Трибрат Наталья Сергеевна, кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедры нормальной физиологии, Международный медицинский факультет, Ордена Трудового Красного Знамени Медицинский институт имени С. И. Георгиевского
*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»
пр-т Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
tribratnatalia@rambler.ru*

Аидинов Ислям Джевдетович, обучающийся 1 курса аспирантуры, кафедра физиологии человека и животных и биофизики, Институт биохимических технологий, экологии и фармации
*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»
пр-т Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
aidinov20022@mail.ru*

Туманянц Карине Николаевна, кандидат биологических наук, доцент, директор ЦКП «Экспериментальная физиология и биофизика», кафедра физиологии человека и животных и биофизики, Институт биохимических технологий, экологии и фармации
*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»
пр-т Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
tumanyantsk@gmail.com*

Бульхина Суфия Джавдатовна, обучающаяся 1 курса магистратуры, кафедра физиологии человека и животных и биофизики, Институт биохимических технологий, экологии и фармации
*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»
пр-т Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
sofa.baykova@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Denis R. Khusainov, PhD Biol., Associate Professor, Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy

V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
gangliu@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0974-6792>
Scopus Author ID: 14056388900
ResearcherID: AAU-3667-2020
SPIN-code: 4922-3478

Elena I. Nagaeva, PhD Biol., Associate Professor, Department of Theory and Methodology of Physical Education, Faculty of Medical Rehabilitation, Physical Education and Sport
V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
enagaeva75@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0192-1752>
Scopus Author ID: 57203528872
ResearcherID: ABC-7742-2021
SPIN-code: 9351-1709

Natalya S. Tribirat, PhD Biol., Head of the Department of Normal Physiology, International Faculty of Medicine
V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
tribratnatalia@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6800-1419>
Scopus Author ID: 57190817496
ResearcherID: AAU-7523-2021
SPIN-code: 6248-2331

Islyam D. Aidinov, 1st year postgraduate student, Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy
V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
aidinov20022@mail.ru

Karine N. Tumanyantz, PhD Biol., Director of the Centre for Collective Use «Experimental Physiology and Biophysics», Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
tumanyantsk@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4293-6136>
Scopus Author ID: 36769525600
ResearcherID: A-5328-2017*

Sufiya D. Bulkina, 1st year Master's student, Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4, Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
sofa.baykova@mail.ru*

Поступила 31.01.2025

После рецензирования 01.04.2025

Принята 30.04.2025

Received 31.01.2025

Revised 01.04.2025

Accepted 30.04.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1265

EDN: BGDWZP

UDC 616.61-006.6:615.28:579.84



Original article

THE EFFECT OF *LALLEMANTIA ROYLEANA* SEEDS EXTRACT IN MODIFYING THE INFLAMMATORY RESPONSE AND BAX PROTEIN EXPRESSION IN THE KIDNEY TISSUE OF ALBINO MICE THAT TREATED WITH RIFADIN

Z.T.S. Al-Asady, I.M. Manti, G.A. Al-Bairuty, I.S. Al-Jumaily

Abstract

Background. It has become known that the repeated use of therapeutic drugs for some medical conditions is accompanied by the appearance of side effects from these drugs, so many have resorted to using alternative medicine to treat some diseases or to reduce the symptoms of the disease due to the effective substances that herbs and medicinal plants contain.

Purpose. The aim of this study is to examine the effects of *Lallemantia royleana* (Balangu) seed extract in modifying the inflammatory response and BAX protein expression as a marker of cell death after treatment with Rifadin.

Materials and methods. Twenty-four Swiss albino mice, 5 weeks old, were divided into four groups: 1) control group treated with normal saline, 2) group treated with 1.5 mg/kg/day Rifadin, 3) group treated with *Lallemantia royleana* (Balangu) seed extract, 4) group treated with *Lallemantia royleana* seed extract and Rifadin. After 30 days, the animals were sacrificed, the kidneys were collected, and placed in a 10% formalin fixative. Slides were prepared for histological examination and to detect the expression of BAX protein by IHC technique.

Results. The results showed , there are many pathological and inflammatory changes in group treated with Rifadin (1.5mg/kg/day) compared with control group, these changes represented by severe congestion of blood vessels and hemorrhage in cortex and medulla regions of kidney with appearance of fibrosis and infiltration of leukocytes .in the group that treated with *Lallemantia royleana* seeds extract there was no disintegration observed in the kidney's tissue with moderate congestion and hemorrhage, while there was moderate disintegration in the kidney tissue with mild to moderate congestion , hemorrhage and leukocytes infiltration in albino mice that treated with Rifadin and *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds extract together. The

expression of BAX protein ranged from strong, mild, moderate immune reaction between the groups respectively compared with the control group.

Conclusion. The conclusion of this research is that the alcoholic extract of *Lallemantia royleana* seeds plays an effective and protective role in safeguarding kidney tissue from the harmful effects of Rifadin.

Keywords: kidney; Rifadin; *Lallemantia royleana*; BAX protein; inflammatory response

For citation. Al-Asady, Z. T. S., Manti, I. M., Al-Bairuty, G. A., & Al-Jumaily, I. S. (2025). The effect of *Lallemantia royleana* seeds extract in modifying the inflammatory response and BAX protein expression in the kidney tissue of albino mice that treated with Rifadin. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 31-42. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1265>

Introduction

Rifadin, also called Rifampicin, Rifampin, and Rifaldazine [1], is a bacterial antibiotic used in the treatment of tuberculosis (TB), which is caused by *Mycobacterium tuberculosis*. Rifadin has the molecular formula $C_{43}H_{58}N_4O_{12}$ and a molecular weight of 822.59, with the synthetic formula being 3-4 (4-methyl piperazinyl-imino methylene) [2]. Rifampicin inhibits microbial RNA polymerase and prevents the synthesis of ribonucleic acid in bacterial cells [3]. Several studies have indicated the relationship between Rifadin and the toxicity of various organs, such as the spleen, bones, blood, reproductive organs, liver, and kidneys [4, 5, 6]. Other studies have indicated that 66% of patients treated with anti-tuberculosis drugs suffer from acute kidney failure [7], and the combination of isoniazid and Rifadin has been shown to cause kidney dysfunction [8] and oxidative damage [9].

Studies have shown that plant extracts can protect against diseases and have a positive impact on health, such as inducing antioxidant enzymes [10]. *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds possess numerous pharmacological properties, including antioxidant, antidepressant, antiemetic, hypolipidemic, antimicrobial, and sedative properties [11]. The seeds of *Lallemantia royleana* are utilized in alternative medicine as a treatment for stomach diseases [12], cough suppression, urinary tract troubles, abscesses, and infections. The alcoholic extract of the seeds of *Lallemantia royleana* has shown antibacterial properties against bacterial strains such as *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Enterobacter cloacae*, according to Sardarodiyani et al. [13]. The seeds of *Lallemantia royleana* (Balangu) contain green oil, which consists of a group of fatty acids, including linolenic acid, oleic acid, and palmitic acid [14].

The aim of the study: The aim of this study is to examine the effects of *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds extract in modifying the inflammatory response and BAX protein expression as a marker of cell death in albino mice treated with Rifadin.

Materials and methods

The extraction of Balangu seeds:

The *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds were obtained from the local market and ground until a powder was obtained. A sexual apparatus and 95% methanol were used to prepare a 1% weight/volume (50/500) oily extract of Balangu seeds with a clear green color [15].

The experiments steps:

This study included 24 male Swiss albino mice, 5 weeks old, with a weight range of 27 g. The mice were divided into four groups, with 6 animals in each group:

1. Control group, which was orally administered with 0.1 ml of normal saline (0.09%) for 30 days.
2. Group treated with 0.1 ml of Rifadin drug (1.5 mg/kg/day) for 30 days.
3. Group treated with 0.1 ml of *Lallemantia royleana* seeds extract (1%) for 30 days.
4. Group treated with 0.1 ml of *Lallemantia royleana* seeds extract (1%) and 0.1 ml of Rifadin drug (1.5 mg/kg/day) for 30 days. [16].

The histological slides preparation:

After 30 days, the animals were sacrificed. The kidneys were collected and placed in fixative (formalin 10%). The histological preparations, which included dehydration, clearing, infiltration, embedding, mounting on glass slides, and staining with H&E, were based on Suvarna et al. [17]. In the Immunohistochemical (IHC) study, the positively charged slides were used instead of normal glass slides for the mounting process, and the slides were treated with a special kit to detect Bax protein (SANTA CRUZ, USA) based on the process of Taylor and Rudbeck [18]. The BAX expression was evaluated by scoring 1000 cells randomly for each group sample to calculate the percentage of BAX using the following equation:

BAX expression (%) = (number of cells with BAX positive) / (total cells, i.e., cells positive with BAX + cells negative).

The statistical analysis was performed using SPSS. A comparison was made between the treated groups and the control group, and between the groups themselves, using One-Way ANOVA. The results were considered statistically significant at $P < 0.05$.

Results and discussion

Control group

Histological sections of this group appeared with a normal histological structure, represented by a kidney surrounded by a capsule consisting of loose connective tissue. It is differentiated into an outer region called the cortex, which contains renal corpuscles and sections of proximal and distal convoluted tubules, and an inner region called the medulla, which showed sections of thick and thin segments of Henle's loop as well as sections of collecting ducts (Fig. 1).

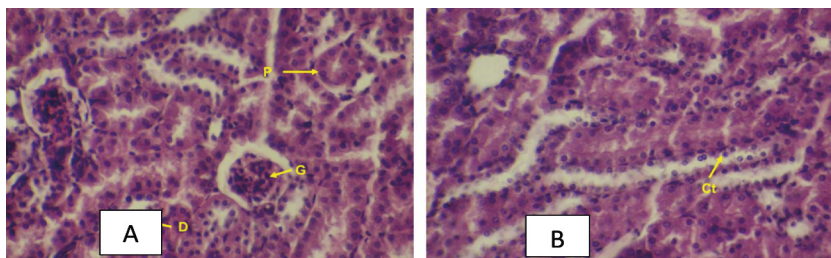


Fig. 1. A - Cross section of the kidney in the control group showed cortex components such as the proximal convoluted tubule. B - Cross section of the kidney in the control group showed the collecting tubule (Ct) in the medulla region, proximal convoluted tubule (P), distal convoluted tubule (D), glomeruli (G), and collecting tubule (Ct) H&E. (X 40).

Group administered with Rifadin 1.5mg/kg/day

The examination of kidney sections of male mice administered with 1.5 mg/kg/day of Rifadin for 30 days revealed many pathological and inflammatory changes compared with the control group (Fig. 1). These changes were represented by severe congestion of blood vessels and hemorrhage in the cortex region, extending into the medulla region. There were also very clear vacuoles in the renal tubules, especially in the area near the capsule, as well as clear disintegration in the tissue in both the cortex and medulla regions. Additionally, some renal glomeruli were lost, while others showed shrinkage or contraction. There was the appearance of fibrosis, infiltration of leukocytes between the renal tubules, and edema with the expansion of the lumen or cavities of the renal tubules (Fig. 2).

The severe congestion occurred as a result of tissue cell damage and death, which stimulates an inflammatory response due to the infiltration of white blood cells to remove and clean the tissue from the damaged cells [20]. This was observed in this study, where there was an infiltration of white blood cells in the areas between the urinary tubules in the kidney tissue in animals treated with

Rifadin (1.5 mg/kg/day). Previous studies have shown that drugs induce damage in kidney tissue at the glomerular, tubular, or interstitial levels [21]. These damages resulting from the effect of the drug may induce oxidative stress [22], as well as mitochondrial dysfunction due to the increased concentration of calcium ions, which leads to the removal of ATP, causing cell death [23]. The results of this study showed the presence of vacuoles in the tissue, especially in the cortex area adjacent to the renal capsule in animals treated with Rifadin. The presence of vacuoles resulted from the accumulation of fats in the cells and inhibition of fat metabolism and oxidation, which resulted from the generation of free radicals and a decrease in ATP levels due to the destruction of mitochondria [24]. The loss of glomeruli in the renal corpuscles and shrinkage of others resulted from the kidney's behavior to prevent the drug from reaching the bloodstream and limiting its harmful effects [25]. Miller et al. [26] indicated that daily or intermittent treatment with Rifadin is responsible for causing acute renal failure, which develops into chronic failure in patients treated with this drug.

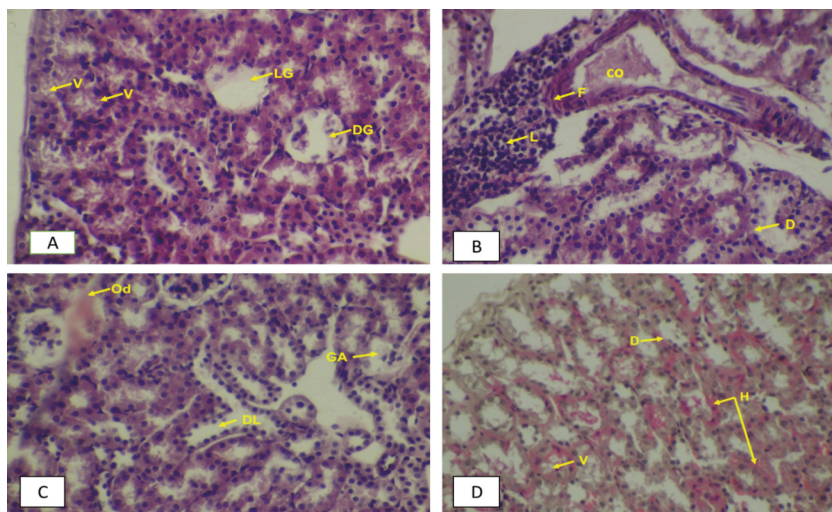


Fig. 2. Cross-section of the kidney in the group administered with 1.5 mg/kg/day Rifadin showed: A. Very clear vacuoles (V) in the renal tubules near the capsule, loss of glomeruli (LG), and damage (DG) to some renal glomeruli. B. Fibrosis and infiltration of leukocytes (L) between the renal tubules, as well as degeneration of the epithelium lining the renal tubules (D). C. Dilatation of the lumen in renal tubules (DL) and glomerular atrophy (GA), as well as edema (OD). D. Hemorrhage in the cortex region reaching the medulla region (H), vacuoles (V), and renal tubule degeneration (D). Stained with H&E (40X).

Group administrated with alcoholic extract (1%) of *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds

The structure of the kidney tissue in this group appears similar to the normal structure of the control group in terms of the lack of disintegration of the kidney tissue and differentiation of the tissue into the cortex and medulla regions. Also, vacuoles, moderate congestion, and minimal hemorrhage between the renal tubules in the cortex and medulla regions were observed. No edema was observed with moderate infiltration, while no such changes were observed in the kidney tissue of the control group (Fig. 3).

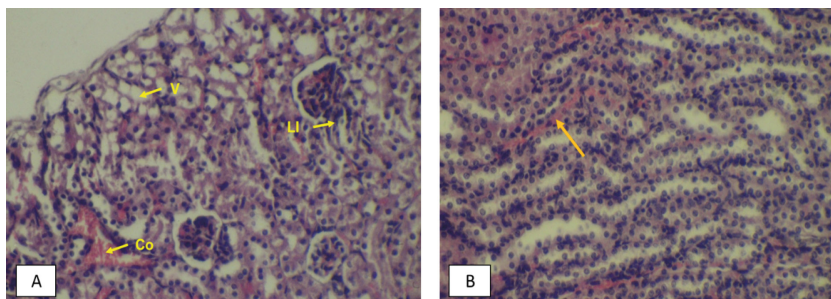


Fig. 3. Cross-section of the kidney in the group administered with 1% alcoholic extract of *Lallemantia royleana* seeds showed: A - vacuoles (V), blood vessel congestion (Co), leukocyte infiltration (LI) in the cortex region; B- hemorrhage () between renal tubules in the medulla region. Stained with H&E. (40X).

The decrease in the histological changes in this group is due to the active components of *Lallemantia royleana* seeds extract, such as linoleic acid (Omega 3), in addition to its content of alkaloids, polyphenols, flavonoids, and tannins, which represent effective antioxidants that protect cells from the harmful effects of free radicals [27]. The presence of moderate congestion in the kidney tissue of this group and the subsequent infiltration of white blood cells may have resulted from the effect of the active components in the extract, which stimulate the release of inflammatory cytokines such as TNF- α and attract neutrophils and lymphocytes from peripheral blood [25].

Group administrated with alcoholic extract of *Lallemantia royleana* seeds (1%) and Rifadin (1.5 mg/kg/day)

The results of the microscopic examination of the kidney sections of this group showed moderate disintegration within the kidney tissue between the cortex and medulla regions, with congestion of blood vessels and slight hemorrhage in the cortex region. Additionally, there was an expansion of the lumen

of some proximal and distal convoluted tubules and the appearance of clear hemorrhage within the renal glomeruli, compared with the kidney tissue in the control group.

In contrast to the group of mice given just Rifadin, this group had moderate infiltration of leukocytes and a lack of damaged cells within the kidney tissue (Fig. 4).

The decrease in the pathological changes in the kidney tissue of this group may be due to the active components of the seed extract, like linoleic acid and phenols, which in turn have a role in raising the level of glutathione. This enhances drug metabolism and removes oxidative stress by converting free radicals into non-toxic substances, protecting the cells from the harmful effects of the drug [27].

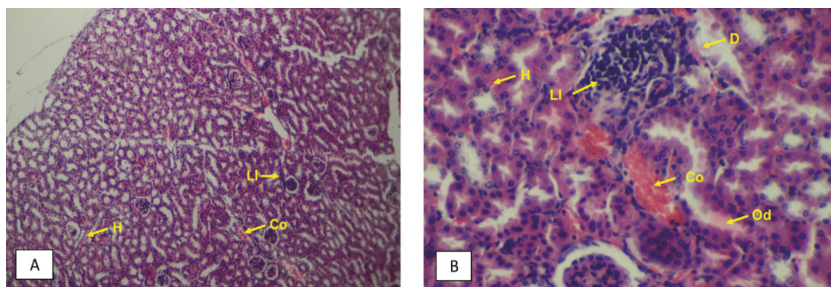


Fig. 4. Cross section of the kidney in the group administered with alcoholic extract of 1% Balangu seeds and 1.5 mg/kg/day Rifadin showed: A - Disintegration within the kidney tissue between the cortex and medulla regions with congestion (Co) of blood vessels and a little hemorrhage (H) between tubules in the cortex region, as well as leukocyte infiltration (LI). Stained with H&E (10x). B - Blood vessel congestion (Co), edema (Od), a little hemorrhage (H) between renal tubules, degeneration of renal tubules (D), and moderate infiltration of leukocytes (LI). Stained with H&E (40x).

The expression of BAX protein in the tissue of kidney

The results of microscopic examination of kidney tissue stained by IHC technique for detecting the expression of BAX protein, which predisposes the process of cell death, revealed a strong positive immune reaction in cells with BAX protein in the group of mice treated with Rifadin (1.5 mg/kg/day) compared with the other experimental groups. Meanwhile, the results showed a mild positive immune reaction to BAX protein in the group of mice treated with the alcoholic extract of *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds (1%) and Rifadin (1.5 mg/kg/day) together compared to the Rifadin-only group. The results also

showed moderate or low positive immune reaction to BAX protein in the control group and the group of mice treated with the alcoholic extract of *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds (1%) (Fig. 5).

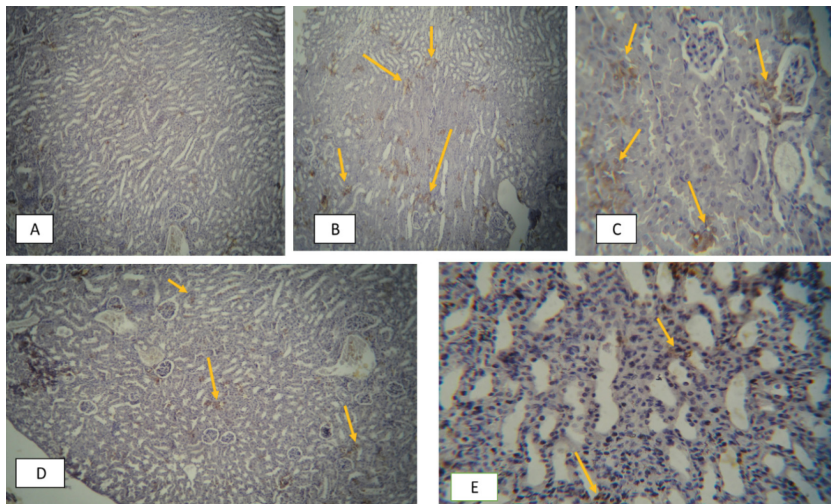


Fig. 5. Cross sections of the kidney in albino mice show the positive reaction of BAX protein: A - Control group (10x). B - Strong positive reaction of BAX in the group treated with Rifadin (10x). C - Strong positive reaction of BAX in the group treated with Rifadin (40x). D - Mild positive reaction in the group treated with Rifadin and the seeds extract of *Lallemantia royleana* (10x). E - Moderate positive reaction in the group treated with the seeds extract of *Lallemantia royleana* (40x). Area colored with DAB chromogen.

The high expression of BAX protein resulted from the effect of Rifadin, which enhances cell death, especially with multiple doses, by stimulating the release of cytochrome P450, formation of free radicals, destruction of mitochondria with the release of cytochrome C, and activation of the Caspase-3 pathway, which causes cell death [28].

The percentage of BAX protein expression showed a significant increase ($P < 0.05$) in the BAX expression percentage in the group of mice treated with Rifadin (1.5 mg/kg/day), which reached 13.200 ± 0.78 compared with other groups (control, the group treated with the seeds extract, the group treated with the seeds extract and the drug together), which had percentage values of (3.401 ± 0.11 , 5.344 ± 0.60 , 8.203 ± 0.30) % respectively. The results showed a non-significant increase in the percentage of expression between the control

group and the group treated with the seeds extract, while there was a significant increase ($P < 0.05$) between the group treated with the seeds extract and the group treated with the seeds extract and Rifadin together (Table-1). The decrease in the percentage of BAX expression in the kidney tissue of animals treated with both the drug and extract together, and extract alone, was consistent with the results of histological examination of the kidney in these groups. The extract of *Lallemantia royleana* seeds contains a mixture of active compounds that work synergistically to remove oxidative stress, neutralizing free radicals and protecting cells from entering the death pathway [29].

Table 1.

The percentage of BAX expression ($\% \pm SD$) in the kidney tissue of experimental groups

Experiment groups	BAX protein expression ($\% \pm SD$)
Control	3.401 $\pm$ 0.11
Rifadin drug(1.5 mg/kg/day)	13.200 $\pm$ 0.78**
(<i>Lallemantia royleana</i>) seeds extract (1%)	5.344 $\pm$ 0.60
(<i>Lallemantia royleana</i>) seeds extract (1%) and Rifadin drug(1.5 mg/kg/day)	8.203 $\pm$ 0.30*

*Significant at $p < 0.05$

Conclusion

Thus, the conclusion of this study is that the protective effect of the alcoholic extract of *Lallemantia royleana* (Balangu) seeds against the harmful effects of Rifadin is demonstrated by a decrease in inflammation signs, tissue damage, and the expression of BAX protein, which indicates a reduction in the number of cells undergoing death.

Acknowledgements. This work was completed with the cooperation of the authors and without any support.

Conflict of interest information. None declared.

References

1. McHugh, T. D. (2013). *Tuberculosis laboratory diagnosis and treatment strategies*. London, UK: CAB International. 283 p. <https://doi.org/10.1079/9781845938079.0000>
2. Grayson, M. L., Crowe, S. M., McCarthy, J. S., Mills, J., Mouton, J. W., Norrby, S. R., Paterson, D. L., & Pfaller, M. A. (2010). *Kucers The Use of Antibiotics: A*

- Clinical Review of Antibacterial, Antifungal, Antiparasitic, and Antiviral Drugs.* USA: Taylor & Francis Group, LLC. 6th ed. 3049 p.
3. Eriksson, H. K., Lazarinis, S., Järhult, J. D., & Hailer, N. P. (2023). Early Staphylococcal Periprosthetic Joint Infection (PJI) Treated with Debridement, Antibiotics, and Implant Retention (DAIR): Inferior Outcomes in Patients with Staphylococci Resistant to Rifampicin. *Antibiotics Basel*, 12(11), 1589. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12111589> EDN: <https://elibrary.ru/uhdkfp>
 4. Peters, D. E., & Chike, A. O. (2013). Effect of Rifampicin on the Kidney of Albino Rats. *Appl. Sci. Environ*, 17(1), 125-151.
 5. Abdulhussein, M. F., & Al-Asady, Z. T. S. (2020). Hepatoprotective Effect of Lallelantia Royleana Seeds Extract Against the Toxicity of Rifadin Through Reduction of BAX Expression in Liver Tissue of Albino Mice. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1660, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1660/1/012012> EDN: <https://elibrary.ru/ykjfbn>
 6. Muna, S. R., & Israa, A. M. (2021). Histological Effect of Rifamicin Drug in the Kidney and Liver Tissue of Albino Mice Mus Musculus. *Tikrit J. of Pure Sci.*, 26(6), 14-22. <https://doi.org/10.25130/tjps.v26i6.188>
 7. Kohli, H. S., Bhaskaran, M. C., Muthukumar, T., Thennarasu, K., Sud, K., Jha, V., et al. (2000). Treatment-Related Acute Renal Failure in the Elderly: A Hospital-Based Prospective Study. *Nephrol Dial Transplant.*, (15), 212-217. <https://doi.org/10.1093/ndt/15.2.212> EDN: <https://elibrary.ru/ixtblcl>
 8. Martin, S. J., & Sabina, E. P. (2016). Amelioration of Anti-Tuberculosis Drug-Induced Oxidative Stress in Kidneys by Spirulina Fusiformis in a Rat Model. *Ren. Fail.*, 38(7), 1115-1121. <https://doi.org/10.1080/0886022X.2016.1184940>
 9. Mahmoud, A., Morsy, B., Abdel-Hady, D., & Samy, R. (2015). Prunus Armeniaca Leaves Extract Protects Against Isoniazid and Rifampicin-Induced Nephrotoxicity Through Modulation of Oxidative Stress and Inflammation. *Int. J. Food Nutr. Sci.*, (2), 1-6. <https://doi.org/10.15436/2377-0619.15.033>
 10. Dragsted, L. O., Krath, B., Ravn-Haren, G., Vogel, U. B., Vinaggard, A. M., Jensen, P. B., Loft, S., Rasmussen, S. E., Sandström, T. L., & Pedersen, A. (2006). Biological Effects of Fruits and Vegetables. *Proc. Nutr. Soc.*, 65, 61-67. <https://doi.org/10.1079/PNS2005480>
 11. Saleem, A., Waqar, M., Aslam, A., Mobeen, A., Tariq, A., & Ali, F. M. (2022). Therapeutic Role of Lallelantia Royleana (Balangu Seeds) and Its Pharmacological Properties. An Overview. *Sch. Bull.*, 8(9), 283-287. <https://doi.org/10.36348/sb.2022.v08i09.003> EDN: <https://elibrary.ru/hhlezi>
 12. Atabaki, R., & Zatti, M. H. (2014). Improvement of Lidocaine Local Anesthetic Action Using Lallelantia Royleana Seed Mucilage as an Excipient. *Iranian J. Pharmaceutical Research*, 13(4), 1431-1436.

13. Sardarodiyani, M., Arianfar, A., Sani, A. M., et al. (2019). Antioxidant and Antimicrobial Activities of Water-Soluble Polysaccharide Isolated from Balangu Seed (*Lallemantia Royleana*) Gum. *J. Anal. Sci. Technol.*, 10, 17. <https://doi.org/10.1186/s40543-019-0174-4> EDN: <https://elibrary.ru/wcqxc>
14. Malavya, B. K., & Dutts, M. B. K. (1941). Chemical Examination of the Fixed Oil Derived from the Seeds of *Lallemantia Royleana* Benth. of Tukhm-I-Malanga. *P. Math. Sci.*, 14, 80-84. <https://doi.org/10.1007/BF03049128>
15. Chandra, R. (2015). *Environmental Waste Management*. USA: CRC Press. 602 p. <https://doi.org/10.1201/b19243>
16. Hedrich, H. J. (2012). *The Laboratory Mouse*. Italy: Elsevier Ltd. 2nd ed. 845 p.
17. Suvarna, S. K., Layton, C., & Bancroft, J. D. (2019). *Theory and Practice of Histological Techniques*. China: Elsevier. 8th ed.
18. Taylor, C. R., & Rudbeck, L. (2013). *Immunohistochemical Staining Methods*. Denmark: Agilent Dako. 6th ed. 216 p.
19. Dolley-Hitze, T., Jouan, F., Martin, B., Mottier, S., Edeline, J., Moranne, O., Le Pogamp, P., Belaud-Rotureau, M. A., Patard, J. J., Rioux-Leclercq, N., & Vigneau, C. (2010). Angiotensin-2 Receptors (AT1-R and AT2-R), New Prognostic Factors for Renal Clear-Cell Carcinoma? *Br. J. Cancer*, 103(11), 1698-1705. <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6605866> EDN: <https://elibrary.ru/kifhtu>
20. Perazella, M. A., & Rosner, M. H. (2022). Drug-Induced Acute Kidney Injury. *Clin. J. Am. Soc. Nephrol.*, 17(8), 1220-1233. <https://doi.org/10.2215/cjn.11290821> EDN: <https://elibrary.ru/skpazc>
21. Karimzadeh, I., Barreto, E. F., Kellum, J. A., et al. (2023). Moving Toward a Contemporary Classification of Drug-Induced Kidney Disease. *Crit. Care*, 27, 435. <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04720-2> EDN: <https://elibrary.ru/zqczcx>
22. Kwiatkowska, E., Domański, L., Dziedziczko, V., Kajdy, A., Stefańska, K., & Kwiatkowski, S. (2021). The Mechanism of Drug Nephrotoxicity and the Methods for Preventing Kidney Damage. *Int. J. Mol. Sci.*, 22(11), 610. <https://doi.org/10.3390/ijms22116109> EDN: <https://elibrary.ru/lpfgop>
23. Barnett, L. M. A., & Cummings, B. S. (2018). Nephrotoxicity and Renal Pathophysiology: A Contemporary Perspective. *Toxicol. Sci.*, 16(2), 379-390. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfy159>
24. Hussain, Z. K. (2015). Histological Study on the Effect of Ampiroxicam Drug on Liver of Female Mice. *Iraqi J. Sci.*, 56(1), 105-111.
25. Kumar, V., Abbas, A. K., & Aster, J. K. (2013). *Robbins Basic Pathology*. Canada: Elsevier Inc. 9th ed. 924 p.
26. Miller, K., Rennke, H., & Richardson, E. (2023). Rifampin-Associated Renal Failure. *Ann. Intern. Med. Clin. Cases*, 2(4), e221200. <https://doi.org/10.7326/aimcc.2022.1200> EDN: <https://elibrary.ru/rxyyvh>

27. Meganathan, M., Gopal, K. M., Sasikala, P., Mohan, J., Gowdhaman, N., Balamurugan, K., Nirmala, P., Santhakumari, S., & Samuel, V. (2011). Evaluation of Hepatoprotective Effect of Omega-3 Fatty Acid Against Paracetamol-Induced Liver Injury in Albino Rat. *Global J. Pharmacol.*, 5(1), 50-53.
28. Franco, R., Sanchez-Olea, R., Reyes-Reyes, E. M., & Panayiotidis, M. I. Environmental Toxicity, Oxidative Stress, and Apoptosis: Menage a Trois. *Mutat. Res.*, 674, 3-22.
29. Loew, D., & Kaszkin, M. (2002). Approaching the Problem of Bioequivalence of Herbal Medicinal Products. *Phytother. Res.*, 16(8), 705-711. <https://doi.org/10.1002/ptr.1248>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Zainab Thamer Showait AL-Asady, PhD, Department of Microbiology

AL-Karkh University of Science, College of Science

Baghdad, Iraq

zts11970@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8442-9781>

Intidhar Mohammed Mnati, PhD, Department of Biology

University of Baghdad, College of Education of Pure Science

Baghdad, Iraq

entidhar.m.m@ihcoedu.uobaghdad.edu.iq

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4070-913X>

Genan Al-Bairuty, PhD, Department of Microbiology

AL-Karkh University of Science, College of Science

Baghdad, Iraq

galbairuty@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5924-5067>

Iman Sami AL-Jumaily, PhD, Department of Biology

University of Baghdad, College of Education of Pure Science

Baghdad, Iraq

Memo_aljumaily@yahoo.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9959-1722>

Поступила 30.01.2025

После рецензирования 28.04.2025

Принята 16.05.2025

Received 30.01.2025

Revised 28.04.2025

Accepted 15.05.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1225

EDN: BAOVMS

УДК 612.1:616.151:636.034



Научная статья

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА И ИНГИБИТОРА ПРОТЕИНКИНАЗЫ С НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СПЕРМАТОЗОИДОВ БЫКОВ

*М.Н. Иващенко, А.В. Дерюгина, А.А. Белов,
П.С. Игнатьев, М.И. Латушко*

Аннотация

Обоснование. Исследования по применению молекулярного водорода в качестве криопротектора для сперматозоидов крупного рогатого скота продемонстрировали положительные результаты, отмечено повышение подвижности и жизнеспособности клеток, стабилизация их мембран. Несмотря на это, механизмы действия молекулярного водорода на сперматозоиды остаются не до конца выясненными.

Цель. Исследование механизмов воздействия молекулярного водорода и ингибитора протеинкиназы С – стауроспорина на функциональную активность сперматозоидов крупного рогатого скота.

Материалы и методы. Объектом исследования послужили образцы спермы голштинизированных быков, подвергнутые различной обработке. Использовали сперму, разбавленную стандартным разбавителем «BioXcell»; сперму, разбавленную разбавителем «BioXcell», обогащенным молекулярным водородом; сперму, инкубированную с использованием стауроспорина – ингибитора протеинкиназы С; сперму, обработанную молекулярным водородом и последующей инкубацией стауроспорином. Для каждого образца в спермиях проведен анализ кинетических показателей, энергетического статуса и интенсивности протекания свободнорадикальных процессов.

Результаты. В присутствии ингибитора протеинкиназы С – стауроспорина отмечали снижение метаболических и кинетических показателей сперматозоидов, что подтверждает непосредственное участие протеинкиназы С в поддержании структурно-функциональной целостности и активности сперматозоидов. Молекулярный водород в присутствии стауроспорина положи-

тельно влиял на исследуемые параметры спермиев быков, следовательно в трансдукции индуцируемых молекулярным водородом сигналов, помимо протеинкиназы C, задействованы и другие механизмы, которые нечувствительные к стауроспорину.

Заключение. Идентификация механизмов, детерминирующих стимулирующие эффекты молекулярного водорода на сперматозоиды быков, позволит улучшить параметры свежей спермы и технологию криоконсервации спермы.

Ключевые слова: молекулярный водород; сперматозоиды; стауроспорин; протеинкиназа C; малоновый диальдегид; подвижность; АТФ

Для цитирования. Иващенко, М. Н., Дерюгина, А. В., Белов, А. А., Игнатьев, П. С., & Латушко, М. И. (2025). Влияние молекулярного водорода и ингибитора протеинкиназы C на функциональные показатели сперматозоидов быков. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 43-55. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1225>

Original article

THE EFFECT OF MOLECULAR HYDROGEN AND PROTEINKINASE C INHIBITOR ON THE FUNCTIONAL PARAMETERS OF BOVINE SPERM

*M.N. Ivashchenko, A.V. Deryugina, A.A. Belov,
P.S. Ignatiev, M.I. Latushko*

Abstract

Background. Studies on the use of molecular hydrogen as a cryoprotector for cattle spermatozoa have shown positive results, an increase in cell mobility and viability, and stabilization of their membranes have been noted. Despite this, the mechanisms of action of molecular hydrogen on spermatozoa remain unclear.

Purpose. Investigation of the mechanisms of action of molecular hydrogen and the inhibitor of protein kinase C – staurosporin on the functional activity of bovine sperm.

Materials and methods. The object of the study was semen samples from Holsteinized bulls, subjected to various treatments. Sperm diluted with a standard diluent “BioXcell” was used; sperm diluted with a diluent “BioXcell” enriched with molecular hydrogen; sperm incubated using staurosporin – a protein kinase C inhibitor; sperm treated with molecular hydrogen and subsequent incubation with

staurosporin. For each sample in the sperm, an analysis of kinetic parameters, energy status and intensity of free radical processes was carried out.

Results. The inhibitor of protein kinase C – staurosporin reduced the metabolic and kinetic parameters of spermatozoa, which confirms the direct participation of protein kinase C in maintaining the structural and functional integrity and activity of spermatozoa. Molecular hydrogen in the presence of staurosporin had a positive effect on the studied parameters of bovine sperm, therefore, in addition to protein kinase C, other mechanisms that are insensitive to staurosporin are involved in the transduction of molecular hydrogen-induced signals.

Conclusion. Identification of the mechanisms determining the stimulating effects of molecular hydrogen on bull sperm will improve the parameters of fresh sperm and the technology of cryopreservation of bull sperm.

Keywords: molecular hydrogen; spermatozoa; staurosporin; protein kinase C; malondialdehyde; motility; ATP

For citation. Ivashchenko, M. N., Deryugina, A. V., Belov, A. A., Ignatiev, P. S., & Latushko, M. I. (2025). The effect of molecular hydrogen and protein kinase C inhibitor on the functional parameters of bovine sperm. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 43-55. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1225>

Введение

Криоконсервация спермы является важным инструментом репродуктивной биотехнологии, но процессы замораживания и оттаивания оказывают на сперматозоиды негативное влияние [6; 7; 9; 16].

Во время замораживания и последующего оттаивания в сперматозоидах наблюдаются изменения осмотического баланса, окислительного статуса и образование внутриклеточных кристаллов льда. Все эти процессы значительно снижают фертильность спермы, способность спермиев к оплодотворению и качество эмбрионов [1; 13; 17].

В настоящее время разработано множество криопротекторов, призванных повысить выживаемость спермиев после криоконсервации. Согласно нашим исследованиям, одним из перспективных методов оптимизации криосред является включение в их состав молекулярного водорода. Результаты наших исследований показали, что введение молекулярного водорода в среду для криоконсервации сперматозоидов приводит к изменению метаболических процессов, увеличению подвижности и жизнеспособности клеток, стабилизации мембранных структур. Несмотря на это, точные механизмы действия молекулярного водорода на сперматозоиды крупного рогатого скота до конца не изучены и требуют дальнейшего исследования [4; 5; 18].

Оплодотворению между сперматозоидом и яйцеклеткой предшествует акросомная реакция, капацитация и связывание спермиев с блестящей оболочкой яйцеклетки. Известно, что протеинкиназа С (PKC) участвует в регуляции капацитации, в связывании с блестящей оболочкой, регулирует течение акросомной реакции [10].

В сперматозоидах быков протеинкиназа С расположена преимущественно в верхней области акросомы и в основной части хвоста [11; 12; 20].

Стауроспорин является ингибитором протеинкиназы С по смешанному механизму [10]. Стауроспорин связывается с комплексом протеинкиназа Ca^{2+}Mg -АТР+гистон III-S, который не может распасться на продукты [21].

Цель нашего исследования – исследование механизмов воздействия молекулярного водорода и ингибитора протеинкиназы С – стауроспорина на функциональную активность сперматозоидов крупного рогатого скота.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в ООО Племпредприятие «Нижегородское». В исследовании были использованы образцы спермы 20 чёрно-пёстрых голштинизированных быков в возрасте трех лет, весом от 900-1100 кг. Образцы спермы были получены непосредственно перед началом исследования. Все животные содержались в идентичных условиях, соответствующих установленным нормам (ФГБНУ ФНИЦ животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста). Сбор спермы осуществлялся согласно Национальной технологии замораживания и использования генетического материала племенных быков-производителей [8].

В исследовании использовался семенной материал с минимальным содержанием аномальных клеток. Для предотвращения холодового шока сперматозоидов все манипуляции осуществлялись с использованием термостоллика. Эякулят разбавляли синтетической средой «BioXcell» (IMV Technologies, L'Agile, Франция). Для оценки влияния молекулярного водорода на сперматозоиды в состав разбавителя «BioXcell» в качестве криопротектора добавляли молекулярный водород в концентрации 1,2 мг/л. Молекулярный водород получали используя установку Бозон-Н-Н₂/О₃.

Для отделения сперматозоидов от семенной плазмы, сперму дважды центрифугировали при ускорении 300g в течение десяти минут.

В сперматозоидах определяли интенсивность протекания свободнорадикальных процессов путем определения в клетках концентрации малонового диальдегида (МДА) [3]. Оценку энергетического статуса проводили по концентрации внутриклеточного АТФ по методу И.Л. Виноградовой

и соавт. (1980) [2]. Ключевые показатели, определяющие фертильность сперматозоидов – процент общей подвижности и средняя скорость движения сперматозоидов, анализировали с помощью спермоанализатора «Био-ла АФС-500» НПФ БИОЛА (Россия).

Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов: сперма, разбавленная разбавителем «BioXcell» (группа I, контроль); сперма, разбавленная разбавителем «BioXcell», обогащенным молекулярным водородом (группа II); сперма, инкубированная стауроспорином – ингибитором протеинкиназы C (группа III); сперма, обработанная молекулярным водородом и последующей инкубацией стауроспорином (группа IV). Использовали стауроспорин производства фирмы Sigma (США). Концентрация стауроспорина 10 нг/мл использована на основании наших предыдущих результатов.

Для статистического анализа полученных данных применялась программа Statistica. Оценка достоверности результатов осуществлялась с использованием t-критерия Стьюдента. Уровень статистической значимости был установлен на уровне 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице 1 отражены данные экспериментов, где было оценено влияние исследуемых соединений на интенсивность окислительного стресса (МДА), энергетического метаболизма (АТФ) и кинетические показатели (подвижность и средняя скорость движения) спермиев крупного рогатого скота.

Таблица 1.

Влияние молекулярного водорода и стауроспорина на функциональные показатели сперматозоидов, (M±m)

Условия эксперимента	МДА, нМоль/мл	Содержание АТФ, мкмоль/л	Подвижность, %	Средняя скорость движения, мкм/сек
Группа I - контроль	0,61±0,32	0,79±0,09	82,51±5,95	85,62±3,54
Группа II - молекулярный водород	0,77±0,22	0,75±0,12	79,81±5,55	83,27±4,47
Группа III - стауроспорин	0,65±0,43	0,34±0,04 *	62,96±4,39 *	76,28±4,17 *
Группа IV - стауроспорин + молекулярный водород	0,58±0,29	0,54±0,11 *	70,28±5,42 *	81,43±4,16

«*» – статистически достоверные различия по сравнению с контрольной группой при уровне значимости, $p \leq 0,05$.

В контроле (группа I) содержание МДА в среднем составило $0,61 \pm 0,32$ нМоль/мл, АТФ $0,79 \pm 0,09$ мкмоль/л, подвижность $82,51 \pm 5,95\%$, средняя скорость движения сперматозоидов $85,62 \pm 3,54$ мкм/сек.

Из анализа данных, представленных в таблице 1, показано, что достоверных изменений анализируемых показателей между группой II и контролем не отмечено. Под влиянием молекулярного водорода содержание МДА в сперматозоидах составило $0,77 \pm 0,22$ нМоль/мл, уровень аденозинтрифосфата $0,75 \pm 0,12$ мкмоль/л. Подвижность сперматозоидов составила $79,81 \pm 5,55\%$, средняя скорость движения сперматозоидов $83,27 \pm 4,47$ мкм/сек.

Исследования с использованием ингибитора протеинкиназы С – стауроспорина (группа III) продемонстрировали достоверное уменьшение уровня АТФ в клетках на 57%. Также наблюдалось снижение подвижности и средней скорости движения сперматозоидов на 24% и 11% соответственно, по сравнению с контрольной группой ($p \leq 0,05$).

Наличие ингибирующего действия стауроспорина на метаболизм и кинетику сперматозоидов свидетельствует о том, что протеинкиназа С принимает непосредственное участие в функциональной активности сперматозоидов.

В IV группе клеток, которые были предварительно обработаны молекулярным водородом с последующей инкубацией стауроспорином наблюдались аналогичные группе III изменения энергетического метаболизма и кинетических показателей относительно контроля. Однако, эти изменения оказались менее выраженными, чем при действии стауроспорина на сперматозоиды. Содержание АТФ в клетках снижалось на 32 %, подвижность на 15 % ($p \leq 0,05$). Таким образом, эффект стауроспорина в присутствии молекулярного водорода снимался, это указывает на возможную роль протеинкиназы С в трансдукции молекулярным водородом процессов.

Заключение

Наши исследования выявили, что включение молекулярного водорода в разбавитель для спермы быков не оказывает отрицательного воздействия на подвижность и жизнеспособность сперматозоидов. Даже при блокировании протеинкиназы С молекулярный водород оказывал положительное влияние на спермии быков. Это указывает на то, что в передаче сигналов, индуцируемых молекулярным водородом, помимо протеинкиназы С, участвуют и другие механизмы, нечувствительные к стауроспорину.

Идентификация механизмов, детерминирующих стимулирующие эффекты молекулярного водорода на сперматозоиды быков, позволит улучшить параметры свежей спермы и технологию криоконсервации спермы быков.

В свете последних научных открытий в области изучения молекулярного водорода, представляется оправданным его внедрение в животноводство и ветеринарную медицину. Применение молекулярного водорода практически не сопровождается побочными эффектами, обладает высоким терапевтическим потенциалом и демонстрирует благоприятное воздействие на организм [14; 15; 19].

В свете современных тенденций в области биотехники размножения животных, приобретает особую важность задача расширения областей применения молекулярного водорода. Данный вопрос представляет собой актуальную проблему для ветеринарной медицины и для животноводства.

Заключение комитета по этике. Исследование было проведено в полном соответствии с этическими нормами, установленными Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, участвующих в экспериментах или научных исследованиях (ETS №123, Страсбург, 1986), а также с требованиями Приказа Министерства Здравоохранения Российской Федерации № 708н от 28 августа 2010 года.

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

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00205.

Список литературы

1. Антонов, М. П., Жигулина, В. В. (2012). Влияние биохимических изменений липидов сперматозоидов и спермоплазмы на фертильность эякулята. *Верхневолжский медицинский журнал*, (3), 47-50. EDN: <https://elibrary.ru/rcqnm5>
2. Виноградова, И. Л., Багрянцева, С. Ю., Дервиз, Г. В. (1980). Метод одновременного определения 2,3 ДФГ и АТФ в эритроцитах. *Лабораторное дело*, (7), 424-426.
3. Владимиров, Ю. А., Арчаков, А. И. (1972). *Перекисное окисление липидов в биологических мембранах*. Москва: Наука. 252 с. EDN: <https://elibrary.ru/pjbhrz>
4. Дерюгина, А. В., Иващенко, М. Н., Лодяной, М. С. (2022). Оценка резистентности мембран сперматозоидов быков в процессе долгосрочного хранения. *Естественные и технические науки*, 1(164), 107-109. EDN: <https://elibrary.ru/qldsao>

5. Иващенко, М. Н., Дерюгина, А. В., Ермохина, О. Н., Игнатьев, П. С., Латушко, М. И., Метелин, В. Б., Белов, А. А., Ерзутов, А. И. (2024). Изменение метаболизма нативных и деконсервированных сперматозоидов быков под действием молекулярного водорода. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 133-148. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1152> EDN: <https://elibrary.ru/locqfz>
6. Корочкина, Е. А., Мороз, А. И. (2022). Значение разбавителей спермы разных видов сельскохозяйственных животных в процессе ее криоконсервации. *Генетика и разведение животных*, (4), 108-113. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2022-4-108-113> EDN: <https://elibrary.ru/mzpqxd>
7. Максимова, М. А., Корочкина, Е. А. (2023). Криорезестентность спермы разных видов животных (обзор). *Генетика и разведение животных*, (4), 127-134. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-4-127-134> EDN: <https://elibrary.ru/ajouet>
8. Абилов, А. И., Решетникова, Н. М. (ред.). (2008). *Национальная технология замораживания и использования спермы племенных быков-производителей*. Москва. 160 с.
9. Семенова, В. С., Шушакова, А. Д., Ивановская, М. М., Корочкина, Е. А. (2023). Влияние мезенхимальных стволовых клеток и их производных на качественные показатели спермы животных до и после криоконсервации (обзор). *Генетика и разведение животных*, (1), 89-95. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-1-89-95> EDN: <https://elibrary.ru/djolux>
10. Breitbart, H., Naor, H., Breitbart, Z. (1999). Protein kinases in mammalian sperm capacitation and the acrosome reaction. *Rev Reprod*, 4(3), 151-159. <https://doi.org/10.1530/ror.0.0040151>
11. Das, A., Roychoudhury, S. (2022). Reactive Oxygen Species in the Reproductive System: Sources and Physiological Roles. *Adv Exp Med Biol*, 1358, 9-40. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89340-8_2 EDN: <https://elibrary.ru/keuqam>
12. Ickowicz, D., Finkelstein, M., Breitbart, H. (2012). Mechanism of sperm capacitation and the acrosome reaction: role of protein kinases. *Asian J Androl*, 14(6), 816-821. <https://doi.org/10.1038/aja.2012.81>
13. O'Connell, M., McClure, N., Lewis, S.E.M. (2002). The effects of cryopreservation on sperm morphology, motility and mitochondrial function. *Hum Reprod*, 17, 704-709. <https://doi.org/10.1093/humrep/17.3.704>
14. Ohno, K., Ito, M., Ichihara, M., Ito, M. (2012). Molecular hydrogen as an emerging therapeutic medical gas for neurodegenerative and other diseases. *Oxid Med Cell Longev*, 24, 353152. <https://doi.org/10.1155/2012/353152>
15. Ohsawa, I., Ishikawa, M., Takahashi, K., Watanabe, M., Nishimaki, K., Yamagata, K. (2007). Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing

- cytotoxic oxygen radicals. *Nat Med*, 13(6), 688-694. <https://doi.org/10.1038/nm1577>
16. Paoli, D., Lombardo, F., Lenzi, A. (2014). Sperm cryopreservation: effects on chromatin structure. *Adv Exp Med Biol*, 791, 137-150. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7783-9_9
 17. Pahune, P.P., Choudhari, A.R., Muley, P.A. (2013). The total antioxidant power of semen and its correlation with the fertility potential of human male subjects. *J Clin Diagn Res*, 7(6), 991-995. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2013/4974.3040>
 18. Paudel, B., Gervasi, M.G., Porambo, J., Caraballo, D. (2018). Sperm capacitation is associated with phosphorylation of the testis-specific radial spoke protein Rspha. *Biol Reprod*, 100(2), 440-454. <https://doi.org/10.1093/biolre/iy0202>
 19. Qiu, P., Liu, Y., Zhang, J. (2019). Recent advances in studies of molecular hydrogen against sepsis. *Int J Biol Sci*, 15(6), 1261. <https://doi.org/10.7150/ijbs.30741>
 20. Roten, R., Paz, G. F., Homonnai, Z. T. (1992). Ca²⁺-independent induction of acrosome reaction by protein kinase C in human sperm. *Endocrinology*, 131(5), 2235-2243. <https://doi.org/10.1210/endo.131.5.1425422>
 21. Ward, N. E., O'Brian, C. A. (1992). Kinetic analysis of protein kinase C inhibition by staurosporine: evidence that inhibition entails inhibitor binding at a conserved region of the catalytic domain but not competition with substrates. *Mol Pharmacol*, 41(2), 387-392. [https://doi.org/10.1016/S0026-895X\(25\)08889-3](https://doi.org/10.1016/S0026-895X(25)08889-3)

References

1. Antonov, M. P., Zhigulina, V. V. (2012). Influence of biochemical changes in sperm and spermoplasm lipids on ejaculate fertility. *Upper Volga Medical Journal*, (3), 47-50. EDN: <https://elibrary.ru/pcqnmmb>
2. Vinogradova, I. L., Bagryantseva, S. Y., Derviz, G. V. (1980). Method for simultaneous determination of 2,3 DPG and ATP in erythrocytes. *Laboratory Affairs*, (7), 424-426.
3. Vladimirov, Y. A., Archakov, A. I. (1972). *Lipid peroxidation in biological membranes*. Moscow: Nauka, 252 p. EDN: <https://elibrary.ru/pjbhrz>
4. Deryugina, A. V., Ivashchenko, M. N., Lodoynoy, M. S. (2022). Assessment of bull sperm membrane resistance during long-term storage. *Natural and Technical Sciences*, 1(164), 107-109. EDN: <https://elibrary.ru/qldsao>
5. Ivashchenko, M. N., Deryugina, A. V., Ermokhina, O. N., Ignatiev, P. S., Latushko, M. I., Metelin, V. B., Belov, A. A., Erzutov, A. I. (2024). Changes in metabolism of native and thawed bull sperm under the influence of molecular hydrogen. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 133-148. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1152> EDN: <https://elibrary.ru/locqfz>

6. Korochkina, E. A., Moroz, A. I. (2022). The significance of semen diluents for different farm animal species during cryopreservation. *Genetics and Animal Breeding*, (4), 108-113. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2022-4-108-113> EDN: <https://elibrary.ru/mzpqxd>
7. Maksimova, M. A., Korochkina, E. A. (2023). Cryoresistance of semen in different animal species (review). *Genetics and Animal Breeding*, (4), 127-134. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-4-127-134> EDN: <https://elibrary.ru/ajouet>
8. Abilov, A. I., Reshetnikova, N. M. (eds.). (2008). *National technology for freezing and using semen of breeding bulls*. Moscow, 160 p.
9. Semenova, V. S., Shushakova, A. D., Ivanovskaya, M. M., Korochkina, E. A. (2023). Influence of mesenchymal stem cells and their derivatives on semen quality indicators in animals before and after cryopreservation (review). *Genetics and Animal Breeding*, (1), 89-95. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-1-89-95> EDN: <https://elibrary.ru/djolux>
10. Breitbart, H., Naor, H., Breitbart, Z. (1999). Protein kinases in mammalian sperm capacitation and the acrosome reaction. *Rev Reprod*, 4(3), 151-159. <https://doi.org/10.1530/ror.0.0040151>
11. Das, A., Roychoudhury, S. (2022). Reactive Oxygen Species in the Reproductive System: Sources and Physiological Roles. *Adv Exp Med Biol*, 1358, 9-40. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89340-8_2 EDN: <https://elibrary.ru/keuqam>
12. Ickowicz, D., Finkelstein, M., Breitbart, H. (2012). Mechanism of sperm capacitation and the acrosome reaction: role of protein kinases. *Asian J Androl*, 14(6), 816-821. <https://doi.org/10.1038/aja.2012.81>
13. O'Connell, M., McClure, N., Lewis, S.E.M. (2002). The effects of cryopreservation on sperm morphology, motility and mitochondrial function. *Hum Reprod*, 17, 704-709. <https://doi.org/10.1093/humrep/17.3.704>
14. Ohno, K., Ito, M., Ichihara, M., Ito, M. (2012). Molecular hydrogen as an emerging therapeutic medical gas for neurodegenerative and other diseases. *Oxid Med Cell Longev*, 24, 353152. <https://doi.org/10.1155/2012/353152>
15. Ohsawa, I., Ishikawa, M., Takahashi, K., Watanabe, M., Nishimaki, K., Yamagata, K. (2007). Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nat Med*, 13(6), 688-694. <https://doi.org/10.1038/nm1577>
16. Paoli, D., Lombardo, F., Lenzi, A. (2014). Sperm cryopreservation: effects on chromatin structure. *Adv Exp Med Biol*, 791, 137-150. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7783-9_9
17. Pahune, P.P., Choudhari, A.R., Muley, P.A. (2013). The total antioxidant power of semen and its correlation with the fertility potential of human male subjects. *J Clin Diagn Res*, 7(6), 991-995. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2013/4974.3040>

18. Paudel, B., Gervasi, M.G., Porambo, J., Caraballo, D. (2018). Sperm capacitation is associated with phosphorylation of the testis-specific radial spoke protein Rspba. *Biol Reprod*, 100(2), 440-454. <https://doi.org/10.1093/biolre/iyoy202>
19. Qiu, P., Liu, Y., Zhang, J. (2019). Recent advances in studies of molecular hydrogen against sepsis. *Int J Biol Sci*, 15(6), 1261. <https://doi.org/10.7150/ijbs.30741>
20. Roten, R., Paz, G. F., Homonnai, Z. T. (1992). Ca^{2+} -independent induction of acrosome reaction by protein kinase C in human sperm. *Endocrinology*, 131(5), 2235-2243. <https://doi.org/10.1210/endo.131.5.1425422>
21. Ward, N. E., O'Brian, C. A. (1992). Kinetic analysis of protein kinase C inhibition by staurosporine: evidence that inhibition entails inhibitor binding at a conserved region of the catalytic domain but not competition with substrates. *Mol Pharmacol*, 41(2), 387-392. [https://doi.org/10.1016/S0026-895X\(25\)08889-3](https://doi.org/10.1016/S0026-895X(25)08889-3)

ВКЛАД АВТОРОВ

Ивашенко М.Н., Дерюгина А.В.: разработка концепции научной работы, составление черновика рукописи.

Белов А.А., Латушко М.И., Игнатьев П.С.: сбор и анализ данных, статистическая обработка полученных результатов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Marina N. Ivashchenko, Anna V. Deryugina: development of the concept of scientific work, drafting of the manuscript.

Andrey A. Belov, Mikhail I. Latushko, Pavel S. Ignatiev: data collection and analysis, statistical processing.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ивашенко Марина Николаевна, кандидат биологических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева»
пр. Гагарина, 97, г. Нижний Новгород, 603107, Российская Федерация
kafedra2577@mail.ru

Дерюгина Анна Вячеславовна, доктор биологических наук, доцент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, 603022, Российская Федерация
deryugina@ibbm.unn.ru

Белов Андрей Александрович, кандидат биологических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева»
пр. Гагарина, 97, г. Нижний Новгород, 603107, Российская Федерация
andrey.raven@gmail.com

Игнатъев Павел Сергеевич, кандидат физико-математических наук
Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова
ул. Восточная, 33Б, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация
ignasha2000@yandex.ru

Латушко Михаил Иванович, кандидат технических наук
Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова
ул. Восточная, 33Б, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация
ancord.m@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Marina N. Ivashchenko, Cand. Sc. (Biology), Associate Professor
Nizhny Novgorod State Agrotechnological University named after L.Y. Florentyev
97, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation
SPIN-code: 8510-8676
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6642-8518>
kafedra2577@mail.ru

Anna V. Deryugina, Dr. Sc. (Biology), Associate Professor
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation
SPIN-code: 7974-4600
deryugina@ibbm.unn.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8812-8559>

Andrey A. Belov, Cand. Sc. (Biology), Associate Professor
Nizhny Novgorod State Agrotechnological University named after L.Y. Florentyev
97, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation

SPIN-code: 1394-7694

andrey.raven@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4869-5054>

Pavel S. Ignatiev, Cand. Sc. (Phys.-Math.)

*Production Association “Ural Optical and Mechanical Plant” named
after E.S. Yalamov*

33B, Vostochnaya Str., Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

SPIN-code: 7956-1778

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5075-7034>

ignasha2000@yandex.ru

Mikhail I. Latushko, Cand. Sc. (Engineering)

*Production Association “Ural Optical and Mechanical Plant” named
after E.S. Yalamov*

33B, Vostochnaya Str., Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

ancord.m@yandex.ru

Поступила 26.11.2024

После рецензирования 02.12.2024

Принята 18.12.2024

Received 26.11.2024

Revised 02.12.2024

Accepted 18.12.2024

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1208

EDN: ASXKXX

УДК 57.032



Научная статья

**АНАЛИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭКСПРЕССИИ
ГЕНОВ ГЛИЦИНИНОВ И β -КОНГЛИЦИНИНОВ
В СЕМЕНАХ КУЛЬТУРНЫХ СОРТОВ СОИ
В РАЗНЫХ ПЕРИОДАХ ИХ СОЗРЕВАНИЯ***А.А. Пензин, П.Д. Тимкин, Д.Д. Котельников***Аннотация**

Обоснование. Соя – экономически важная культура, применяемая в различных отраслях промышленности, от питания людей до кормления животных. Создание новых сортов с повышенным содержанием белка или же с определённым их субъединичным составом, более подходящим для пищевых и кормовых целей, является актуальным направлением для исследований. В данном исследовании проведен анализ дифференциальной экспрессии генов глицининов и β -конглицининов в семенах различных сортов сои (*Glycine max* [L.] Merr) на разных стадиях созревания (R5-R8). Глицинины и β -конглицинины составляют значительную часть белка, содержащегося в соевых бобах, играют важную роль в прорастании семян и обеспечивают биотическую защиту. В исследования были проанализированы высокобелковые (Невеста и Станя), и низкобелковые (Гармония и Даурия) сорта.

Цель. Провести дифференциальный анализ экспрессии генов глицининов и β -конглицининов в различные фазы налива и созревания семян (R5-R8) сортов сои селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои с повышенным и пониженным содержанием белка.

Материалы и методы. Подбор праймеров для анализа генов глицининов (*Gy1-5* и *Gy7*) и β -конглицининов (*Cg1* и *Cg3-4*) проводился с использованием программного обеспечения, позволяющего добиться высокой специфичности

и отсутствия вторичных структур (димеров, шпилек), из РНК, выделенной из семян, была получена кДНК, используя необходимые наборы реагентов, амплификация фрагментов и их детекция проводилась на термоциклере CFX-96 в режиме реального времени.

Результаты. Были разработаны праймеры подходящие для анализа уровня экспрессии генов, кодирующих разные субъединицы глицининов и β -конглицининов. Получены транскриптомные профили исследуемых суюединиц.

Заключение. Результаты показали, что высокобелковые сорта демонстрируют повышенную экспрессию генов глицининов на ранних стадиях развития, тогда как низкобелковые отличаются повышенной экспрессией генов β -конглицининов. Это открывает перспективы для использования данных о экспрессии генов при селекции новых сортов сои, а также может помочь в оптимизации сроков сбора сои для производства продуктов питания, зависящих от определенного субъединичного состава белков.

Ключевые слова: глицинины; β -конглицинины; экспрессия генов; соя; белок

Для цитирования. Пэнзин, А. А., Тимкин, П. Д., & Котельников, Д. Д. (2025). Анализ дифференциальной экспрессии генов глицининов и β -конглицининов в семенах культурных сортов сои в разных периодах их созревания. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 56-70. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1208>

Original article

DIFFERENTIAL ANALYSIS OF GLYCININ AND β -CONGLYCININ GENE EXPRESSION IN SEEDS OF CULTIVATED SOYBEAN VARIETIES AT DIFFERENT PERIODS OF THEIR MATURATION

A.A. Penzin, P.D. Timkin, D.D. Kotelnikov

Abstract

Background. Soybeans are an economically important crop used in various industries, from human nutrition to animal feeding. The creation of new varieties with a high protein content or with a certain subunit composition more suitable for food and feed purposes is an urgent area for research. In this study, the differential expression of glycinin and β -conglycinin genes in seeds of various soybean varieties (*Glycine max* [L.] Merr) at different stages of maturation (R5-R8) was analyzed.

Glycinin's and β -conglycinins make up a significant part of the protein contained in soybeans, play an important role in seed germination and provide biotic protection. High-protein (Bride and Stately) and low-protein (Harmony and Dauria) varieties were analyzed in the study.

Purpose. To carry out a differential analysis of the expression of glycinin and β -conglycin genes in various phases of filling and maturation of seeds (R5-R8) of soybean varieties selected by the Federal State Budgetary Scientific Research Center of the Russian Research Institute of Soybeans with increased and decreased protein content.

Materials and methods. The selection of primers for the analysis of glycine genes (*Gyl-5* and *Gy7*) and β -conglycinins (*Cg1* and *Cg3-4*) was carried out using software that allows to achieve high specificity and the absence of secondary structures (dimers, hairpins), from RNA extracted from seeds, was cDNA was obtained using the necessary reagent kits, amplification of fragments and their detection were carried out on a CFX-96 thermo-cycler in real time.

Results. Primers have been developed suitable for analyzing the expression level of genes encoding different subunits of glycinins and β -conglycinins. Transcriptomic profiles of the studied subunits were obtained.

Conclusion. The results showed that high-protein varieties demonstrate increased expression of glycinin genes in the early stages of development, whereas low-protein varieties are characterized by increased expression of β -conglycinin genes. This opens up prospects for using data on gene expression in the selection of new soybean varieties, and may also be able to optimize the timing of soybean harvest for food production, depending on a certain subunit composition of proteins.

Keywords: glycinins; β -conglycinins; gene expression; soybean; protein

For citation. A.A. Penzin, P.D. Timkin, D.D. Kotelnikov (2025). Differential analysis of glycinin and β -conglycinin gene expression in seeds of cultivated soybean varieties at different periods of their maturation. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 56-70. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1208>

Введение

Соя – считается экономически важной сельскохозяйственной культурой, в виду своих питательных свойств. Одним из её главных сельскохозяйственных признаков является общее содержание белка, оценка качественного состава которого может выражаться в соотношении субъединиц глицининов (11S) к β -конглицининам (7S) [5; 15].

Изучение качественного состава белка, может позволить раскрыть потенциалов некоторых продуктов питания. Помимо этого, изучение соотно-

шения глицининов к β -конглицининам даст возможность в будущем лучше понимать процессы накопления белка, а также использовать этот параметр как сельскохозяйственный признак для выведения новых сортовобразцов [10; 12; 19].

Глицинины и β -конглицинины – основные запасные белки сои. Их содержание в семенах сои варьируется от 60 до 70 % от общего белка. В геноме сои локусы глицинина представлены множеством копий (*Gy1–Gy8*). В физиологии клеток сои, данные белки являются важным источником углерода и азота при проращивании семян. Также имеются свидетельства о том, что запасные белки обладают бактерицидными свойствами и по факту являются антимикробными пептидами. По всей видимости данное свойство глицининов и β -конглицининов позволяет иметь соевым бобам устойчивость к бактериям помимо запаса питательных веществ [2; 4; 20].

Все формы глицининов имеют схожее строение с минорными различиями. На данный момент неизвестно, есть ли какое-то отличие в механизмах транскрипции или в функциональном назначении в физиологии клеток. Однако несмотря на схожесть в первичной последовательности ДНК, имеются свидетельства о различных физико-химических свойствах, таких как желирование. Широко представленное разнообразие генов глицинина в геноме связывают с многократным умножением этого гена в ходе эволюции. Например, локусы *Gy6* и *Gy8* являются псевдогенами, то есть генами, которые по какой-либо причине утратили способность экспрессироваться. Также наблюдается тенденция к вырождению некоторых локусов, таких как *Gy7*. У этих локусов способность к экспрессии разнится в зависимости от сорта. Каждый ген глицинина содержит четыре экзона и три интрона, аналогично генам, кодирующим родственные белки у других бобовых. В случае β -конглицининов было обнаружено 15 локусов (*Cg1–Cg15*), при этом возможность к экспрессии преимущественно была выявлена у *Cg1*, *Cg3* и *Cg4*. Каждый из этих генов состоит из шести экзонов, разделенных пятью интронами, подобно генам, которые кодируют белки типа 7S глобулина у других бобовых растений [9; 16; 21].

Оценка сортовых линий по количественному соотношению глицининов и β -конглицининов позволит по-новому подойти к анализу качественного состава белка, создавая новые сортовобразцы с повышенным содержанием той или иной фракции в зависимости от потребностей сельхозпроизводителя. Исследования по профилированию образцов по соотношению 11S и 7S белка у сортов сои с высоким и низким содержанием белка, предпринимались методами РНК-секвенирования [6]. В академической среде уже

использовался подход к поиску сортовых линий, подходящих для конкретных задач пищевой промышленности, путем профилирования сортов сои по субъединичному составу. Так, например имеются данные о нахождении мутантных аллелей, которые приводили к отсутствию экспрессии *Gy1* и *Gy4*, семена сои с пониженным содержанием вышеописанных субъединиц, лучше подходят для приготовления тофу. Также удалось выяснить, что несмотря на снижение экспрессии двух субъединиц глицина, общее содержание белка не претерпело статистически значимых изменений [18].

Цель исследования – провести дифференциальный анализ экспрессии генов глицининов и β -конглицинов в различные фазы налива и созревания семян (R5-R8) сортов сои селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои с повышенным и пониженным содержанием белка.

Материалы и методы

На основании оценки объектов исследования по хозяйственно ценным и морфологическим признакам для последующего выделения тотальной РНК из семян сортов культурной сои, а также ее профилирования, были отобраны образцы семян со следующими характеристиками: высокобелковые сорта селекции ВНИИ сои – Невеста, Статная (39,8...40,7 % и 40,5...42,9% белка соответственно); низкобелковые сорта селекции ВНИИ сои – Гармония, Даурия (37,5...39,6 % и 37,3...40,3 % белка соответственно) [1].

Отбор семян сортов сои Невеста, Статная (высокобелковые сорта) и Гармония, Даурия (низкобелковые сорта) производился в разный период налива и созревания семян в фазах R5-R8. Отбор проводился с 20 по 90 сутки после начала цветения. Полученные семена различных фаз развития *G. max*, были заложены на хранение в морозильной камере при температуре – 80 °С, для дальнейших исследований.

Дизайн праймеров к мРНК интересующих белковых субъединиц *Gy1* (KRH67385), *Gy2* (KRH67383), *Gy3* (KRG95667), *Gy4* (KRH32185), *Gy5* (KRH19559), *Gy7* (KRG95666), *Cg-1*(KRH35498), *Cg-3*(KRG91330), *Cg-4* (KRG91303) осуществлялся с использованием плагина Primer3 программы Unipro UGENE [8, 17], с длиной ампликона от 90 до 150 п.н. и расчетной температуре отжига праймера - 60°С. Подобранные пары праймеров дополнительно отбирались по энергии связывания димеров (не менее -9 ккал/моль) и числу спаренных оснований (не более 4) при возможном образовании вторичных структур, гомо- и гетеродимеров, используя веб-инструментарий OligoAnalyzer от IDT [13].

По каждому периоду развития семян, был получен гомогенизат, который впоследствии использовался для экстракции нуклеиновых кислот. Выделение и очистка РНК из растений была выполнена с использованием набора HiPure Plant RNA Kit (Magen). Концентрация однопочечной РНК и уровень загрязнения были измерены на спектрофотометре EzDrop (BlueRay Biotech). Образцы считались чистыми при отношении длин волн 260/280 нм и 260/230 равным $2,0 \pm 0,2$. Использование спектрофотометрии было обусловлено необходимостью отбора чистых проб, так как загрязнитель (белковая и углеводная фракция) негативно влияет на проведение обратной транскрипции и ПЦР с кДНК.

Для проверки целостности выделенной РНК проводился электрофорез в 1%-агарозном геле при не денатурирующих условиях [14].

Обратную транскрипцию для получения кДНК проводили с использованием набора ОТ-М-MuLV-RH (Биолабмикс) согласно протоколу производителя с использованием Oligo dT праймеров, входящих в набор.

Валидация праймеров *in vitro* проводилась на сорте Невеста в стадии созревания семян R8 (90-ые сутки) с использованием набора БиоМастер HS-qPCR SYBR Blue (2×) (Биолабмикс), согласно инструкции в двухкратной повторности. Амплификация проводилась на термоциклере CFX96 (BioRad) Амплификацию при следующих температурных режимах: начальная денатурация – при 96 °C в течение 2 мин, затем 32 цикла при температурно-временном режиме: денатурация – при 94 °C – 30 сек, отжиг праймеров при 66°C (температура снижается в зависимости от количества пиков плавления с шагом в 2°C) – 40 сек, элонгация – при 70 °C в течение 1 мин; финальная элонгация – при 70 °C в течение 2 мин.

Для подбора оптимальных температур в стадии отжига, производилось последовательное снижение температур, начиная с 66°C. Анализировались результаты пиков плавления. В случае с детекцией одного пика плавления при заданной температуре, для каждой пары праймеров, то данная температура считалась оптимальной.

Количественная ПЦР, для анализа дифференциальной экспрессии генов глицининов и β -конглицинов проводилась с использованием протокола, описанного выше. Анализировались пики плавления и C_q , полученные после амплификации. В дальнейшем представленные результаты использовались для анализа дифференциальной экспрессии генов.

В качестве референса использовался конститутивный ген тубулина *tubB*, как один из наиболее подходящих для оценки дифференциальной экспрессии с учетом различных стадий развития. На данный момент подобные конститутивные гены апробированы только на корне, гипокотиле,

эпикотиле, семядоле, листе и верхушке побега. На семенах данный ген еще не был проверен [7, 9].

Статистический анализ относительной экспрессии генов по методу $2^{-\Delta\Delta CT}$ и нормализация показателей, для каждого образца проводилась с использованием программного пакета Microsoft Excel [11].

Для объективного сравнения результатов анализа уровня экспрессии исследуемых генов в разных сортах и периодах созревания семян была проведена z-нормализация [3].

Результаты

На начальном этапе были получены бобы сои на разных стадиях роста и развития. После чего, они были вскрыты для извлечения семян и последующего выделения РНК (Рис. 1).

Большая часть образцов была собрана в одинаковые сутки после начала цветения, за исключением сортов Статная и Гармония, у которых периоды R6 и R7 начинаются с 60-ых и 70-ых суток соответственно (Табл. 1).

Таблица 1.

Даты отбора бобов сои по фазам роста и развития сои

Сорт, форма	Дни после начала цветения, фаза роста и развития семян			
	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
сорта сои				
Невеста (ВНИИ сои)	20 день	70 день	80 день	90 день
Статная (ВНИИ сои)	20 день	60 день	70 день	90 день
Гармония (ВНИИ сои)	20 день	60 день	70 день	90 день
Даурия (ВНИИ сои)	20 день	60 день	80 день	90 день

В ходе подбора праймеров для каждого из транскриптов было сгенерировано от 2 до 3 пар олигонуклеотидов. Полученные последовательности успешно гибридизовались с матрицей на платформе BLAST, а также проходили проверку в плагине *ПЦР in silico*. То есть энергия Гиббса гомо и гетеродимеров составляла не мене -9 ккал/моль, а количество спаренных нуклеотидов не превышало 4 (Табл. 2).

В результате отбора из общего количества сгенерированных праймеров, было получено от 2 до 3 пар олигонуклеотидов удовлетворяющих описанным выше требованиям. Полученные последовательности успешно гибридизовались с матрицей на платформе BLAST, а также проходили проверку в плагине *ПЦР in silico*. То есть энергия Гиббса гомо и гетеро-

димеров составляла не мене -9 ккал/моль, а количество спаренных нуклеотидов не превышало 4 (Табл. 2).

Таблица 2.

Последовательности всех сгенерированных пар праймеров

Локус (номер пары прайме- ров)	ID транс- крипта	Прямой праймер	Обратный праймер	Экзон- ное распо- ложе- ние	Рас- чет- ные темпе- ратуры	Дли- на ам- пли- кона
'Gy1 (1)	KRH67385	GAAGAGGAT- GAGAAGCCA- CA	TGTCAGGTGAT- GAAGTCTGG	3 экзон	65,41	151
Gy1 (2)		AACAAAGAC- CCCAGGAAGAG	CAATGTTGTGGC- GAAGTCTC	3 экзон	65,27	159
Gy2 (1)	KRH67383	AGACCGTCAC- CAAAAGGTA	CAACAACAG- GAGTGTCTTCA	2 экзон	63,14	104
Gy2 (2)		GAGCATAAAC- CCGAGAGAGAAG	AAAGTAAC- CCCATGTAAGCA	1 экзон	61,1	129
Gy2 (3)		AGTGTGC- GTTCTTTTA- ATGT	TGCAGGAAATA- AGTAGTGAGC	1 экзон	57,47	120
Gy3 (1)	KRG95667	TCTCTC- CATTTGTCCTT- GAA	GCTGCTCTCT- GAAACTGAAA	1 экзон	61,67	109
Gy3 (2)		ACAACACAAA- CATTCTCTCCA	CTCTCT- GAAACTGAAAG- CGA	1 экзон	61,44	118
Gy4 (1)	KRH32185	GATAAACCTC- GTCCTAGT	GATCTTCATCTT- CATCTTC	3 экзон	60,85	85
Gy4 (2)		ACAAGCAT- GATGGTGT- GAGG	CGATTGAAAGG- TACAACGCC	4 экзон	61,55	142
Gy5 (1)	KRH19559	CGAACAA- CAAGAACCACG	TGAAGGGCGAG- CAATGTT	3 экзон	62,38	100
Gy5 (2)		AGAATATGAA- CAAACCTCC	TCTAGTCTGA- CATCCTCT	3 экзон	63,23	169
Gy5 (3)		TGGAAGAGGAT- GTCAGACTA	AGACTGTTGAG- GGTGCTAAT	3 экзон	63,79	135
Gy7 (1)	KRG95666	TGAAGGTGGG- GATAACAAAG	GGGTCTTGG- GTTTTCTTCT	3 экзон	62,46	138
Gy7 (2)		GGAGAAGT- GCTTGCGAAT	GACAATGAGGG- GATTTGGAG	3 экзон	64,38	123

¹ Полуожирным выделением отмечены пары праймеров, успешно прошедшие валидацию *in vitro*

<i>Cg-1</i> (1)	<i>KRH35498</i>	GGCAT- CAGTTTCT- GTCTCAT	TGTAG- GAGTCTTCTC- GCTA	1 экзон	62,7	101
<i>Cg-1</i> (2)		CACCAACCT- CATCAAAAGGA	TCTTTGTCTTG- CTCCTCATC	1 экзон	62,8	122
<i>Cg-3</i> (1)	<i>KRG91330</i>	TACTATGATGA- GAGCACGGT	TGGAGA- CACTTGTGTG- GTTT	1 экзон	62,7	123
<i>Cg-3</i> (2)		CGAAAGCAA- GAGGAAGATGA	CCGAA- GAGAAAAGG- GTTCTT	1 экзон	62,2	104
<i>Cg-4</i> (1)	<i>KRG91303</i>	TCGAGGAGATA- AACAGGGTT	CTCAGTTGC- CGAATTGTTC	4 экзон	63,2	100
<i>Cg-4</i> (2)		GAACAAATTC- GGCAACTGAG	CAGGG- GTGATCT- CAAAGAAC	4 экзон	63,13	139

Концентрация выделенной РНК из бобов сои в период R5 составляла 35-50 нг/мкл, в периоды R5-R8 200-700 нг/мкл, чистота образцов находилась в желаемом диапазоне. Электрофорез тотальной РНК показал бэнды 28S-, 18S- и 5,8S-РНК, что свидетельствует о присутствии в смеси целостной нефрагментированной РНК (рис. 2).

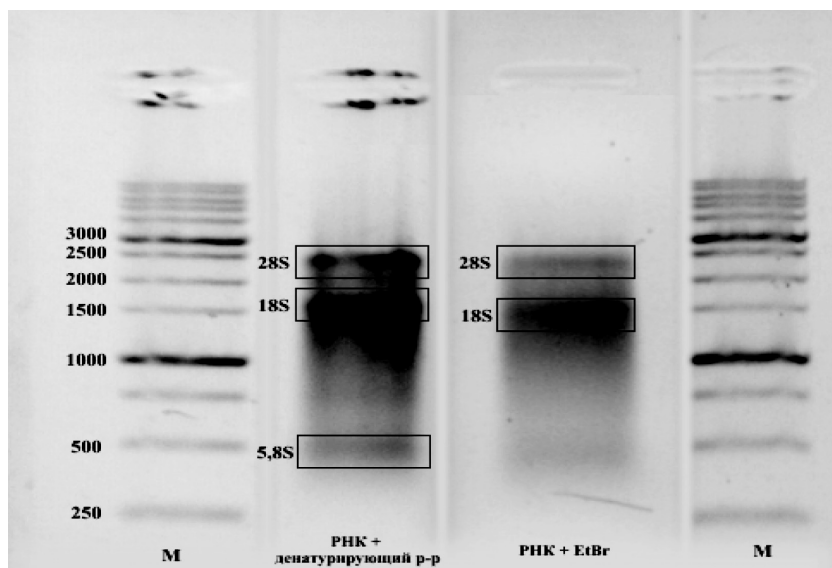


Рис. 2. РНК-электрофорез. М – маркер длин 1kb (Евроген)

Используя полученную кДНК из выделенной РНК, удалось добиться амплификации с использованием некоторых сгенерированных праймеров. Так для каждого локуса только одна пара праймеров гибридизовалась с целевым фрагментом при температуре при 64°C. Те пары, что не продемонстрировали результат требуют дальнейшей коррекции температурного оптимума и возможно подойдут для других исследований, где будут требоваться другие условия ПЦР-реакции.

Оценка кривых плавления ПЦР-продуктов, удавшихся олигонуклеотидов, показала единичные пики флуоресценции в образцах на всех этапах созревания семени, что свидетельствует, во-первых, об отсутствии нецелевого эффекта праймеров, а во-вторых, об отсутствии неспецифической амплификации димеров праймеров (рис. 3).

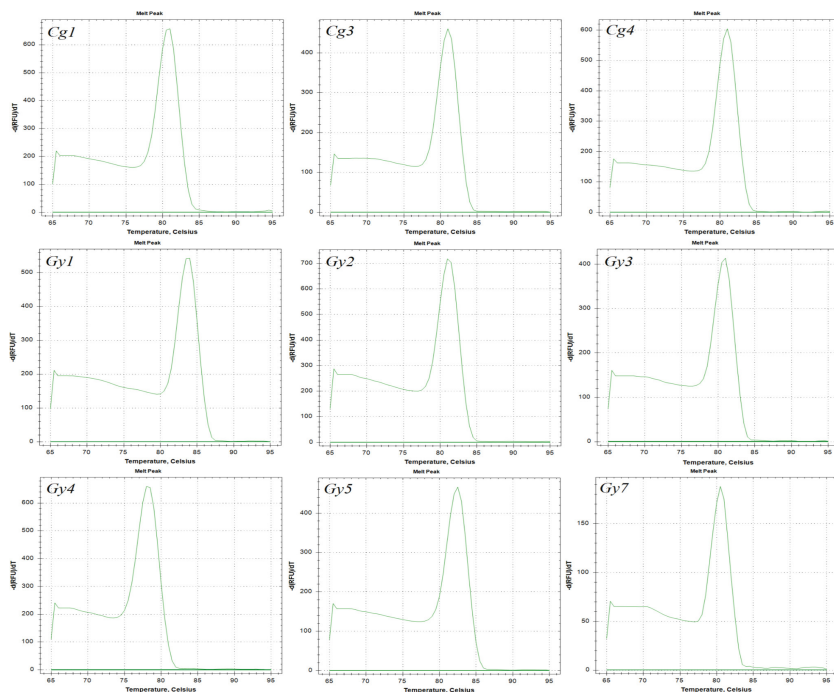


Рис. 3. Кривые плавления праймеров

Убедившись в специфичности работы праймеров - следующим шагом эксперимента была оценка уровня экспрессии генов глицининов и

β-конглицининов, для этого была проведена ПЦР РВ с использованием отобранных праймеров.

В результате Z-нормализации данных, полученных при анализе относительной экспрессии генов методом $2^{-\Delta\Delta CT}$ были получены гистограммы для сравнительного анализа различий уровней экспрессии генов, кодирующих глицинины и β-конглицинины как по разным фазам созревания семян, так и по сортам (Рис. 4).

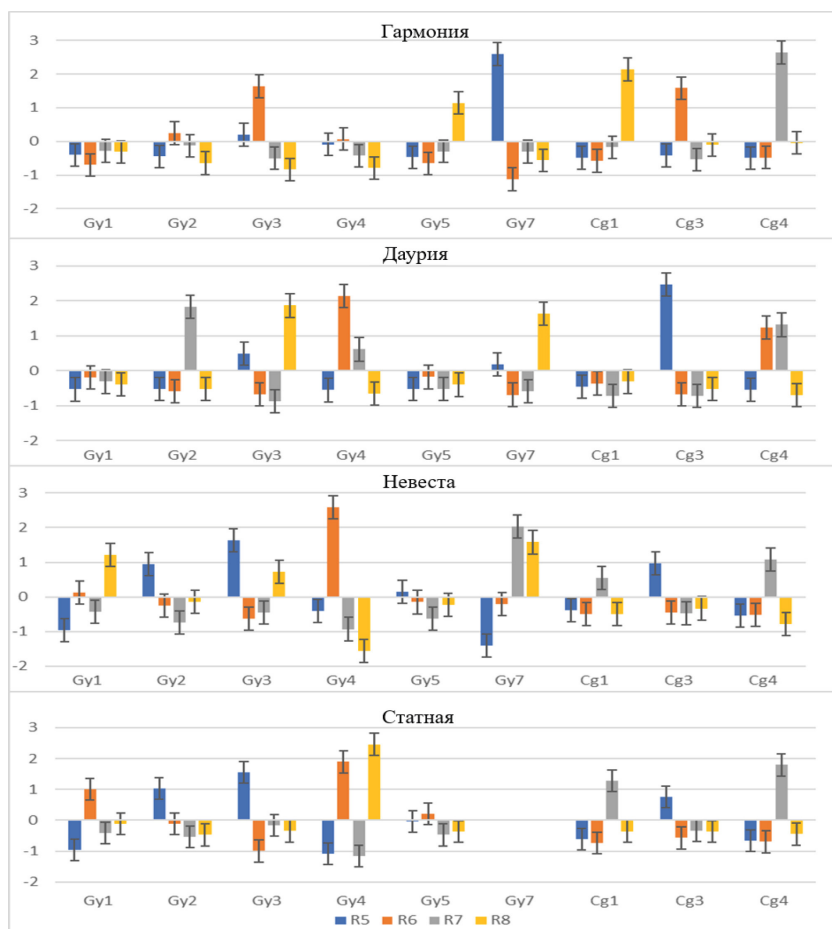


Рис. 4. Z-нормализованный уровень экспрессии глицининов и β-конглицининов
Примечание: R5-8 – фазы созревания семян

Анализ гистограмм показал, что высокобелковые сорта сои, такие как Невеста и Статная, демонстрируют повышенный уровень экспрессии генов, кодирующих глицинины, по сравнению с низкобелковыми сортами, такими как Даурия и Гармония. Это особенно ярко выражено для гена *Gy4*, который проявляет высокую активность в фазах R6 и R8 у сорта Статная и в фазе R6 у сорта Невеста, а также для гена *Gy1*, что проявлял себя только в этих сортах. Кроме того, высокобелковые сорта характеризуются повышенной экспрессией генов *Gy2* и *Gy3* на ранних стадиях развития, тогда как в низкобелковых сортах эти гены активируются на более поздних стадиях. Сорта Гармония и Даурия отличаются от высокобелковых сортов повышенной экспрессией генов, кодирующих β -конглицинины, на различных стадиях развития.

Заключение

Проведенный анализ дифференциальной экспрессии генов позволил выявить закономерности накопления глицининов и β -конглицининов в образцах низкобелковых и высокобелковых сортов сои. Экспрессия генов *Gy1-Gy7* у высокобелковых сортов (Невеста и Статная) превосходила экспрессию *Cg1-Cg4*, в то время как в низкобелковых сортах (Даурия и Гармония) наблюдалась противоположная картина. Сравнивая эти сорта между собой, можно заметить, что экспрессия генов кодирующих глицинины в высокобелковых сортах выше, чем в низкобелковых и наоборот в случае с генами кодирующими β -конглицинины. Эти данные способны как помочь при подборе родительских пар на основе РНК-профилирования, так и при выборе подходящих сроков сбора сои для производства различных продуктов питания, для производства которых более предпочтителен определённый субъединичный состав.

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

Благодарности. Работа выполнена с использованием семян, предоставленных лабораторией селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено в рамках темы научно-исследовательской работы № 082-3-2023-0007.

Список литературы / References

1. Каталог сортов сои / Фокина, Е. М., Беляева, Г. Н., Синеговский, М. О. [и др.]. (2021). Благовещенск: ООО «ИПК «ОДЕОН». 69 с. (*Catalog of soybean varieties* / Fokina, E. M., Belyaeva, G. N., Sinegovsky, M. O. et al.

- (2021). Blagoveshchensk: LLC “IPC “ODEON”, 69 p.) ISBN: 978-5-6040714-5-8 EDN: <https://elibrary.ru/qosjcx>
2. Badley, R. A., Atkinson, D., Hauser, H., Oldani, D., Green, J. P., & Stubb, J. M. (1975). The structure, physical and chemical properties of the soy bean protein glycinin. *Biochim Biophys Acta*, 412(2), 214-228. [https://doi.org/10.1016/0005-2795\(75\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0005-2795(75)90036-7)
 3. Cheadle, C., Vawter, M. P., Freed, W. J., & Becker, K. G. (2003). Analysis of microarray data using Z score transformation. *J Mol Diagn*, 5(2), 73-81. [https://doi.org/10.1016/S1525-1578\(10\)60455-2](https://doi.org/10.1016/S1525-1578(10)60455-2)
 4. Freitas, C. S., Vericimo, M. A., Silva, M. L., da Costa, G. C. V., Pereira, P. R., Paschoalin, V. M. F., & Del Aguila, E. M. (2019). Encrypted antimicrobial and antitumoral peptides recovered from a protein-rich soybean (*Glycine max*) by-product. *Journal of Functional Foods*, 54, 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.01.024>
 5. Guo, B., Sun, L., Jiang, S., et al. (2022). Soybean genetic resources contributing to sustainable protein production. *Theor Appl Genet*, 135, 4095-4121. <https://doi.org/10.1007/s00122-022-04222-9> EDN: <https://elibrary.ru/fzjutt>
 6. Hooker, J. C., Nissan, N., Luckert, D., Charette, M., Zapata, G., Lefebvre, F., Mohr, R. M., Daba, K. A., Warkentin, T. D., Hadinezhad, M., et al. (2023). A Multi-Year, Multi-Cultivar Approach to Differential Expression Analysis of High- and Low-Protein Soybean (*Glycine max*). *Int. J. Mol. Sci.*, 24, 222. <https://doi.org/10.3390/ijms24010222> EDN: <https://elibrary.ru/fqyarx>
 7. Hu, R., Fan, C., Li, H., et al. (2009). Evaluation of putative reference genes for gene expression normalization in soybean by quantitative real-time RT-PCR. *BMC Molecular Biol*, 10, 93. <https://doi.org/10.1186/1471-2199-10-93> EDN: <https://elibrary.ru/ybghyr>
 8. Koressaar, T., Lepamets, M., Kaplinski, L., Raime, K., Andreson, R., & Remm, M. (2018). Primer3_masker: integrating masking of template sequence with primer design software. *Bioinformatics*, 34(11), 1937-1938. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty036>
 9. Li, C., & Zhang, Y. M. (2011). Molecular evolution of glycinin and β -conglycinin gene families in soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Heredity*, 106, 633-641. <https://doi.org/10.1038/hdy.2010.97>
 10. Mulalapele, L. T., & Xi, J. (2021). Detection and inactivation of allergens in soybeans: A brief review of recent research advances. *Grain & Oil Science and Technology*, 4(4), 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2021.11.001> EDN: <https://elibrary.ru/xsoawf>
 11. Livak, K. J., & Schmittgen, T. D. (2001). Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2⁻($\Delta\Delta C_T$) Method. *Methods*, 25(4), 402-408. <https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262>

12. Ma, Y., Kan, G., Zhang, X., Wang, Y., Zhang, W., Du, H., & Yu, D. (2016). Quantitative Trait Loci (QTL) Mapping for Glycinin and β -Conglycinin Contents in Soybean (*Glycine max* L. Merr.). *J Agric Food Chem*, 64(17), 3473-3483. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00167>
13. Owczarzy, R., Tataurov, A. V., Wu, Y., Manthey, J. A., McQuisten, K. A., Almabrazi, H. G., Pedersen, K. F., Lin, Y., Garretson, J., McEntaggart, N. O., Sailor, C. A., Dawson, R. B., & Peek, A. S. (2008). IDT SciTools: a suite for analysis and design of nucleic acid oligomers. *Nucleic Acids Res*, 36(Web Server issue), W163-W169. <https://doi.org/10.1093/nar/gkn198>
14. Rio, D. C., Ares, M., Hannon, G. J., & Nilsen, T. W. (2010). Nondenaturing Agarose Gel Electrophoresis of RNA. *Cold Spring Harbor protocols*, pdb.prot5445. <https://doi.org/10.1101/pdb.prot5445>
15. Shea, Z., Singer, W., & Zhang, B. (2020). Soybean Production, Versatility, and Improvement. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91778>
16. Sui, X., Zhang, T., & Jiang, L. (2021). Soy protein: molecular structure revisited and recent advances in processing technologies. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12(1), 119-147. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-062220-104405> EDN: <https://elibrary.ru/dnsbtu>
17. Okonechnikov, K., Golosova, O., Fursov, M., & the UGENE team. (2012). Unipro UGENE: a unified bioinformatics toolkit. *Bioinformatics*, 28, 1166-1167. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts091> EDN: <https://elibrary.ru/pdnjnv>
18. Kim W, Kim S, Krishnan HB. Seed-Specific Silencing of Abundantly Expressed Soybean Bowman-Birk Protease Inhibitor Genes by RNAi Lowers Trypsin and Chymotrypsin Inhibitor Activities and Enhances Protein Digestibility. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(14):6943. <https://doi.org/10.3390/ijms26146943>
19. Wang, T., Qin, G.-X., Sun, Z.-W., & Zhao, Y. (2014). Advances of Research on Glycinin and β -Conglycinin: A Review of Two Major Soybean Allergenic Proteins. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54, 850-862. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.613534>
20. Xiang, N., Lyu, Y., Zhu, X., Bhunia, A. K., & Narsimhan, G. (2016). Methodology for identification of pore forming antimicrobial peptides from soy protein subunits β -conglycinin and glycinin. *Peptides*, 85, 27-40. PMID: 27612614. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2016.09.004> EDN: <https://elibrary.ru/xzcg>
21. Zhang, S., Du, H., Ma, Y., Li, H., Kan, G., & Yu, D. (2021). Linkage and association study discovered loci and candidate genes for glycinin and β -conglycinin in soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Theoretical and Applied Genetics*, 134(4), 1201-1215. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03766-6> EDN: <https://elibrary.ru/xkuijx>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Пензин Андрей Андреевич, научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
федеральный научный центр «Всероссийский научно-иссле-
довательский институт сои»*

*Игнатьевское ш., 19, г. Благовещенск, 675028, Российская Федерация
penzin9898@mail.ru*

Тимкин Павел Дмитриевич, младший научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
федеральный научный центр «Всероссийский научно-иссле-
довательский институт сои»*

*Игнатьевское ш., 19, г. Благовещенск, 675028, Российская Федерация
tpd@vniisoi.ru*

Котельников Данил Дмитриевич, лаборант

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
федеральный научный центр «Всероссийский научно-иссле-
довательский институт сои»*

*Игнатьевское ш., 19, г. Благовещенск, 675028, Российская Федерация
danil.kotelnikov.02@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Penzin, Researcher

*All-Russian Scientific Research Institute of Soybean
19, Ignatievskoe hw., Blagoveshchensk, 675028, Russian Federation
penzin9898@mail.ru*

Pavel D. Timkin, Junior Researcher

*All-Russian Scientific Research Institute of Soybean
19, Ignatievskoe hw., Blagoveshchensk, 675028, Russian Federation
tpd@vniisoi.ru*

Daniil D. Kotelnikov, Laboratory Assistant

*All-Russian Scientific Research Institute of Soybean
19, Ignatievskoe hw., Blagoveshchensk, 675028, Russian Federation
danil.kotelnikov.02@gmail.com*

Поступила 08.11.2024

После рецензирования 10.12.2024

Принята 19.12.2024

Received 08.11.2024

Revised 10.12.2024

Accepted 19.12.2024

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1442

EDN: FEZBTM

УДК 582.572.8(470.47)



Научная статья

ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ *TULIPA BIEBERSTEINIANA* SCHULT. ET SCHULT. FIL. (LILIACEAE) НА ЕРГЕНИНСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

*Н.Ц. Лиджиева, А.С. Очирова,
Ж.В. Овадыкова, С.Н. Прошкин*

Аннотация

Обоснование. Данное о возрастном составе популяций редких и исчезающих видов растений необходимы для изучения сукцессионных процессов, структуры растительных сообществ и жизненного состояния видов в условиях их естественного произрастания. Вид *Tulipa biebersteiniana* занесен в Красную книгу Калмыкии и ряда других регионов России и возрастная структура его ценопопуляций изучена недостаточно.

Цель. Изучение особенностей возрастной структуры ценопопуляций *Tulipa biebersteiniana* на Ергенинской возвышенности (в пределах Республики Калмыкия).

Материалы и методы. В пяти ценопопуляциях *T. biebersteiniana*, произрастающих на Ергенинской возвышенности проводили исследования в вегетационные сезоны 2022-2023 гг.

При анализе возрастной структуры популяций *T. biebersteiniana* рассчитывали ряд показателей: индекс восстановления (Iв), индекс индивидуального оптимума (I и.о.), коэффициент возрастности (Δ), индекс энергетической эффек-

тивности (ω). Произведена классификация ценопопуляций *T. biebersteiniana* по возрастной структуре при использовании ряда современных подходов. Произведена оценка уровня сходства возрастной структуры популяций с помощью показателя сходства (γ) и критерия идентичности (I).

Результаты. Определены частоты встречаемости растений разных возрастных состояний в ценопопуляциях *T. biebersteiniana*, среди которых преобладали виргинильные и зрелые генеративные особи. Построенные онтогенетические спектры популяций вида относились к двум типам. Вычисленные индексы, характеризующие онтогенетическую структуру ценопопуляций *T. biebersteiniana*, постепенно изменялись с северной части Ергенинской возвышенности к южной, коррелируя с клинальностью климатических факторов, особенно температуры воздуха. Условия второго года исследования с более низкими температурами воздуха в январе-апреле способствовали уменьшению в популяциях *T. biebersteiniana* доли особей генеративного периода и, соответственно, увеличению доли особей прегенеративного периода. Это обусловило возрастание их способности к восстановлению, но снижению значений индекса индивидуальной активности, коэффициента возрастности и индекса энергетической эффективности. Все исследованные ценопопуляции отнесены к нормальным и далее при детализации типа по классификации «дельта-омега» - к типам «зреющие» и «молодые». С помощью показателя сходства и критерия идентичности выявлено сходство онтогенетической структуры исследованных ценопопуляций. При этом уровень сходства онтогенетической структуры зависел от территориальной близости ценопопуляций в пределах Ергенинской возвышенности.

Заключение. Онтогенетическая структура ценопопуляций *T. biebersteiniana* на Ергенинской возвышенности укладывается в два онтогенетических типа. При продвижении с северной части возвышенности к южной происходило постепенное изменение ряда статистических показателей онтогенетической структуры популяции, что коррелировало с климатическими условиями года произрастания, особенно с клинальностью температуры воздуха. Степень сходства в возрастной структуре исследованных ценопопуляций *T. biebersteiniana* зависела от их территориальной удаленности.

Ключевые слова: *Tulipa biebersteiniana*; ценопопуляция; возрастная структура ценопопуляции; онтогенетический тип ценопопуляции

Для цитирования. Лиджиева, Н. Ц., Очирова, А. С., Овадыкова, Ж. В., Прошкин, С. Н. (2025). Возрастная структура ценопопуляций *Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil. (Liliaceae) на Ергенинской возвышенности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 71-89. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1442>

Original article

THE AGE STRUCTURE OF THE COENOPOPULATIONS OF *TULIPA BIEBERSTEINIANA* SCHULT. ET SCHULT. FIL. (LILIACEAE) ON THE ERGENINSKY UPLAND

*N.Ts. Lidzhieva, A.S. Ochirova,
Zh.V. Ovadykova, S.N. Proshkin*

Abstract

Background. Data on the age composition of populations of rare and endangered plant species are necessary for studying succession processes, the structure of plant communities and the life status of species in their natural habitat. The species *Tulipa biebersteiniana* is listed in the Red Book of Kalmykia and a number of other regions of Russia and the age structure of its coenopopulations has not been sufficiently studied.

Purpose. Study of the features of the age structure of *Tulipa biebersteiniana* coenopopulations on the Yergeni Upland (within the Republic of Kalmykia).

Materials and methods. In five coenopopulations of *T. biebersteiniana* growing on the Ergeninsky upland, studies were conducted during the growing seasons of 2022-2023.

When analyzing the age structure of *T. biebersteiniana* populations, a number of indicators were calculated: the recovery index (Ib), the index of individual optimum (I.I.O.), the age coefficient (Δ), the energy efficiency index (ω). The classification of *T. biebersteiniana* cenopopulations by age structure was carried out using a number of modern approaches. The level of similarity of the age structure of populations was estimated using the similarity index (r) and the identity criterion (I) according.

Results. The frequency of occurrence of plants of different age conditions in the coenopopulations of *T. biebersteiniana*, among which virginal and mature generative individuals prevailed, was determined. The constructed ontogenetic spectra of the populations of the species belonged to two types. The calculated indices characterizing the ontogenetic structure of *T. biebersteiniana* cenopopulations gradually changed from the northern part of the Ergeninsky upland to the southern one, correlating with the clinality of climatic factors, especially air temperature. The conditions of the second year of the study with lower air temperatures in January-April contributed to a decrease in the proportion of individuals of the generative period in *T. biebersteiniana* populations and, accordingly, an increase in the proportion of individuals of the

pregenerative period. This led to an increase in their ability to recover, but a decrease in the values of the index of individual activity, the age coefficient and the energy efficiency index. All the studied cenopopulations are classified as normal and further, when detailing the type according to the “delta-omega” classification, they are classified as “maturing” and “young” types. Using the similarity index and the identity criterion, the similarity of the ontogenetic structure of the studied cenopopulations was revealed. At the same time, the level of similarity of the ontogenetic structure depended on the territorial proximity of the cenopopulations within the Ergeninsky upland.

Conclusion. The ontogenetic structure of *T. biebersteiniana* cenopopulations on the Ergeninsky upland fits into two ontogenetic types. As we moved from the northern part of the upland to the southern, there was a gradual change in a number of statistical indicators of the ontogenetic structure of the population, which correlated with the climatic conditions of the year of growth, especially with the climaticity of air temperature. The degree of similarity in the age structure of the studied coenopopulations of *T. biebersteiniana* depended on their territorial remoteness.

Keywords: *Tulipa biebersteiniana*; coenopopulation; age structure of coenopopulation; ontogenetic type of coenopopulation

For citation. Lidzhieva, N. Ts., Ochirova, A. S., Ovadykova, Zh. V., & Proshkin, S. N. (2025). The age structure of the coenopopulations of *Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil. (Liliaceae) on the Ergeninsky Upland. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 71-89. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1442>

Сохранение биологического разнообразия является одной из глобальных проблем современности. В рамках оценки состояния редких и исчезающих видов растений одним из ключевых аспектов является анализ возрастного состава их популяций, который активно разрабатывается в популяционной экологии [7; 17; 22; 24; 27]. Данный подход по мнению ряда авторов эффективен при изучении сукцессионных процессов, структуры растительных сообществ и жизненного состояния видов в условиях их естественного произрастания [6; 26; 29].

Объектом нашего исследования является восточноевропейско-среднеазиатский степной вид Тюльпан Биберштейна - *Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil., имеющий сильно фрагментированный ареал и сокращающуюся численность [10]. Вид является редким для региона и включен в Красную книгу Республики Калмыкия [11] с категорией редкости 3 – «редкий вид». В сопредельных регионах занесен в списки охраняемых видов Ставропольского края [12], Астраханской области [9].

Описание онтогенеза *Tulipa biebersteiniana* имеется в работах Д.Е. Янишевского [25], В.В. Скрипчинского [20], Диагнозы и ключи... [2], О.Н. Диденко [3]. Однако онтогенетическая структура ценопопуляций *Tulipa biebersteiniana* несмотря на его обширный ареал изучена только на Южном Урале [14; 15]. В то время как данные возрастной структуре ценопопуляций весьма актуальны при оценке состоянии перспектив динамики самих популяций, а также связанных с ними компонентов растительных сообществ, особенно учитывая, что нагрузка на окружающую среду для растений разных возрастных групп различна [17].

Цель исследования – характеристика особенностей возрастной структуры ценопопуляций *Tulipa biebersteiniana* на Ергенинской возвышенности (в пределах Республики Калмыкия).

Материал и методы исследования

Исследование проводили в вегетационные сезоны 2022-2023 гг. в период массового цветения растений в пяти ценопопуляциях *T. biebersteiniana* из разных растительных сообществ, произрастающих на Ергенинской возвышенности. Исследуемая территория находится в зоне пустынных степей. В работе применяли общепринятую методику геоботанических описаний, используя для названия сообществ доминантный подход [1; 13; 21]. На Ергенинской возвышенности, в северной части исследовали:

- ценопопуляцию 1 в составе разнотравно-ковылково-лерхопопынного (*Artemisia lerchiana* – *Stipa lessingiana* – *Mixteherbosa*) сообщества;
- ценопопуляцию 2 в составе злаково-прутьяково-лерхопопынного (*Artemisia lerchiana* – *Kochia prostrata* – *Poaceta*) сообщества.

В центральной части Ергеней - ценопопуляцию 3 в составе разнотравно-злаково-прутьяково-лерхопопынного (*Artemisia lerchiana* – *Kochia prostrata* – *Poaceta* – *Mixteherbosa*) сообщества.

В южной части возвышенности исследовали:

- ценопопуляцию 4 в составе разнотравно-полынно-лерхопопынного (*Artemisia lerchiana* – *Artemisia austriaca* – *Mixteherbosa*) сообщества;
- ценопопуляцию 5 в составе разнотравно-злаково-сантониннопопынного (*Artemisia santonica* – *Poaceta* – *Mixteherbosa*) сообщества.

Перечисленные растительные сообщества приурочены преимущественно к светло-каштановым почвам разной степени засоления и занимают значительные по площади равнинные территории, в пределах которых отмечали микро- и нанопонижения, сусликовины и другие неровности рельефа.

Онтогенетические состояния *T. biebersteiniana* выявляли в полевых условиях на вегетирующих особях, используя общепринятые подходы и методы [3; 7; 16; 22; 24]. В каждой из 5 ценопопуляций трансекту из 10 участков размером 50 x 50 см² закладывали в наиболее типичных местах произрастания вида в сообществе [7; 24]. В пределах этих участков производили прижизненный учет возрастных состояний особей. Полученные результаты представляли в виде возрастных спектров, классификацию которых производили по Л.Б. Заугольной [7] и по Л.А. Животовскому [4; 29; 30].

Для характеристики возрастной структуры популяций, учитывая специфику жизненной формы *T. biebersteiniana*, рассчитывали следующие показатели: индекс восстановления (Iв) [6; 7]; индекс индивидуального оптимума (I и.о.); коэффициент возрастности (Δ) [5; 17]; индекс энергетической эффективности (ω) [5].

При классификации ценопопуляций по возрастной структуре исходили из представлений Т.А. Работнова [16] с последующим дополнением Л.П. Рысиной и Т.Н. Казанцевой [19]. Детализацию типа нормальной популяции осуществляли по классификациям Л.А. Жуковой и Н.М. Ермаковой [6], А.А. Уранова и О.В. Смирновой [23], а также классификации «дельта – омега» Л.А. Животовского [5].

Уровень сходства возрастной структуры популяций оценивали с помощью показателя сходства (r) и критерия идентичности (I) по Л.А. Животовскому [4; 29; 30]. Статистическую обработку данных производили с помощью пакета программ для анализа онтогенетических спектров в Excel (ExOS), разработанного Л.А. Животовским [4; 29; 30].

Климатические условия в период исследования характеризовали по данным архива погоды сайта «Расписание погоды» [2024] для ближайших населенных пунктов: для ценопопуляций 1 и 2 по метеостанции пос. Малые Дербеты, для ценопопуляции 3 по метеостанции г. Элисты, для ценопопуляций 4 и 5 - по метеостанции пос. Ики-Бурул.

Результаты исследования

При изучении луковичных эфемероидов, к которым относится *T. biebersteiniana*, исследования проводили на живом материале, не производя выкапывания луковиц. Это затрудняет определение возрастного состояния растения. В связи с этим не были выявлены растения сенильного периода, что согласуется с данными ряда авторов, изучавших виды тюльпанов [8; 14; 15; 28]. У *T. biebersteiniana* из четырех возрастных периодов выделяемых у растений Т.А. Работновым [16], отмечали 2: прегенератив-

ный период с четырьмя возрастными состояниями и генеративный период – в два.

В ценопопуляциях *T. biebersteiniana* с разной частотой встречались особи, находящиеся в возрастных состояниях проростков (р), ювенильных (j), имматурных (im), виргинильных (v), молодых генеративных (g_1), зрелых генеративных (g_2). В 2022 г. в ценопопуляциях 1 и 2 в северной части Ергенинской возвышенности наибольшую частоту имели зрелые генеративные особи – 55,8% и 48,8% соответственно (табл. 1).

Таблица 1.

**Частота встречаемости растений разных возрастных состояний
в ценопопуляциях *Tulipa biebersteiniana***

Ценопопуляция	Год	р		j		im		v		g_1		g_2	
		%	$S_{\%}$	%	$S_{\%}$	%	$S_{\%}$	%	$S_{\%}$	%	$S_{\%}$	%	$S_{\%}$
№1	2022	0,0	0,00	0,0	0,00	12,3	2,7	30,4	3,7	1,4	1,0	55,8	4,0
	2023	0,0	0,00	3,5	1,39	10,4	2,32	34,7	3,62	1,7	0,99	49,7	3,80
№2	2022	0,0	0,00	0,0	0,00	9,8	4,63	41,5	7,69	0,0	0,00	48,8	7,81
	2023	0,0	0,00	0,0	0,00	12,5	3,90	45,8	5,87	0,0	0,00	41,7	5,81
№3	2022	0,0	0,00	0,0	0,00	4,6	1,70	54,6	4,04	2,0	1,13	38,8	3,95
	2023	0,0	0,00	9,4	2,18	20,0	2,98	40,0	3,65	1,7	0,95	28,9	3,38
№4	2022	0,0	0,00	1,9	0,95	11,1	2,17	49,0	3,47	2,4	1,06	35,6	3,32
	2023	1,8	0,73	11,2	1,73	15,7	2,00	40,8	2,70	2,7	0,89	27,8	2,46
№5	2022	0,0	0,00	4,9	1,24	14,5	2,02	48,7	2,87	0,0	0,00	31,9	2,67
	2023	8,6	1,37	16,0	1,79	13,1	1,65	41,5	2,41	0,0	0,00	20,8	1,98

В ценопопуляциях из центральной и южной частей возвышенности максимум частоты пришелся на виргинильных особей (48,7 – 54,6%). В 2023 г. в ценопопуляции 1 частота зрелых генеративных особей продолжала оставаться наибольшей (49,7%), в то время как в остальных исследованных ценопопуляциях преобладали виргинильные особи (40,0 – 45,8%).

Обсуждение результатов

Поскольку фитоценоотические и эдафические условия в местах произрастания популяций *T. biebersteiniana* были относительно постоянными, то их возрастной состав был сопоставлен с такими основными показателями погоды, как среднемесячные температура воздуха и сумма осадков января-апреля, от которых особенно зависят рост и развитие растений вида. Средняя за четыре первых месяца года температура воздуха в 2023 г. была ниже, чем в 2022 г. на 0,3 – 0,9 °C по всей территории Ергенинской

возвышенности в пределах Калмыкии. Суммарный объем осадков в этот период в северной части Ергеней был меньше на 10,3 мм, в то время как в центральной и южной частях – больше на 28,9 – 43,2 мм (табл. 2).

Таблица 2.

Среднемесячная температура воздуха и сумма выпавших осадков января-апреля в местах локализации ценопопуляций *T. biebersteiniana* [18]

Ближайшая метеостанция	Ценопопуляция	Температура (°C)		Сумма осадков (мм)	
		2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Малые Дербеты	1, 2	3,1	2,2	98,7	88,4
Элиста	3	3,2	2,9	96,6	125,5
Ики-Бурул	4, 5	4,1	3,7	91,4	140,6

Из данных двух показателей климата частота встречаемости особей разных возрастных периодов больше коррелировала с температурой воздуха следующим образом: чем ниже среднемесячная температура января-апреля в год исследования, тем меньше частота особей генеративного периода и, соответственно, больше частота особей генеративного периода. Так доля особей генеративного периода в 2023 г. меньше, чем в 2022 г. в ценопопуляции 1 на 5,8%, в ценопопуляции 2 - на 7,1%, в ценопопуляции 3 - на 10,2%, в ценопопуляции 4 - на 7,5%, в ценопопуляции 5 на 11,1% ($t_{\text{diff}} = 3,34$, при $P < 0,05$) (рис. 1).

Возрастные спектры ценопопуляций *T. biebersteiniana* по Л.Б. Заугольной [7] в северной части Ергенинской возвышенности ценопопуляции 1 и 2 в первый год исследования были центрированными (тип 2), на следующий год ценопопуляция 2 стала левосторонней (тип 1) из-за возрастания в ней доли прегенеративных особей (рис. 1). В ценопопуляциях 3-5, произрастающих в центральной и южной частях возвышенности в оба года исследования возрастной спектр левосторонний.

На Ергенинской возвышенности способность ценопопуляций *T. biebersteiniana* к самовозобновлению, оцененная индексом восстановления, варьировала в довольно широких пределах – от слабой до интенсивной ($I_v = 3,816$) (табл. 3). В 2022 г. наименьшую способность к самоподдержанию ($I_v = 0,747$) отмечали в ценопопуляции 1 в северной части Ергеней, наибольшую ($I_v = 2,134$) - в ценопопуляции 5 в ее южной части. В ценопопуляциях 2-4, расположенных между ними, отмечали умеренную способность к восстановлению ($I_v = 1,050 - 1,633$). В условиях 2023 г. также отмечали возрастание значений индекса с северной части возвышенности к южной, однако слабую и умеренную способность к

самоподдержанию отмечали только в северной части возвышенности, в ценопопуляциях 1 и 2 соответственно. Ценопопуляции, произрастающие в центральной и южной частях Ергеней обнаруживали интенсивное восстановление ($I_v = 2,273 - 3,816$).

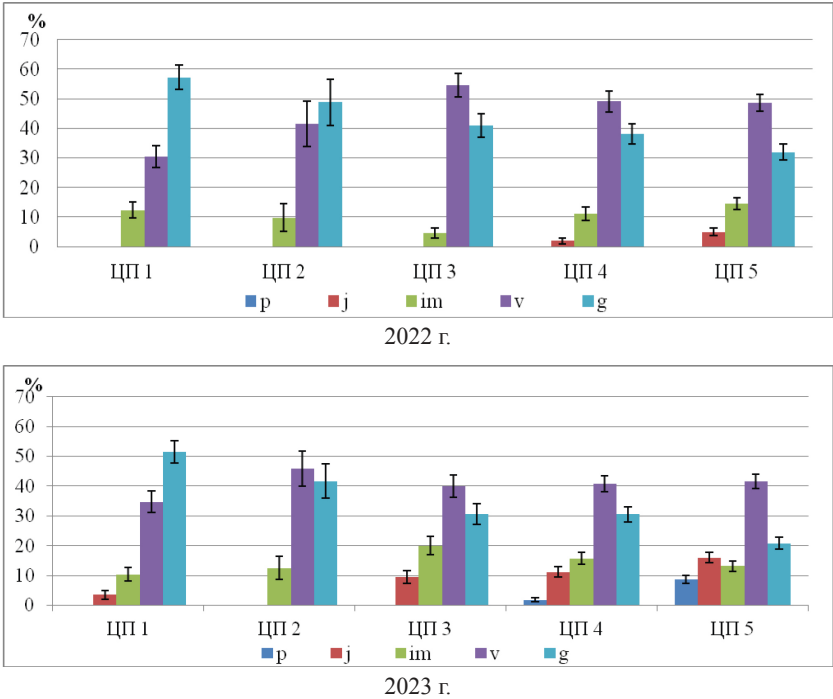


Рис. 1. Возрастной спектр ценопопуляций *Tulipa biebersteiniana* по Л.Б. Заугольной (1976)

Таблица 3.

Статистические показатели онтогенетической структуры ценопопуляций *Tulipa biebersteiniana* и их типы

Ценопопуляция	Год	Iв	I и.о.	Δ	ω	Тип популяции по классификации «Δ - ω»
1	2022	0,747	0,653	0,325	0,719	Зреющая
	2023	0,944	0,597	0,300	0,678	Зреющая
2	2022	1,050	0,540	0,298	0,680	Зреющая
	2023	1,400	0,477	0,269	0,632	Зреющая

3	2022	1,452	0,428	0,267	0,641	Зреющая
	2023	2,273	0,433	0,208	0,513	Молодая
4	2022	1,633	0,437	0,248	0,602	Промежуточная
	2023	2,277	0,428	0,204	0,507	Молодая
5	2022	2,134	0,396	0,225	0,553	Молодая
	2023	3,816	0,334	0,163	0,419	Молодая

Таким образом, в оба года исследования происходило возрастание способности популяций *T. biebersteiniana* к восстановлению при продвижении с северной части возвышенности, через ее центральную часть к южному краю. Такая динамика показателя коррелирует с ходом температуры воздуха - среднемесячной в январе-марте и годовой амплитудой, которая также при продвижении с севера на юг возвышенности имела клинальную изменчивость. В то время как динамика суммарного объема осадков в годы исследования в пределах Ергеней была разной. При продвижении с севера на юг Ергенинской возвышенности суммарный объем осадков в 2022 г. уменьшался от 98,7 мм до 91,4 мм, в 2023 г. он, напротив, увеличивался от 88,4 мм до 140,6 мм.

Ценопопуляции 1-5, произрастающие в разных частях Ергенинской возвышенности относились к нормальным (по классификации Т.А. Работнова [16] и неполночленным (по классификации А.А. Уранова [22]), поскольку в них не были отмечены сенильные особи, в некоторых – проростки и ювенильные формы.

По критерию зрелости [6; 23] все 5 исследованных ценопопуляций *T. biebersteiniana* были отнесены к типу «зрелые» в связи с значительным преобладанием среди взрослых растений средневозрастных генеративных особей.

По классификации «дельта-омега» [5] ценопопуляции *T. biebersteiniana* относились к 2 типам: «молодые» и «зреющие». При этом в разных климатических условиях последовательных годов могло произойти изменение типа.

В 2022 г. популяции, произрастающие в северной и центральной частях возвышенности относились к зреющим. В южной части Ергеней ценопопуляция 4 имела промежуточное положение между типами «зреющая» и «молодая», а ценопопуляция 5 относилась к типу «молодая» (рис. 2).

В 2023 г. по сравнению с 2022 г. значения коэффициента возрастности в ценопопуляциях уменьшилось на 0,025-0,163, индекса эффективности - на 0,041-0,134, что привело к тому, что в пределах типа «зреющие» остались ценопопуляции 1 и 2 с северной части Ергеней, ценопопуляция 3 с центральной ее части вместе с ценопопуляциями, произрастающими в ее южной части, стала относиться к типу «молодая»

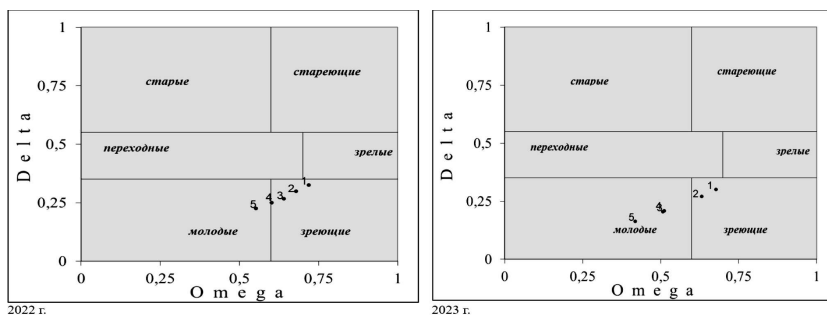


Рис. 2. Типы популяций *Tulipa biebersteiniana* по классификации «дельта-омега» [5]: 1-5 – ценопопуляции

Показатель сходства (r) ценопопуляций *T. biebersteiniana* варьировал в 2022 г. от 0,940 до 0,987, в 2023 г. - от 0,859 до 0,989 (табл. 4). В большинстве вариантов попарного сравнения популяций показатель сходства не существенно отличался от 1, что свидетельствует об отсутствии их различий в отношении возрастной структуры. При этом наибольшее сходство обнаружили ценопопуляции 1 и 2 ($r = 0,987$), произрастающие в северной части Ергенинской возвышенности, ценопопуляции 4 и 5 ($r = 0,983$) – в южной ее части, а также ценопопуляции 3 и 4 ($r = 0,982$), которые располагались в центральной и южной частях возвышенности, но территориально были друг к другу ближе, чем с другими. Наименьшие значения показатель сходства наблюдали в вариантах сравнения ценопопуляции 5 – самой южной из исследуемых с ценопопуляциями с северной и южной частей возвышенности.

Таблица 4.

Сравнение возрастной структуры ценопопуляций *T. biebersteiniana*

Варианты сравнения ценопопуляций	Год	Показатели				
		r	$d=1-r$	s_r, s_d	I	Уровень значимости
1-2	2022	0,987	0,013	0,035	0,339	0,987
	2023	0,968	0,032	0,036	1,306	0,860
1-3	2022	0,965	0,035	0,049	2,045	0,734
	2023	0,970	0,030	0,041	2,124	0,713
1-4	2022	0,967	0,033	0,040	2,177	0,704
	2023	0,960	0,040	0,039	3,672	0,453
1-5	2022	0,940	0,060	0,045	4,526	0,340
	2023	0,892	0,108	0,053	10,569	0,032

2-3	2022	0,978	0,022	0,07	0,573	0,967
	2023	0,933	0,067	0,049	2,748	0,601
2-4	2022	0,971	0,029	0,039	0,784	0,941
	2023	0,913	0,087	0,040	4,125	0,389
2-5	2022	0,963	0,037	0,045	1,081	0,898
	2023	0,859	0,142	0,047	6,955	0,138
3-4	2022	0,982	0,018	0,026	1,279	0,870
	2023	0,989	0,011	0,015	1,063	0,900
3-5	2022	0,949	0,051	0,038	4,225	0,390
	2023	0,937	0,063	0,033	6,306	0,178
4-5	2022	0,983	0,017	0,022	1,699	0,792
	2023	0,969	0,032	0,026	4,660	0,325

Это же заключение сделано на основании анализа критерия идентичности, который изменялся в 2022 г. от 0,339 до 4,526, в 2023 г. – от 1,063 до 10,569. Значение данного критерия во всех, за исключением одного, вариантах сравнения меньше табличного значения хи-квадрат – 9,49, при числе степеней свободы ($m' = 4$). Крайние из исследованных ценопопуляций – 1 и 5 в северной и в южной части Ергеней соответственно имели значимое различие в возрастной структуре, но только в 2023 г. В этом варианте сравнения отмечали наибольшее значение критерия идентичности, равное 10,569.

Заключение

Онтогенетическая структура ценопопуляций *T. biebersteiniana* на Ерепинской возвышенности укладывается в два онтогенетических типа. При продвижении с северной части возвышенности к южной происходило постепенное изменение ряду статистических показателей онтогенетической структуры популяции, что коррелировало с климатическими условиями года произрастания, особенно с клинальностью температуры воздуха. Степень сходства в возрастной структуре исследованных ценопопуляций *T. biebersteiniana* зависела от их территориальной удаленности.

Изменение частоты встречаемости в популяции особей разных возрастных групп в последовательные годы исследования можно, по-видимому, рассматривать как адаптивную реакцию онтогенетической структуры популяции, как системы, и она у *T. biebersteiniana* в связи со спецификой жизненной формы вида, не всегда выражается в возрастании частоты более продвинутых в онтогенезе возрастных состояний.

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

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 23-24-10012.

Список литературы

1. Александрова, В. Д. (1969). *Классификация растительности: обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах*. Ленинград: Наука. 275 с.
2. *Диагнозы и ключи возрастных состояний лесных растений. Эфемероиды* / отв. ред. Т. Г. Соколова. (1987). Москва: МПГИ им. Ленина. 809 с.
3. Диденко, Е. Н. (2008). Онтогенетические состояния видов *Tulipa* в Оренбургской области. *Вестник Оренбургского государственного университета*, (S 87), 39-44. EDN: <https://elibrary.ru/jkfwhl>
4. Животовский, Л. А. (2023а). О типизации ценопопуляций растений по онтогенетическим спектрам. *Сибирский экологический журнал*, 30(3), 227-237. <https://doi.org/10.15372/SEJ20230301> EDN: <https://elibrary.ru/kksgge>
5. Животовский, Л. А. (2001). Онтогенетические состояния, эффективная плотность и классификация популяций растений. *Экология*, (1), 3-7. EDN: <https://elibrary.ru/klqnc1>
6. Жукова, Л. А., & Ермакова, И. М. (1967). Изменение возрастного состава популяций луговика дернистого (*Deschampsia caespitosa* P.B.) на пойменных и материковых лугах Московской области. В: А. А. Уранов (ред.), *Онтогенез и возрастной состав популяций цветковых растений* (с. 114-131). Москва: Наука.
7. Заугольнова, Л. Б., Жукова, Л. А., Комаров, А. С., & Смирнова, О. В. (1988). *Ценопопуляции растений (очерки популяционной биологии)*. Москва: Наука. 236 с. EDN: <https://elibrary.ru/recnif>
8. Кашин, А. С., Петрова, Н. А., Шилова, И. В., Корнеев, М. Г., & Ермолаева, Н. Н. (2014). Структура ценопопуляций *Tulipa gesneriana* L. (Liliaceae) в Саратовской области. *Биоразнообразие аридных экосистем*, 86-105. EDN: <https://elibrary.ru/txyvjd>
9. *Красная книга Астраханской области. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения объекты животного и растительного мира* (2014). Астрахань: Астраханский университет. 413 с.
10. *Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы* (2017). Краснодар: Администрация Краснодарского края. 850 с.
11. *Красная книга Республики Калмыкия*. Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения растения и грибы (2014). Элиста: Джангар. 199 с.

12. *Красная книга Ставропольского края. Растения*. Т. 1 (2013). Ставрополь: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Ставропольского края. 399 с.
13. Миркин, Б. М., Наумова, Л. Г., Соломещ, А. И. (2001). *Современная наука о растительности*. Москва: Логос. 264 с.
14. Мухаметшина, Л. В., Ишмуратова, М. М., Муллабаева, Э. З. (2015). Особенности биологии и ценопопуляционные характеристики видов рода *Tulipa* на Южном Урале. *Вестник Удмуртского университета*, 25(2), 101-108.
15. Мухаметшина, Л. В., Муллабаева, Э. З., Ишмуратова, М. М. (2013). Демографическая характеристика видов рода *Tulipa* L. на Южном Урале. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 15(3(4)), 1398-1401. EDN: <https://elibrary.ru/saenut>
16. Работнов, Т. А. (1950a). Вопросы изучения состава популяций для целей фитоценологии. В: *Проблемы ботаники* (т. 1, с. 465-483). Ленинград.
17. Работнов, Т. А. (1950б). Жизненный цикл многолетних травянистых растений в луговых ценозах. *Труды БИН АН СССР. Сер. III. Геоботаника*, вып. 6, 7-204.
18. *Расписание погоды* [Электронный ресурс]. URL: <https://tp5.ru/> (дата обращения: 22.07.2024).
19. Рысин, Л. П., Казанцева, Т. Н. (1975). Метод ценопопуляционного анализа в геоботанических исследованиях. *Ботанический журнал*, 60(2), 199-209. EDN: <https://elibrary.ru/iudrla>
20. Скрипчинский, В. В., & Скрипчинский, Вл. В. (1965). Годичные циклы морфогенеза некоторых видов Лилейных Ставрополя и их значение для теории онтогенеза. *Бюллетень МОИП. Отдел биологии*, 70(1), 85-102.
21. Уиттекер, Р. (1980). *Сообщества и экосистемы*. Москва: Прогресс. 328 с.
22. Уранов, А. А. (1975). Возрастной спектр фитоценопопуляций как функция времени и энергетических волновых процессов. *Биологическая наука*, (2), 7-34. EDN: <https://elibrary.ru/skglep>
23. Уранов, А. А., & Смирнова, О. В. (1969). Классификация и основные черты развития популяций многолетних растений. *Бюллетень МОИП. Отдел биологии*, LXXIV, 119-134. EDN: <https://elibrary.ru/rexsvl>
24. *Ценопопуляции растений (основные понятия и структура)* / Отв. ред. А. А. Уранов, Т. И. Серебрякова (1976). Москва: Наука. 217 с.
25. Янишевский, Д. Е. (1934). Из жизни тюльпанов на нижней Волге. *Советская ботаника*, (3), 72-103.
26. Abduraimov, O. S., Shomurodov, H. F., & Daniyarov, S. A. (2020). Ontogenetic Structure of Ceonopopulations of *Tulipa korolkowii* Regel. *Journal of Botanical Research*, 2(4), 7-14.

27. Harper, J. L. (1977). *Population Biology of Plants*. London: Academic Press. 892 p.
28. Kashin, A. S., et al. (2016). State of cenopopulations and morphological variability of *Tulipa gesneriana* (Liliaceae) in the northern Lower Volga region. *Botanicheskiĭ Zhurnal*, 101(12), 1430-1465. <https://doi.org/10.1134/S0006813616120061> EDN: <https://elibrary.ru/xwvdjv>
29. Zhivotovsky, L. A. (2023a). ExOS: Excel package for the analysis of ontogenetic spectra of plant populations. *Contemporary Problems of Ecology*, 16(6), 720-725. <https://doi.org/10.1134/s1995425523060227> EDN: <https://elibrary.ru/tpwxcr>
30. Zhivotovsky, L. A. (2023b). Typification of plant populations on the basis of their ontogenetic spectra. *Contemporary Problems of Ecology*, 16(3), 265-273. <https://doi.org/10.1134/s1995425523030137> EDN: <https://elibrary.ru/ahwryf>

References

1. Aleksandrova, V. D. (1969). *Classification of vegetation: review of classification principles and classification systems in different geobotanical schools*. Lenin-grad: Nauka, 275 p.
2. *Diagnoses and keys of age states of forest plants. Ephemeroids* / ed. by T. G. Sokolova. (1987). Moscow: MPGI named after Lenin, 809 p.
3. Didenko, E. N. (2008). Ontogenetic states of *Tulipa* species in the Orenburg region. *Bulletin of Orenburg State University*, (S 87), 39-44. EDN: <https://elibrary.ru/jkfwhl>
4. Zhivotovsky, L. A. (2023a). On the typification of plant coenopopulations based on ontogenetic spectra. *Siberian Journal of Ecology*, 30(3), 227-237. <https://doi.org/10.15372/SEJ20230301> EDN: <https://elibrary.ru/kksgge>
5. Zhivotovsky, L. A. (2001). Ontogenetic states, effective density and classification of plant populations. *Ecology*, (1), 3-7. EDN: <https://elibrary.ru/klqncl>
6. Zhukova, L. A., & Ermakova, I. M. (1967). Changes in age composition of populations of *Deschampsia caespitosa* P.B. in floodplain and mainland meadows of the Moscow region. In: A. A. Uranov (ed.), *Ontogenesis and age composition of populations of flowering plants* (pp. 114-131). Moscow: Nauka.
7. Zaugolnova, L. B., Zhukova, L. A., Komarov, A. S., & Smirnova, O. V. (1988). *Cenopopulations of plants (essays on population biology)*. Moscow: Nauka, 236 p. EDN: <https://elibrary.ru/recnif>
8. Kashin, A. S., Petrova, N. A., Shilova, I. V., Korneev, M. G., & Ermolaeva, N. N. (2014). Structure of coenopopulations of *Tulipa gesneriana* L. (Liliaceae) in the Saratov region. *Biodiversity of arid ecosystems*, 86-105. EDN: <https://elibrary.ru/txyvjid>

9. *Red Data Book of the Astrakhan Region. Rare and endangered species of flora and fauna* (2014). Astrakhan: Astrakhan University, 413 p.
10. *Red Data Book of Krasnodar Krai. Plants and Fungi* (2017). Krasnodar: Administration of Krasnodar Krai, 850 p.
11. *Red Data Book of the Republic of Kalmykia. Vol. 2. Rare and endangered plants and fungi* (2014). Elista: Dzhangar, 199 p.
12. *Red Data Book of Stavropol Krai. Plants. Vol. 1* (2013). Stavropol: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of Stavropol Krai, 399 p.
13. Mirkin, B. M., Naumova, L. G., Solomeshch, A. I. (2001). *Modern science of vegetation*. Moscow: Logos, 264 p.
14. Mukhametshina, L. V., Ishmuratova, M. M., Mullabaeva, E. Z. (2015). Biological features and coenopopulation characteristics of Tulipa species in the Southern Urals. *Bulletin of Udmurt University*, 25(2), 101-108.
15. Mukhametshina, L. V., Mullabaeva, E. Z., Ishmuratova, M. M. (2013). Demographic characteristics of Tulipa L. species in the Southern Urals. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 15(3(4)), 1398-1401. EDN: <https://elibrary.ru/saenut>
16. Rabotnov, T. A. (1950a). Issues of studying population composition for phytocenological purposes. In: *Problems of Botany* (Vol. 1, pp. 465-483). Leningrad.
17. Rabotnov, T. A. (1950b). Life cycle of perennial herbaceous plants in grassland coenoses. *Proceedings of the Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences. Ser. III. Geobotany*, Issue 6, 7-204.
18. Weather Schedule [Electronic resource]. URL: <https://rp5.ru/> (Accessed: 22.07.2024).
19. Rysin, L. P., Kazantseva, T. N. (1975). Method of coenopopulation analysis in geobotanical research. *Botanical Journal*, 60(2), 199-209. EDN: <https://elibrary.ru/iudrla>
20. Skripchinsky, V. V., & Skripchinsky, Vl. V. (1965). Annual cycles of morphogenesis in some Liliaceae species of Stavropol region and their significance for the theory of ontogenesis. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biology Section*, 70(1), 85-102.
21. Whittaker, R. (1980). *Communities and ecosystems*. Moscow: Progress, 328 p.
22. Uranov, A. A. (1975). Age spectrum of phytocoenopopulations as a function of time and energy wave processes. *Biological Science*, (2), 7-34. EDN: <https://elibrary.ru/skglep>
23. Uranov, A. A., & Smirnova, O. V. (1969). Classification and main features of development of perennial plant populations. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biology Section*, LXXIV, 119-134. EDN: <https://elibrary.ru/rexsvl>

24. *Cenopopulations of plants (basic concepts and structure)* / Ed. by A. A. Uranov, T. I. Serebryakova (1976). Moscow: Nauka, 217 p.
25. Yanishevsky, D. E. (1934). On the life of tulips in the Lower Volga region. *Soviet Botany*, (3), 72-103.
26. Abduraimov, O. S., Shomurodov, H. F., & Daniyarov, S. A. (2020). Ontogenetic Structure of Cenopopulations of *Tulipa korolkowii* Regel. *Journal of Botanical Research*, 2(4), 7-14.
27. Harper, J. L. (1977). *Population Biology of Plants*. London: Academic Press. 892 p.
28. Kashin, A. S., et al. (2016). State of cenopopulations and morphological variability of *Tulipa gesneriana* (Liliaceae) in the northern Lower Volga region. *Botanicheskiy Zhurnal*, 101(12), 1430-1465. <https://doi.org/10.1134/S0006813616120061> EDN: <https://elibrary.ru/xwvdjv>
29. Zhivotovsky, L. A. (2023a). ExOS: Excel package for the analysis of ontogenetic spectra of plant populations. *Contemporary Problems of Ecology*, 16(6), 720-725. <https://doi.org/10.1134/s1995425523060227> EDN: <https://elibrary.ru/tpwxcr>
30. Zhivotovsky, L. A. (2023b). Typification of plant populations on the basis of their ontogenetic spectra. *Contemporary Problems of Ecology*, 16(3), 265-273. <https://doi.org/10.1134/s1995425523030137> EDN: <https://elibrary.ru/ahwryf>

ВКЛАД АВТОРОВ

Лиджиева Н.Ц.: написание текста статьи, редактирование.

Очирова А.С.: получение данных, анализ полученных данных.

Овадыкова Ж.В.: обзор публикаций по теме статьи.

Прошкин С.Н.: получение данных, анализ полученных данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Nina Ts. Lidzhieva: article editing.

Aleksandra S. Ochirova: obtaining data.

Zhanna V. Ovadykova: reviewing of publications of the article's theme.

Sergey N. Proshkin: obtaining data, analysis.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Лиджиева Нина Цереновна, д.б.н., профессор кафедры биологии и экологии
Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное
учреждение высшего образования «Калмыцкий государственный
университет имени Б.Б. Городовикова»
ул. Пушкина, 11. г. Элиста, 358009, Российская Федерация
for-lidzhieva@yandex.ru

Очирова Александра Сергеевна, аспирант

*Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова»
ул. Пушкина, 11. г. Элиста, 358009, Российская Федерация
ochirowa.alex@yandex.ru*

Овадыкова Жанна Васильевна, кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры агрономии

*Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова»
ул. Пушкина, 11. г. Элиста, 358009, Российская Федерация
zhanna_ovadykova@mail.ru*

Прошкин Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, доцент
кафедры биологии и экологии

*Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова»
ул. Пушкина, 11. г. Элиста, 358009, Российская Федерация
proshkin.sergey2011@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS**Nina Ts. Lidzhieva**, Doctor of Biology, Professor of the Department of Biology and Ecology

*Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikova
11, Pushkin Str., Elista, 358009, Russian Federation
for-lidjieva@yandex.ru
SPIN-code: 3661-2682
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2668-698X>*

Aleksandra S. Ochirova, Postgraduate Student

*Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikova
11, Pushkin Str., Elista, 358009, Russian Federation
ochirowa.alex@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9924-3368>*

Zhanna V. Ovadykova, Candidate of Agriculture, Associate Professor of the Department of Agronomy

Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikova
11, Pushkin Str., Elista, 358009, Russian Federation
zhanna_ovadykova@mail.ru
SPIN-code: 8079-8320
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7539-6909>

Sergey N. Proshkin, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
of the Department of Biology and Ecology
Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikova
11, Pushkin Str., Elista, 358009, Russian Federation
proshkin.sergey2011@yandex.ru

Поступила 28.09.2024

После рецензирования 23.10.2024

Принята 07.11.2024

Received 28.09.2024

Revised 23.10.2024

Accepted 07.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1144

EDN: AENSQR

УДК 574.2 (574.4)



Научная статья

О ДИАГНОСТИКЕ БИОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ АДВЕНТИВНЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ В НЕЧЕРНОЗЕМЬЕ РОССИИ

*Л.А. Земскова, М.В. Авраменко,
Е.В. Ноздрачева, О.Н. Чиграй*

Аннотация

Обоснование. Внимание исследователей к адвентивным видам, многие из которых имеют статус инвазивных, неслучаен, так как мощный процесс адвентизации в глобальном масштабе снижает элементы биологического разнообразия, изменяет свойства биотопа сообществ, вызывает почвоутомление, увеличивает эколого-экономические издержки при расчёте средообразующей функции и вызывает необходимость ремедиационных мероприятий. Отечественные и зарубежные авторы изучают особенности адвентов для выявления особенностей флорогенеза, для производства из биомассы инвазивных видов сорбентов различного спектра действия, а также для выявления особенностей эколого-биохимических и эколого-биохимических воздействий на неорганические компоненты сообществ и разработки плана действий по реабилитации, ограничению численности ценопопуляций. Для Брянской области как административного центра Нечерноземья России актуально создание биомониторинговой базы эколого-биохимической и аллелопатической активности адвентов.

Цель исследования – обобщить данные по аллелопатической и эколого-биохимической активности адвентивных видов в местообитаниях Брянской области для начальных этапов создания базы биомониторинга.

Методы и методики исследования. Исследования проводились для 8 видов адвентов как дополнения к уже имеющимся эколого-фитоценологическим исследованиям. Сообщества адвентов исследовались в естественных границах с применением геоботанического, весового метода, почвенно-экологических методов и приёмов изысканий. В камеральных условиях устанавливались особенности аллелопатического влияния методом фитотоксичности; с применением лабораторно-химических методов выявлялась активность уреазы,

каталазы и целлюлазы для установления особенностей преобразования почв при экспансии адвентов.

Результаты исследования. В полевых условиях выяснено, что наибольшую биомассу развивают виды *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. Et Gray, *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Helianthus tuberosus* L., *Rudbekia hirta* L.; определяемые размерами, наибольшие плотности размещения особей адвентов выявлены для *Xanthoxalis stricta* (L.) Small, *Erigeron annuus* (L.) Pers., *Oenothera biennis* L. Установление фитотоксичности показало, что в наибольшей степени угнетает прорастание семян биотестера почвенная вытяжка в местах распространения видов: *Echinocystis lobata*, *Rudbekia hirta*, *Aster salignus* Willd., *Helianthus tuberosus*; наименьший прирост корней биотестера к контролю зарегистрирован в вытяжке почвы для тех же видов. Наименьшая фитотоксичность выявлена в почве для вида *Oenothera biennis*, наибольшая – для *Echinocystis lobata*, *Rudbekia hirta*, *Aster salignus*, *Helianthus tuberosus*. Установлены видовые особенности адвентивных видов, воздействующих на динамику энзимов в почве. Ферментативная активность уреазы наиболее показательна для почвы под *Lupinus polyphyllus*, *Xanthoxalis stricta*, *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*. Каталазная активность в наибольшей степени выявлена для почв с произрастанием сообществ из *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*, минимальные показатели – *Rudbekia hirta*, *Aster salignus*. Значительное число микроорганизмов формируется в почвах под ценопопуляциями *Lupinus polyphyllus*, *Xanthoxalis stricta*; минимальное разложение целлюлозы зарегистрировано для *Echinocystis lobata* и *Helianthus tuberosus*. По уреазной, каталазной и целлюлоазной активности почвы под адвентивными видами отнесены к классу «среднеобогатённых».

Заключение. Проведённые исследования подтвердили гипотезу возможного использования адвентивными видами воздействия на аборигенные виды корневых аллелопатических выделений: все вещества продуцируются адвентами в соответствии с видовыми особенностями. Наибольшее почвоутомление вызывает поселение в местообитаниях *Echinocystis lobata*, *Rudbekia hirta*, *Aster salignus*, *Helianthus tuberosus*, что обуславливает необходимость масштабной и глубокой ремедиации почв химическими, агротехническими или биологическими путями. В исследованиях зарегистрированы повышенные, по сравнению с естественными луговыми местообитаниями, данные по энзимной активности. Стимуляция активности оксидоредуктаз, гидролаз также является видовым признаком растений, хотя каталазная активность практически одинакова для изученных видов. Возрастание скорости разложения целлюлозы, зарегистрированное и в зарубежных исследованиях, обусловлено некоторым стиму-

лированием бактериального разнообразия, видимо, специфичным для адвентов. Внедрение адвентивных видов в естественные сообщества воздействуют на скорость и интенсивность биогеохимических циклов. В прикладном отношении изученные закономерности рекомендуют для планирования мероприятий по механическому удалению адвентов из сообществ; также важно конструировать комбинированные микробные препараты для биотехнологической ремедиации субстратов, предполагающей коренное преобразование микробиоты.

Ключевые слова: адвентивные виды; аллелопатическое воздействие; эколого-биохимические изменения; ремедиация; Брянская область

Для цитирования. Земскова, Л. А., Авраменко, М. В., Ноздрачева, Е. В., & Чиграй, О. Н. (2025). О диагностике биохимической активности адвентивных видов растений в Нечерноземье России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 90-112. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1144>

Original article

ON THE DIAGNOSTICS OF BIOCHEMICAL ACTIVITY OF ALIEN PLANT SPECIES IN THE NON-BLACK EARTH REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION

*L.A. Zemskova, M.V. Avramenko,
E.V. Nozdracheva, O.N. Chigrai*

Abstract

Background. The attention of researchers to adventive species, many of which have the status of invasive, is not accidental, since a powerful adventization process on a global scale reduces the elements of biological diversity, changes the properties of the community biotope, causes soil fatigue, increases the ecological and economic costs when calculating the environment-forming function and necessitates remediation measures. Domestic and foreign authors study the features of advents to identify the features of florogenesis, to produce sorbents of various action spectra from the biomass of invasive species, as well as to identify the features of ecological-biological and ecological-biochemical effects on inorganic components of communities and to develop an action plan for rehabilitation, limiting the number of coenopopulations. For the Bryansk region as the administrative center of the Non-Black Earth Region of the Russian Federation, the creation of a biomonitoring base for the ecological-biochemical and allelopathic activity of advents is relevant.

The **aim** of the work is to summarize the data on the allelopathic and ecological-biochemical activity of adventitious species in the habitats of the Bryansk region for the initial stages of creating a biomonitoring base.

Methods and research techniques. The studies were conducted for 8 adventitious species as a supplement to the existing ecological-phytocenotic studies. Adventitious communities were studied within natural boundaries using the geobotanical, gravimetric method, soil-ecological methods and research techniques. In office conditions, the features of the allelopathic effect were established using the phytotoxicity method; using laboratory chemical methods, the activity of urease, catalase and cellulase was detected to establish the features of soil transformation during the expansion of adventitious species.

Results. In field conditions, it was found that the greatest biomass is developed by the species *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. Et Gray, *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Helianthus tuberosus* L., *Rudbekia hirta* L.; determined by the sizes, the highest densities of placement of adventitious individuals were found for *Xanthoxalis stricta* (L.) Small, *Erigeron annuus* (L.) Pes., *Oenothera biennis* L. The determination of phytotoxicity showed that the soil extract in the areas of distribution of the species *Echinocystis lobata*, *Rudbekia hirta*, *Aster salignus* Willd., *Helianthus tuberosus* inhibits the germination of biotester seeds to the greatest extent; the smallest growth of biotester roots to the control was recorded in the soil extract for the same species. The lowest phytotoxicity was found in the soil for the species *Oenothera biennis*, the highest - for *Echinocystis lobata*, *Rudbekia hirta*, *Aster salignus*, *Helianthus tuberosus*. Species features of adventitious species affecting the dynamics of enzymes in the soil were established. The enzymatic activity of urease is most indicative for the soil under *Lupinus polyphyllus*, *Xanthoxalis stricta*, *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*. Catalase activity was found to the greatest extent for soils with the growth of communities of *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*, the minimum indicators – *Rudbekia hirta*, *Aster salignus*. A significant number of microorganisms are formed in soils under coenopopulations of *Lupinus polyphyllus*, *Xanthoxalis stricta*; minimal cellulose decomposition was recorded for *Echinocystis lobata* and *Helianthus tuberosus*. According to urease, catalase and cellulase activity, the soils under adventitious species are classified as «moderately enriched».

Conclusion. The conducted studies confirmed the hypothesis of possible use of the impact of root allelopathic secretions on native species by adventitious species: all substances are produced by adventites in accordance with species characteristics. The greatest soil fatigue is caused by settlement in habitats of *Echinocystis lobata*, *Rudbekia hirta*, *Aster salignus*, *Helianthus tuberosus*, which necessitates large-

scale and deep soil remediation by chemical, agrotechnical or biological means. The studies recorded increased data on enzymatic activity compared to natural meadow habitats. Stimulation of oxidoreductase and hydrolase activity is also a species-specific feature of plants, although catalase activity is almost the same for the studied species. The increase in the rate of cellulose decomposition, registered in foreign studies, is due to some stimulation of bacterial diversity, apparently specific to adventites. The introduction of adventitious species into natural communities affects the rate and intensity of biogeochemical cycles. In practical terms, the studied patterns are recommended for planning measures for the mechanical removal of adventites from communities; it is also important to design combined microbial preparations for biotechnological remediation of substrates, which involves a radical transformation of the microbiota.

Keywords: adventitious species; allelopathic effect; ecological and biochemical changes; remediation; Bryansk region

For citation. Zemskova, L. A., Avramenko, M. V., Nozdracheva, E. V., & Chigray, O. N. (2025). On the diagnostics of biochemical activity of alien plant species in the Non-Black Earth region of the Russian Federation. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 90-112. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1144>

Введение

Адвентивные виды флоры в любом биогеографическом регионе интересны для научно-прикладных исследований в нескольких направлениях. Во-первых, сравнительные флористические исследования, проводимые как инвентаризационные, дают представления о таксономическом спектре адвентов, необходимых, прежде всего, при выборе стратегий биомониторинговых позиций, прогноза динамики увеличения роли этих видов, а также скорости инвазионного процесса, наносящего эколого-экономический урон [1; 8; 16]. На территории административного центра Нечерноземья России выявлено более 180 видов-адвентов, из них 80 – описаны в статусе инвазивного компонента Н.Н. Панасенко (2021) [8; 10]. Так как Брянская область благодаря уникальности местоположения обладает экотонным эффектом, в урочищах ландшафтов наблюдается повышенное разнообразие адвентивных видов двух ботанико-географических подзон [10]. По регионам России накопились сопоставимые данные о фитоценотической активности и иных биомониторинговых свойствах адвентивных видов, несмотря на то, что с ботанико-экологической точки зрения это понятие имеет некоторую «размытость» границ.

Во-вторых, используя определение «адвентов» как видов, активно натурализующихся при воздействии антропогенного фактора на территориях, ранее ими не освоенных, отечественные и зарубежные авторы развивают биоэкологическое направление исследований, решающее проблемы биохимической активности адвентивных элементов, диагностики степени изменения компонентов биотопа сообществ, а также мер по ремедиационным мероприятиям почвенной или водной среды [13; 15; 17; 23]. В России предложены представители семейства *Apiaceae*, *Amaranthaceae* для восстановления свойств почв, вод от элементов группы тяжёлых металлов, органических загрязнителей. С начала XXI века признано, что инвазионная часть адвентивных видов сформировалась как важнейший фактор, изменивший глобальную экосреду [16; 19]. Поэтому ограничение численности адвентивных ценопопуляций химическими, агротехническими, биологическими методами получило продолжение необычным способом: производство материалов из биомассы адвентов в новые материалы для защиты окружающей среды. Более двадцати работ посвящены производству биоугля с использованием активной части адвентивных видов – инвазивных растений, что по результатам изысканий эффективно утилизирует отходы, контролирует «экспансию инвазивных растений», восстанавливают среду. Развивается вопрос о производстве из активных адвентов, вторгающихся в агро- и урбоценозы, биосорбентов для удаления токсичных и активных поллютантов. Таким образом, переработка биомассы растений позволяет упростить высокие издержки «биологических вторжений» [24].

В-третьих, в области эколого-биохимических исследований устанавливают показатели аллелопатической активности широко распространённых адвентивных видов, а также динамику изменений содержания биологически активных веществ в почве (деятельностном горизонте) местообитаний, занятых инвазивным компонентом флоры, быстро осваивающих урочища [21; 22; 25; 26]. Эти трудоёмкие исследования, развитие которых связано с новейшими цитогенетическими разработками, обеспечивающими полную характеристику микробиомов почвы, энзимную динамику, равно как и других химически активных веществ, значительно улучшают понимание механизмов влияния адвентов на экологию и биологию почв [12]. Результаты изысканий будут способствовать оптимизации разработке методов реконструкции, восстановления биокосного компонента в сообществах с внедрением адвентивного компонента фитоценоза. Именно длительное воздействие активных адвентивных видов, изменяющее в долгосрочной перспективе и в некоторых случаях необратимо свойства биотопа сообществ,

повлекло за собой комплексные эколого-биохимические изыскания в системе долгосрочного мониторинга, так называемых «долгосрочных экологических исследований – LTER». Зарубежные авторы, активно работая по выявлению значительного числа компонентов общего круговорота веществ со встроенными адвентивными видами, исследовали за прошедшее пятнадцатилетие более 60 видов, внедряющихся в естественные сообщества, получив достаточно разнообразные и противоречивые данные. Подтверждая гипотезу «активной аллелопатии» Т.А. Работнова (1982), исследователи не имеют единой позиции по разнообразию и механизму воздействия на почвенную биоту из микроводорослей, бактериального компонента, сосудистых растений-конкурентов. Авторы отмечали различные по характеру динамические изменения почвенных энзимов, содержание биогенного фосфора, находящихся под воздействием адвентивных видов; выявили возрастающие значения объёмов CO_2 , CH_4 , N_2O на луговых экосистемах, инвазированных многолетними адвентами [14; 24; 27]. Отечественные авторы активно изучают изменение свойств почвы или вод в присутствии потенциально активных и активных адвентивных видов, но не обосновывают единую стратегию последовательного изменения свойств биокосного и косного компонента сообществ. Для исследования регионально-географических особенностей эколого-биохимических воздействий на почвы инвазивного компонента адвентивной флоры Брянской области организованы масштабные исследования, доказавшее широкое использование «биологического оружия» *Vinca minor* L., *Parthenocissus vitacea* (Knerr) Hitchc., *Thladiantha dubia* Bunge, изменение биохимии почвенной среды [9; 18]. Достаточно актуальным для староосвоенного региона выступает выявление аллелопатического воздействия, а также стимулирование изменений содержания биологически активных веществ в биокосном компоненте сообществ с активно внедряющимися адвентами. Одна из стратегических задач, которую можно решить в свете прикладного значения выполняемых эколого-биологических изысканий, – предотвращение почвоутомления и усиления реабилитационных мероприятий, восстанавливающих микробиологический и биохимический потенциал субстратов для ведения сельскохозяйственного производства, лесовосстановления, ландшафтно-декоративных работ. Для административного центра Нечерноземья России впервые представлены комплексные характеристики 8 видов адвентов, различающихся по систематическому положению, жизненным формам, стратегиям освоения экотопов. Полученные данные дополнили биомониторинговые показатели для адвентов с инвазивным статусом – единственные для нечернозёмной зоны; по результатам лабораторно-камеральных исследований предложены мероприятия по ремедиации.

Цель исследования – обобщить данные по аллелопатической и эколого-биохимической активности адвентивных видов в местообитаниях Брянской области для начальных этапов создания базы биомониторинга.

Материалы, методы и методики исследований

Для восьми видов адвентивного компонента, проявляющих свойства инвазивных видов, в общей характеристике указывалось таксономическое положение, группы по времени и способу заноса, инвазивный статус по общепринятым сводкам [1; 20]. В полевых условиях визуально устанавливались границы ценопопуляций адвентивных видов (границы сообществ), отмечалось общее проективное покрытие доминирующего вида. На реперных площадках изымалась биомасса видов, измерялась масса сухого вещества на лабораторных весах с точностью до 0,01 г; биомасса устанавливалась как средняя на 1 м².

Для каждого вида в местах произрастания исследовалась аллелопатическая активность и аллелопатические свойства почвы: использовалась общепринятая методика биопроб А.М. Гродзинского, биотестовая методика для установления фитотоксичности почвенных вытяжек по МР 2.1.7.2297-07 [2]. Почвенную вытяжку разбавляли в соотношении 1 : 15. Тест объект – *Raphanus sativus* L., среднюю всхожесть семян биотестера выражали в процентах к соответствующей всхожести в контроле, которую принимали за 100%; определяли число условных кумариновых единиц (UCE) [2].

В полевых условиях производили точечный почвоотбор стерильным ножом по принципу «диагонали» в деятельностном горизонте почвы (0-5 см); готовили среднюю пробу. Нож для придания стерильности перед взятием проб три раза погружали в почву. Число точечных проб соответствовало ГОСТ 28168-89 и общепринятой процедуре пробоподготовки: ГОСТ 28168-89, 1989; ГОСТ 29269-91, 2005; ГОСТ 17.4.4.02-84, 2008. Из пробы почвы готовили водную вытяжку в соотношении 1:10 и анализировали полученный раствор. Для установления аллелопатического воздействия почву отбирали непосредственно под растениями ценопопуляций, контрольными образцами принималась почва, отобранная в сообществе без инвазивных адвентивных видов, вне зоны аллелопатического влияния.

Особенности биохимического состава почв в местах произрастания адвентивных видов с инвазивной активностью устанавливали по ферментам. Выявляли уреазную активность фотометрическим методом, измеряя количество NH₃, выделяющегося при гидролизе мочевины при каталитической активности уреазы. Каталазная активность выявлялась перманганатометрическим методом (по Джонсону и Темпле) [5; 11].

Общая активность микробиоценоза почв выявлялась методом аппликаций – целлюлозолитическая активность – один из достоверных показателей развития и деятельности микроорганизмов. В ходе эксперимента использовалась фильтровальная бумага (квадраты размером 5x5 см). Навески почвы массой 50 г, предварительно освобожденные от растительных остатков, помещали в стерильные чашки Петри, затем субстрат располагали в чашки, придавливали почвой. Почву смачивали до 65 % полной влагоёмкости. Чашки Петри выдерживались 30 суток при постоянной температуре 27-28 °С. Активность почвенных ферментов, целлюлозоразрушающих бактерий оценивали в баллах по шкалам, предложенным Д.Г. Звягинцевым [5]. При статистической обработке использовались стандартными методами [4].

Латинские названия сосудистых растений даны по сводке П.Ф. Маевского (2014) [7].

Результаты исследований и обсуждение

Для эколого-биохимических и фитотоксикологических изысканий учитывались ценопопуляции адвентов, ранее не исследовавшихся в центре Нечерноземья России (таблица 1).

Таблица 1.

Общая характеристика адвентивных видов в районе работ

Систематическая принадлежность	Биолого-экологические и био-географические особенности	Путь распространения в естественные сообщества
1 <i>Echinocystis lobata</i> (Michx.) Torr. Et Gray	Однолетнее, травянистое, кенофит, эргазиофит, агрифит, североамериканский ареал (А)	Нередко культивируется
2 <i>Erigeron annuus</i> (L.) Pes.	Однолетнее, травянистое, агриофит, эпекофит, североамериканский А	Культивировался, одичавшее растение
3 <i>Oenothera biennis</i> L.	Двулетнее, травянистое, кенофит, ксенофит, эпекофит, североамериканский А	Ранее культивировался
4 <i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	Многолетнее, травянистое, кенофит, эргазиофит, агрифит североамериканский А	Широко культивируется
5 <i>Xanthoxalis stricta</i> (L.) Small	Многолетнее, травянистое, ксенофит, эпекофит, североамериканский А	Культивируется, одичавшее растение
6 <i>Helianthus tuberosus</i> L.	Многолетнее, травянистое, агриофит, эпекофит, североамериканский А	Активно культивируется, дичает

7 <i>Rudbekia hirta</i> L.	Многолетнее, эпекофит, агриофит, кенофит, североамериканский А	Активно культивируется, дичает
8 <i>Aster salignus</i> Willd.	Многолетнее травянистое, Агриофит, эпекофит, североамериканский А	Активно культивируется, дичает

Из восьми видов, активно распространяющихся по естественным сообществам адвентов, два – однолетние, один вид – эхиноцистис – лиана; один – двулетнее растение, внедрившееся в луговые сообщества непосредственно из декоративной культуры, так же как и *Rudbekia hirta*. 50 % видов принадлежит к семейству *Asteraceae*, из них *Aster salignus*, *Helianthus tuberosus*, *Erigeron annuus* проявляют высокую степень инвазивности, их можно отнести к видам-трансформерам.

Сообщества адвентов имели различные количественные показатели биомассы (на 1 м²) и число особей растений, установленных на модельной пробной площадке (на 0,5 м²); показатели приведены на рисунке.

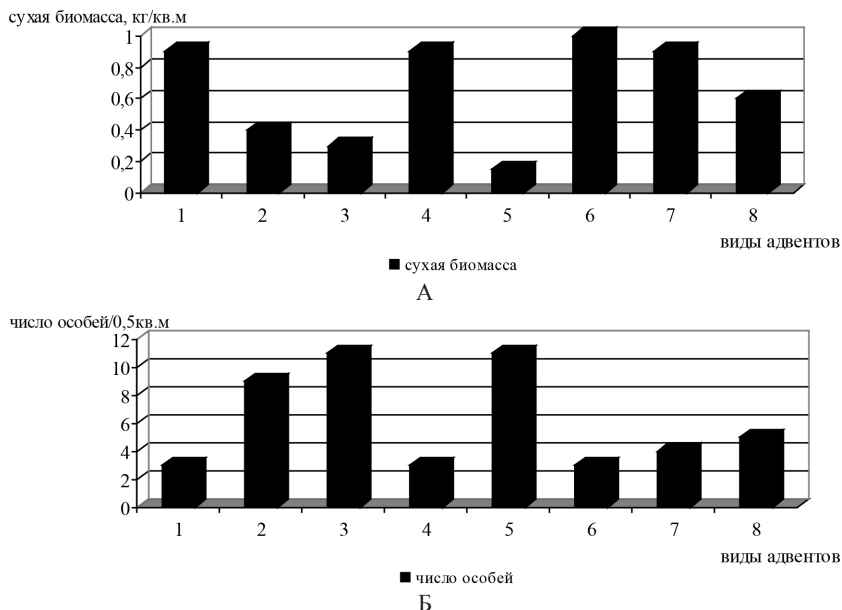


Рис. Показатели биомассы (А) и плотности размещения особей (Б) адвентивных видов на исследуемых реперных точках
Примечание. Виды адвентов соответствуют обозначениям таблицы 1.

Наибольшую биомассу развивают виды *Echinocystis lobata*, *Lupinus polyphyllus*, *Helianthus tuberosus*, *Rudbeckia hirta*; определяемые размерами, значительные плотности размещения особей адвентов выявлены для *Xanthoxalis stricta*, *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*.

Все данные по аллелопатии, ферментативной активности, в том числе и целлюлазной, показаны как усреднённые показатели.

При установлении фитотоксичности почвенных вытяжек стимулированных развитием ценопопуляций видов-адвентов получены результаты (таблица 2).

Таблица 2.

Средние данные, иллюстрирующие аллелопатическую активность адвентивных видов

Почва под адвентивными растениями	Показатели биотестера			
	Прорастание семян БТ, % к контролю (M± m)	Прирост корней БТ, % к контролю (M± m)	Индекс J (M± m)	UCE (M± m)
1	<u>30,54±2,1 *</u> 30,20±2,0	<u>12,5±0,9</u> 13,6±0,8	<u>20,8±1,1</u> 20,6±1,0	<u>162,0±7,9</u> 153,6±6,8
2	<u>49,25±2,9</u> 50,72±2,5	<u>49,2±1,3</u> 49,9±1,3	<u>15,3±1,0</u> 14,5±0,9	<u>95,3±4,5</u> 93,1±5,0
3	<u>52,11±2,9</u> 51,63±2,3	<u>52,2±1,7</u> 51,9±1,7	<u>12,9±0,8</u> 11,3±0,8	<u>86,1±4,2</u> 80,5±4,4
4	<u>37,92±2,0</u> 38,17±2,2	<u>44,7±1,5</u> 45,8±1,5	<u>12,7±1,0</u> 12,5±0,9	<u>86,1±4,2</u> 80,5±4,4
5	<u>40,98±2,8</u> 41,79±2,8	<u>39,6±1,4</u> 39,9±1,2	<u>12,9±1,0</u> 12,1±0,7	<u>64,2±4,7</u> 62,7±4,3
6	<u>36,92±2,6</u> 37,63±2,5	<u>19,8±0,9</u> 20,8±0,9	<u>22,4±1,0</u> 21,3±1,1	<u>119,5±6,7</u> 117,3±6,3
7	<u>32,15±2,2</u> 32,79±2,1	<u>15,3±0,8</u> 16,1±0,9	<u>21,4±1,1</u> 20,9±0,8	<u>121,5±5,9</u> 118,4±5,1
8	<u>31,84±2,3</u> 31,69±2,3	<u>13,7±0,7</u> 14,5±0,7	<u>24,8±1,2</u> 22,7±1,0	<u>172,9±7,1</u> 170,3±7,0

Примечание. * в числителе показаны данные почвенной вытяжки образцов, взятых в июле, в знаменателе – в конце сентября по окончании вегетационного периода. Номера видов растений аналогичны данным таблицы 1.

По показателям биотестера выяснены различные динамические характеристики аллелопатических свойств растений. В наибольшей степени угнетает прорастание семян биотестера почвенная вытяжка в местах распространения видов: *Echinocystis lobata*, *Rudbeckia hirta*, *Aster*

salignus, *Helianthus tuberosus*; наименьший прирост корней биотестера к контролю зарегистрирован в вытяжке почвы для тех же видов. Согласно данным индекса токсичности (J) почвенная вытяжка малотоксична для субстратов под *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*, *Lupinus polyphyllus*, *Xanthoxalis stricta* (J < 20 единиц). Для указанных видов не доказан эффект торможения. Наименьшая фитотоксичность выявлена в почве для вида *Oenothera biennis*. При сравнении данных, полученных для активных адвентивных видов *Vinca minor* и *Parthenocissus vitacea*, отмечена относительно низкая активность относительно барвинка малого у всех видов, исключая *Echinocystis lobata* и *Aster salignus*, для другого исследованного вида со средней аллелопатической активностью выявлено его превосходство в наличии «биологического оружия» над *Oenothera biennis*, *Lupinus polyphyllus*; по индексу UCE партеноциссус активнее видов: *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*, *Lupinus polyphyllus*, *Xanthoxalis stricta* [9; 18].

Согласно рассчитанным показателям UCE все виды обладают аллелопатической активностью (ниже среднего UCE < 200 единиц). Однако значительная активность по кумариноподобным веществам выявлена для *Echinocystis lobata* и *Aster salignus*. Выделение водорастворимых колинов, ингибиторов роста биотестера, сопоставимо с данными исследованиями других видов, в частности *Acer negundo* [3]. Наибольший ингибирующий эффект позволяет распространяться со значительной скоростью и закрепляться в естественных местообитаниях *Acer negundo*, *Echinocystis lobata*, *Helianthus tuberosus*: эти виды изменяют биохимическую среду почвенных субстратов, подавляя жизнедеятельность других растений. Остальные виды, видимо, используют другую стратегию, позволяющую вытеснять конкурентов из местообитаний.

Все исследованные показатели методом биотестирования различаются для сроков пробоотбора, различия статистически недостоверны.

Адвентивные виды, активно осваивающие элементы естественных биотопов, изменяют ферментативную активность, на что указывают и отечественные и зарубежные авторы. Активность энзимов – важный показатель скорости протекания биохимических процессов: превращении азотсодержащих веществ (уреаза), органических (углеродсодержащих) соединений. Прямой способ установления количества микробиоты, разлагающей целлюлозу, – определение целлюлозолитической активности, контроль углеродного цикла.

Показатели ферментативной активности отражены в таблице 3.

Таблица 3.

**Сезонные данные по активности ферментов в почве
под ценопопуляциями адвентивных видов**

Ценопопуляции	Показатели биохимических процессов		
	Уреазная активность, мг N-NH ₄ ⁺ на 100 г почвы, М±m	Активность каталазы, см ³ O ₂ на 1 г почвы за 1 мин, М±m	% разложения бумаги, сутки
1	<u>15,36±0,09*</u> 17,19±0,10	<u>7,1±0,07</u> 6,9±0,06	<u>1,19</u> 1,21
2	<u>21,96±0,09</u> 22,48±0,09	<u>8,4±0,09</u> 8,8±0,09	<u>1,26</u> 1,28
3	<u>20,57±0,09</u> 22,62±0,10	<u>8,6±0,09</u> 9,1±0,07	<u>1,28</u> 1,31
4	<u>24,5±0,12</u> 25,72±0,12	<u>7,2±0,09</u> 8,1±0,08	<u>1,35</u> 1,39
5	<u>22,19±0,08</u> 23,18±0,11	<u>7,7±0,09</u> 8,8±0,09	<u>1,30</u> 1,32
6	<u>15,14±0,08</u> 16,72±0,11	<u>6,2±0,09</u> 7,6±0,07	<u>1,12</u> 1,17
7	<u>18,86±0,08</u> 18,97±0,11	<u>6,9±0,07</u> 6,7±0,08	<u>1,20</u> 1,21
8	<u>16,73±0,08</u> 17,28±0,11	<u>6,3±0,08</u> 7,2±0,08	<u>1,20</u> 1,21

Примечание. * в числителе показаны данные почвенной вытяжки образцов, взятых в конце сентября по окончании вегетационного периода, в знаменателе – в июле. Номера видов растений аналогичны данным таблицы 1.

Сезонные показатели по активности энзимов в почвах под ценопопуляциями адвентивных видов свидетельствуют о разнообразном воздействии на круговороты биогенных элементов. Наименьшие различия выявлены для активности каталазы; наибольшие – активности уреазы в круговороте азота. Ферментативная активность уреазы наиболее показательна для почвы под *Lupinus polyphyllus*, вида, который активно используется для почвовосстановления и сидерации, откуда и распространяется в естественные сообщества Нечерноземья России. Также и для *Xanthoxalis stricta* получены значительные цифры по уреазной активности, равно как и для *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*. По шкале Д. Г. Звягинцева для оценки степени обогащённости ферментами уреазы активный горизонт почв для всех адвентов отнесен к разряду среднеобогатённых [5]. Многие авторы утверждают, что на активность уреазы как группы гидролаз положительно влияет фактор отсутствия механической обработки почвы – сообщества

адвентов развиваются в местообитаниях, лишенных агротехнических мероприятий, вытесняя из луговых сообществ, аборигенные виды. Наблюдаемый процесс повышения активности уреазы может привести к потерям азота из почвы в составе NH_3 , поэтому в прикладном значении по наличию сообществ некоторых адвентивных видов при мутационных процессах восстановления растительности на месте агроценозов можно диагностировать бедность субстратов соединениями азота [6]. При более высоких значениях активности фермента группы гидролаз в почве, такие биокосные субстраты более устойчивы к внешним стрессовым факторам, что и отмечали специалисты в параллельных биохимических исследованиях.

Каталазная активность в наибольшей степени выявлена для почв с произрастанием сообществ из *Erigeron annuus*, *Oenothera biennis*, минимальные показатели – *Rudbeckia hirta*, *Aster salignus*. Анализ активности фермента группы оксидоредуктаз согласно шкале Д.Г. Звягинцева позволил отнести все исследуемые образцы почв к группе среднеактивных [5]. Фактически по активности фермента каталазы нет четких отличий для восьми исследованных видов. При активности каталазы образуется высокоактивный кислород, который при ухудшении газовой воздушной среды может обеспечивать доступным кислородом микроорганизмы-аэробы: для этих же видов (таблица 3) образцы почвы характеризовались повышенной целлюлозной активностью, т.е. развитым микробным сообществом.

Активность целлюлазы, свидетельствующая о развитости микробного сообщества, разлагающих полисахарид и ускоряющих биогеохимический цикл углерода. Значительное число микроорганизмов формируется в почвах под ценопопуляциями *Lupinus polyphyllus*, *Xanthoxalis stricta*; минимальное разложение целлюлозы зарегистрировано для *Echinocystis lobata* и *Helianthus tuberosus*. Все почвенные образцы имеют среднюю активность целлюлазы. Кроме того, на активность почвенной целлюлазы воздействуют и внешние факторы: кислотность почвы, величина поступающего опада, содержание органической части – гумуса. Для ценопопуляций *Lupinus polyphyllus* и *Helianthus tuberosus* выявлены значительные данные по надземной биомассе, поступающей в качестве опада; однако содержание гумуса выше в почве под ценопопуляциями люпина, так же как и относительно благоприятная гидролитическая кислотность ($\text{pH} = 7,2$).

Все показатели ферментативной активности почвы, формируемые под сообществами адвентивных видов, некоторые из которых имеют статус инвазивных, сравнимы с данными по лугам естественного и искусственного происхождения в среднем Подесенье: ценопопуляции *Lupinus polyphyllus*,

Erigeron annuus, *Oenothera biennis* и в меньшей степени *Xanthoxalis stricta*. При внесении мелиорантов в почву луговых сообществ также возрастали показатели по энзимной активности.

Анализ взаимосвязи между установленными показателями для почв в местообитаниях адвентивных видов показан в таблице 4.

Таблица 4.

Коэффициенты корреляции между эколого-биохимическими и биологическими показателями в почвах с произрастанием адвентов

Коэффициенты R ²	А	Б	В	Г	Д	Е
А *	—	0,57	0,60	0,55	0,59	0,15
Б	.	—	-0,67	-0,69	- 0,71	0,12
В	.	.	—	0,45	0,49	0,14
Г	.	.	.	—	0,51	0,22
Д	.	.	.	.	—	0,47
Е	.	.	.	.	.	—

Примечание. А индекс J, Б UCE, В уреазная активность, Г каталазная активность, Д активность целлюлаз, Е биомасса растений

Анализ корреляционных взаимосвязей показал, что индекс токсичности связан прямыми средней силой связями с ферментативной активностью разнообразных энзимов класса гидролаз и оксидоредуктаз. Выявлена отрицательная сильная зависимость между показателем условных кумариновых единиц и активностью почвенных энзимов, что объясняется подавляющим действием водорастворимых колинов на микробиоту почв. Показатель сухой биомассы связан слабыми корреляционными связями со всеми показателями, кроме активности целлюлаз (средняя сила). Эти зависимости рекомендовано к использованию в биоиндикационных целях и подборе средств ремедиации почв после экспансии местообитаний адвентами.

Эмпирические исследования эколого-биохимических и аллелопатических свойств адвентивных видов в местообитаниях центра Нечерноземья России показали сходство в активности видов: наиболее сильными конкурентами выступают виды, выделяющие в почву колины, а также оказывающие сильный тормозящий эффект, проявляя фитотоксические свойства [12; 13; 15; 19; 22]. Также, как и отмечают зарубежные авторы, видовая специфичность исследуемых эколого-биохимических и аллелопатических качеств, проявляется во многих географически различных условиях, зависит от некоторых сопутствующих факторов, нуждающихся в дополнитель-

ных исследованиях. Высокая ферментативная активность, выявленная и для инвазивных видов на территории Европы, Канады, характерна для адвентов, так как позволяет поглощать доступные ресурсы и стимулировать высокие показатели роста побегов [21; 25]. Аллелохимические вещества прямо ингибируют растения-конкуренты через листовые выщелачивания, летучие вещества и разлагающийся надземный и подземный опад, корневые выделения, а также мутуалистические микробоценозы аборигенных видов: эти положения доказаны не только в натурных экспериментах, но и при камеральных работах в модельных мезокосмах.

Заключение

Проведённые исследования подтвердили гипотезу возможного использования адвентивными видами, особенно в статусе инвазивных, «нового оружия» в виде корневых аллелопатических выделений: все вещества продуцируются адвентами в соответствии с видовыми особенностями. Однако практически не выяснены аллелопатические эффекты местных видов, которые могут регулировать и корневые выделения активно распространяющихся адвентов. Поэтому данные ранее проведённых и настоящих исследований могут быть лишь условно средними аутоаллелопатическими, без учёта других воздействующих экофакторов. Наибольшее почвоутомление вызывает поселение в местообитаниях *Echinocystis lobata*, *Rudbeckia hirta*, *Aster salignus*, *Helianthus tuberosus*, что обуславливает необходимость масштабной и глубокой ремедиации почв химическими, агротехническими или биологическими путями. Аллелопатические вещества подавляют активность почвенных ферментов, что негативно сказывается, в целом, на активности микроорганизмов и роста аборигенных видов, когда как адвенты довольствуются, видимо, небольшим количеством доступных для ростовых и других биопроцессов компонентов.

В исследованиях зарегистрированы повышенные, по сравнению с естественными луговыми местообитаниями, данные по энзимной активности. Стимуляция активности оксидоредуктаз, гидролаз также является видовым признаком растений, хотя каталазная активность практически одинакова для изученных видов. Возрастание скорости разложения целлюлозы, зарегистрированное и для зарубежных исследований, обусловлено некоторым стимулированием бактериального разнообразия, видимо, специфичным для адвентов. Значит, внедрение адвентивных видов в естественные сообщества воздействуют на скорость и интенсивность биогеохимических циклов: механизм этих воздействий до настоящего времени нуждается в

изучении. В прикладном отношении изученные закономерности рекомендуют для планирования мероприятий по механическому удалению адвентов из сообществ: необходимо не только скашивать побеговую часть, но и рекультивировать корни и корневища подземной биомассы, например, глубокой осенней вспашкой. Также важно конструировать комбинированные микробные препараты для биотехнологической ремедиации субстратов, предполагающей коренное преобразование микробиоты.

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

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Виноградова, Ю. К., Майоров, С. Р., & Хорун, Л. В. (2010). *Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России* / под ред. Ю. Ю. Дгебуадзе. Москва: ГЕОС. 512 с. ISBN: 978-88-911-9487-9. EDN: <https://elibrary.ru/pkzqoa>
2. Гродзинский, А. М. (1965). *Аллелопатия в жизни растений и их сообществ*. Киев: Наукова думка. 198 с.
3. Ерёменко, Ю. А. (2014). Аллелопатическая активность инвазионных древесных видов. *Российский Журнал Биологических Инвазий*, (2), 39-33. EDN: <https://elibrary.ru/tfqhhp>
4. Зайцев, Г. Н. (1990). *Математика в экспериментальной ботанике*. Москва: Наука. 296 с.
5. Звягинцев, Д. Г. (1991). *Методы почвенной микробиологии и биохимии*. Москва: Изд-во МГУ. 304 с.
6. Космачева, А. Г., Чеснокова, С. М., & Трифонова, Т. А. (2022). Исследование влияния антибиотиков на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной почв. *Теоретическая и прикладная экология*, (2), 183-190. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-2-183-190> EDN: <https://elibrary.ru/yracyj>
7. Маевский, П. В. (2014). *Флора средней полосы европейской части России*. Москва: Товарищество научных изданий КМК. 635 с.
8. Панасенко, Н. Н. (2021). *Роль инвазионных растений в современных процессах преобразования растительного покрова*: Дисс. ... доктора биологических наук. Брянск. 390 с.
9. Панасенко, Н. Н., & Анищенко, Л. Н. (2020). *Thladiantha dubia* Bunge в Брянской области: распространение, экология, биохимические особенно-

- сти. *Российский журнал биологических инвазий*, (2), 100-111. EDN: <https://elibrary.ru/mludz>
10. *Природные ресурсы и окружающая среда субъектов Российской Федерации. Центральный Федеральный округ: Брянская область* / Под ред. Н. Г. Рыбальского, Е. Д. Самотесова и А. Г. Митюкова (2007). Москва: НИ-А-Природа. 1144 с.
 11. Хазиев, Ф. Х. (2005). *Методы почвенной энзимологии*. Москва: Наука. 250 с. ISBN: 5-02-033940-7. EDN: <https://elibrary.ru/qkxhyj>
 12. Afzal, M. R., Naz, M., Ashraf, W., & Du, D. (2023). The Legacy of Plant Invasion: Impacts on Soil Nitrification and Management Implications. *Plants (Basel)*, 12(16), 2980. <https://doi.org/10.3390/plants12162980> EDN: <https://elibrary.ru/avfoet>
 13. Chaves Lobón, M., González Félix, M., & Alías Gallego, J. C. (2023). Comparison of the Allelopathic Potential of Non-Native and Native Species of Mediterranean Ecosystems. *Plants (Basel)*, 12(4), 972. <https://doi.org/10.3390/plants1204097> EDN: <https://elibrary.ru/vuhelw>
 14. Feng, S., Zeng, L., Cai, M., Chauvat, M., Forey, E., Tariq, A., et al. (2022). An invasive and native plant differ in their effects on the soil food-web and plant-soil phosphorus cycle. *Geoderma*, 410, 115672. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115672> EDN: <https://elibrary.ru/yumnys>
 15. Kalisz, S., Kivlin, S. N., & Bialic-Murphy, L. (2021). Allelopathy is pervasive in invasive plants. *Biol. Invasions*, 367-371. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02383-6> EDN: <https://elibrary.ru/kkeytx>
 16. Lechner, M., & Kiehn, M. (2010). Assessing invasive potential of plant species cultivated in Botanic Gardens in Central Europe. In *Conference Programme & Book of Abstracts. 4th Global Botanic Gardens Congress. Addressing global change: a new agenda for botanic gardens* (pp. 126-127). Dublin: National Botanic Gardens of Ireland.
 17. Pyšek, P., Cuda, J., Šmilauer, P., Skálová, H., Chumová, Z., et al. (2020). Competition among native and invasive *Phragmites australis* populations: an experimental test of the effects of invasion status, genome size, and ploidy level. *Ecol. Evol.*, 10, 1106-18. <https://doi.org/10.1002/ece3.5907> EDN: <https://elibrary.ru/bryjif>
 18. Panasenko, N. N., & Anishchenko, L. N. (2018). Influence of Invasive Plants *Parthenocissus vitacea* and *Vinca minor* on Biodiversity Indices of Forest Communities. *Contemporary Problems of Ecology*, 11(6), 614-623. <https://doi.org/10.1134/S1995425518060070> EDN: <https://elibrary.ru/mlhfyd>
 19. Qu, T., Peng, Y., Guo, W., Zhao, C., & Losapio, G. (2021). Invasive species allelopathy decreases plant growth and soil microbial activity. *PLoS One*, 16(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246685> EDN: <https://elibrary.ru/srynsnw>

20. Richardson, D. M., Pysek, P., Rejmanek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D., & West, C. J. (2000). Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distribution*, 6, 93-107. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083>
21. Torres, N., Herrera, Fajarfo, L., & Bustamante, R. O. (2021). Meta-analysis of the impact of plant invasions on soil microbial communities. *BMS Ecology and Evolution*, 21, 172. <https://doi.org/10.1186/s12862-021-01899-2> EDN: <https://elibrary.ru/lhsyky>
22. Unger, I. M., Kremer, R. J., Veum, K. S., & Gotyne, K. W. (2022). Immediate and long-term effects of invasive plant species on soil characteristics. *Soil Ecology Letters*, 4(3), 276-288. <https://doi.org/10.1007/s42832-021-0104-4> EDN: <https://elibrary.ru/dkemyw>
23. Yuan, L., Li, J. M., Yu, F. H., Oduor, A., & van Kleunen, M. (2021). Allelopathic and competitive interactions between native and alien plants. *Biological Invasions*, 23, 3077-3090. <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02565-w> EDN: <https://elibrary.ru/lygirj>
24. Zang, L., Wang, S., Liu, S., Zou, J., & Siemann, E. (2018). Perennial forb invasions alter greenhouse gas balance between ecosystem and atmosphere in annual grassland in China. *Science of the Total Environment*, 642, 781-788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.111>
25. Zang, P., Li, B., Wu, J., & Hu, S. (2019). Invasive plants differentially affect soil biota through litter and rhizosphere pathways: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 22(1), 200-210. <https://doi.org/10.1111/ele.13181>
26. Zang, Y., Leng, Z., Wu, Y., Jia, H., & Yan, C. (2022). Interaction between nitrogen, phosphorus, and invasive alien plants. *Sustainability*, 746. <https://doi.org/10.3390/su14020746> EDN: <https://elibrary.ru/oiddsz>
27. Zhou, Y., & Staver, A. C. (2019). Enhanced activity of soil nutrient-releasing enzymes after plant invasion: a meta-analysis. *Ecology*, 100(11). <https://doi.org/10.1002/ecy.2830>

References

1. *Black book of flora of Central Russia: alien plant species in ecosystems of Central Russia* / Vinogradova, Y. K., Mayorov, S. R., Khorun, L. V. (2010). Ed. by Yu. Yu. Dgebuadze. Moscow: GEOS, 512 p. ISBN: 978-88-911-9487-9. EDN: <https://elibrary.ru/pkzqoa>
2. Grodzinsky, A. M. (1965). *Allelopathy in the life of plants and their communities*. Kiev: Naukova Dumka, 198 p.
3. Eremenko, Y. A. (2014). Allelopathic activity of invasive tree species. *Russian Journal of Biological Invasions*, (2), 39-33. EDN: <https://elibrary.ru/tfqhph>

4. Zaitsev, G. N. (1990). *Mathematics in experimental botany*. Moscow: Nauka, 296 p.
5. Zvyagintsev, D. G. (1991). *Methods of soil microbiology and biochemistry*. Moscow: MSU Publishing House, 304 p.
6. Kosmacheva, A. G., Chesnokova, S. M., & Trifonova, T. A. (2022). Study of antibiotic effect on urease activity in podzolic and gray forest soils. *Theoretical and Applied Ecology*, (2), 183-190. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-2-183-190> EDN: <https://elibrary.ru/yracyj>
7. Maevsky, P. V. (2014). *Flora of the central part of European Russia*. Moscow: KMK Scientific Press, 635 p.
8. Panasenko, N. N. (2021). *The role of invasive plants in modern processes of vegetation cover transformation*. Dr. Sci. (Biol.) thesis. Bryansk, 390 p.
9. Panasenko, N. N., & Anishchenko, L. N. (2020). Thladiantha dubia Bunge in the Bryansk region: distribution, ecology, biochemical features. *Russian Journal of Biological Invasions*, (2), 100-111. EDN: <https://elibrary.ru/mludzs>
10. *Natural resources and environment of the Russian Federation regions. Central Federal District: Bryansk region* / Ed. by N. G. Rybalsky, E. D. Samotesova, A. G. Mityukov (2007). Moscow: NIA-Priroda, 1144 p.
11. Khaziev, F. H. (2005). *Methods of soil enzymology*. Moscow: Nauka, 250 p. ISBN: 5-02-033940-7. EDN: <https://elibrary.ru/qkxhyj>
12. Afzal, M. R., Naz, M., Ashraf, W., & Du, D. (2023). The Legacy of Plant Invasion: Impacts on Soil Nitrification and Management Implications. *Plants (Basel)*, 12(16), 2980. <https://doi.org/10.3390/plants12162980> EDN: <https://elibrary.ru/avfoet>
13. Chaves Lobón, M., González Félix, M., & Alías Gallego, J. C. (2023). Comparison of the Allelopathic Potential of Non-Native and Native Species of Mediterranean Ecosystems. *Plants (Basel)*, 12(4), 972. <https://doi.org/10.3390/plants1204097> EDN: <https://elibrary.ru/vuhelw>
14. Feng, S., Zeng, L., Cai, M., Chauvat, M., Forey, E., Tariq, A., et al. (2022). An invasive and native plant differ in their effects on the soil food-web and plant-soil phosphorus cycle. *Geoderma*, 410, 115672. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115672> EDN: <https://elibrary.ru/yumnys>
15. Kalisz, S., Kivlin, S. N., & Bialic-Murphy, L. (2021). Allelopathy is pervasive in invasive plants. *Biol. Invasions*, 367-371. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02383-6> EDN: <https://elibrary.ru/kkeytx>
16. Lechner, M., & Kiehn, M. (2010). Assessing invasive potential of plant species cultivated in Botanic Gardens in Central Europe. In *Conference Programme & Book of Abstracts. 4th Global Botanic Gardens Congress. Addressing global*

- change: a new agenda for botanic gardens* (pp. 126-127). Dublin: National Botanic Gardens of Ireland.
17. Pyšek, P., Cuda, J., Šmilauer, P., Skálová, H., Chumová, Z., et al. (2020). Competition among native and invasive *Phragmites australis* populations: an experimental test of the effects of invasion status, genome size, and ploidy level. *Ecol. Evol.*, 10, 1106-18. <https://doi.org/10.1002/ece3.5907> EDN: <https://elibrary.ru/bryjif>
 18. Panasenکو, N. N., & Anishchenko, L. N. (2018). Influence of Invasive Plants *Parthenocissus vitacea* and *Vinca minor* on Biodiversity Indices of Forest Communities. *Contemporary Problems of Ecology*, 11(6), 614-623. <https://doi.org/10.1134/S1995425518060070> EDN: <https://elibrary.ru/mlhfyd>
 19. Qu, T., Peng, Y., Guo, W., Zhao, C., & Losapio, G. (2021). Invasive species allelopathy decreases plant growth and soil microbial activity. *PLoS One*, 16(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246685> EDN: <https://elibrary.ru/srynsu>
 20. Richardson, D. M., Pyšek, P., Rejmanek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D., & West, C. J. (2000). Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distribution*, 6, 93-107. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083>
 21. Torres, N., Herrera, Fajarfo, L., & Bustamante, R. O. (2021). Meta-analysis of the impact of plant invasions on soil microbial communities. *BMS Ecology and Evolution*, 21, 172. <https://doi.org/10.1186/s12862-021-01899-2> EDN: <https://elibrary.ru/lhsyky>
 22. Unger, I. M., Kremer, R. J., Veum, K. S., & Gotyue, K. W. (2022). Immediate and long-term effects of invasive plant species on soil characteristics. *Soil Ecology Letters*, 4(3), 276-288. <https://doi.org/10.1007/s42832-021-0104-4> EDN: <https://elibrary.ru/dkcmwy>
 23. Yuan, L., Li, J. M., Yu, F. H., Oduor, A., & van Kleunen, M. (2021). Allelopathic and competitive interactions between native and alien plants. *Biological Invasions*, 23, 3077-3090. <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02565-w> EDN: <https://elibrary.ru/lygirj>
 24. Zang, L., Wang, S., Liu, S., Zou, J., & Siemann, E. (2018). Perennial forb invasions alter greenhouse gas balance between ecosystem and atmosphere in annual grassland in China. *Science of the Total Environment*, 642, 781-788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.111>
 25. Zang, P., Li, B., Wu, J., & Hu, S. (2019). Invasive plants differentially affect soil biota through litter and rhizosphere pathways: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 22(1), 200-210. <https://doi.org/10.1111/ele.13181>
 26. Zang, Y., Leng, Z., Wu, Y., Jia, H., & Yan, C. (2022). Interaction between nitrogen, phosphorus, and invasive alien plants. *Sustainability*, 746. <https://doi.org/10.3390/su14020746> EDN: <https://elibrary.ru/oiddsz>

27. Zhou, Y., & Staver, A. C. (2019). Enhanced activity of soil nutrient-releasing enzymes after plant invasion: a meta-analysis. *Ecology*, 100(11). <https://doi.org/10.1002/ecy.2830>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Земскова Лолита Алексеевна, аспирант кафедры географии, экологии и землеустройства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»

ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация

lolita.zemskova.98@mail.ru

Авраменко Марина Васильевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры географии, экологии и землеустройства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»

ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация

avramenko_marina84@mail.ru

Ноздрачева Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»

ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация

nozdr-eva@mail.ru

Чиграй Ольга Николаевна, кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры, экологии землеустройства

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация
chigrai-olga@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Lolita A. Zemskova, Graduate Student of the Department of Geography, Ecology and Land Management
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
lolita.zemskova.98@mail.ru*

Marina V. Avramenko, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
avramenko_marina84@mail.ru*

Elena V. Nozdracheva, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
nozdv@mail.ru*

Olga N. Chigrai, Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer at the Department of Geography, Ecology and Land Management
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
chigrai-olga@mail.ru*

Поступила 05.09.2024

После рецензирования 07.11.2024

Принята 25.11.2024

Received 05.09.2024

Revised 07.11.2024

Accepted 25.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1169

EDN: EHKOKP

UDC 631.527.6:631.582



Original article

ANDONGAN AS A STRATEGY FOR PURIFYING AGRICULTURAL IRRIGATION WATER: CASE STUDY OF SUBAK SEMBUNG, BALI

I.N. Muliarta

Abstract

Farmers in Bali have for centuries applied local wisdom in the concept of andongan to obtain better water quality from Subak irrigation streams. The problem is that the implementation of andongan is starting to be abandoned because farmers do not understand the benefits and functions of andongan. This research aims to analyze the local wisdom in the andongan concept in Subak Sembung, Denpasar-Bali, and identify the plants used in andongan. The target is that the andongan concept can be revitalized so that it can be implemented again by farmers. Moreover, the idea of andongan in terms of its function, purpose, and how it works in principle is the same as phytoremediation technology. The case study method with a qualitative approach was used in this research to collect data through observation, interviews, and documentation. If examined closely, andongan is a water management system that reflects Balinese farmers' respect for water as a source of life. Water is respected as a vital element for producing food and maintaining the sustainability of the agricultural sector. Conceptually, andongan is a water purification innovation using plants commonly referred to as phytoremediation technology. The types of plants commonly used to purify water in andongan are water hyacinth (*Eichornia Crassipes*) and lotus (*Nymphaeae sp.*). The implementation of the Andongan concept in Subak currently faces challenges related to farmers' land ownership status. Tenant farmers who do not have permanent ownership of the land they manage are reluctant to build Andongan because they are worried that this will reduce the size of the planting area and result in a decrease in crop yields. Based on the results of the study, it can be concluded that farmers in Bali have been applying phytoremediation technology for centuries in a water management concept called Andongan. The plants used in andongan also have benefits as animal feed and for religious ceremonies.

Keywords: Andongan; Bali; Local Wisdom; Subak Sembung; Water Purification

For citation. Muliarta, I. N. (2025). Andongan as a strategy for purifying agricultural irrigation water: case study of Subak Sembung, Bali. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 113-132. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1169>

Introduction

The existence of Subak in Bali is believed to have existed since the early ninth century. For a long time, Subak has successfully managed and utilized water sources for irrigation [1]. Subak guarantees fair distribution of water to farms, maintains irrigation systems, mobilizes resources and mutual aid, resolves conflicts, and ensures the implementation of rituals [2]. The Subak system has made the Balinese people the most productive rice farmers in Indonesia and guaranteed a high level of food sovereignty for the island's dense population [3].

Subak has been recognized as a world cultural heritage by UNESCO since 2012. The sustainability of the system and the existence of Subak in the future is of great concern. There are several challenges in Subak conservation, one of which is reducing the number of Subak areas and deteriorating the quality and quantity of water resources. Another problem is that farmers are over 40 years old with heavy financial burdens and the absence of clear external regulations to support Subak conservation [4]. The fragile Subak system is threatened by its complexity and linkages with new agricultural practices and increased tourism on the island of the gods [3]. The development of tourism activities has had a significant influence on the reduction of rice fields. This is a challenge to maintain its title as part of the world cultural heritage landscape [5].

Subak is a local organization that implements traditional Balinese ecological knowledge and wisdom in managing and distributing water for agricultural purposes [6]. As an irrigation system management association, the Subak association has naturally adapted to participatory irrigation management [7]. Apart from having a role in regulating the distribution and allocation of irrigation water, Subak also plays a role in regulating planting patterns and annual planting schedules. Another role is mobilizing resources for irrigation, agriculture, social and cultural activities, and ritual ceremonies [8].

Subak is a local wisdom in Bali that has been practiced for centuries in managing irrigation water. Irrigation water management in Subak is quite promising to support food sustainability in the region [9]. The Balinese people have long been conserving water resources and managing water quality through various forms of local wisdom. Local wisdom is passed down from generation to gener-

ation in routine activities of daily life [10]. One of the water quality management efforts that has long been practiced by Subak farmer members is purifying irrigation water using a form of local wisdom called andongan. The andongan concept is still implemented today by farmers in Subak Sembung, Denpasar-Bali.

Increasing use of irrigation water has led to a decline in water and soil quality in many areas. Natural and synthetic nanoparticles are now known to be present in many water sources, potentially altering plant growth and food standards. Rapidly changing irrigation water quality requires more attention to understand and predict long-term impacts [11]. The sustainability of agriculture now depends on the quality of the irrigation water used. The electrolyte concentration (EC) of irrigation water can cause salt accumulation in the root zone layers and affect plant physiological functions through osmotic and ion toxicity effects [12]. There is increasing evidence of the contribution of irrigation water to product contamination which then leads to outbreaks of foodborne illnesses. One of the special risk cases occurs in the production of vegetables, especially those that will be eaten raw without cooking [13].

The quality of irrigation water taken from surface water sources varies greatly. This especially applies to waters that frequently experience contamination, such as rainwater runoff or direct entry of livestock waste into rivers. Pollution in irrigation systems increases the risk of contamination of food crops and requires the implementation of best monitoring practices [14]. The most significant and easily identified irrigation water quality parameters can be grouped into three quality classes. These three groups are based on their influence on crop yields and soil fertility (agronomic quality indicators), human health (hygiene and health quality indicators), and irrigation systems (management quality) [15].

Removal of toxic organic and inorganic pollutants from water is essential for creating a clean environment, as a response to water scarcity, and for human society. Adsorption-based water technologies are among the most preferred and widely used because of their high efficiency at low cost, without relying on complex infrastructure [16]. Water pollution is not only one of the main risk factors for illness, disease, and death but also contributes to the reduction in the availability of drinking water worldwide [17]. The local wisdom of indigenous peoples in nature conservation plays an important role in protecting the earth's biodiversity and the health of the ecosystem as a whole. However, at the same time, indigenous peoples and their lands face major threats due to modernization and globalization [18].

Farmers who are members of Subak Sembung Denpasar, in fact, from the past until now still practice local wisdom in the form of the andongan tech-

nique as an effort to purify irrigation water. The problem is that not all farmers practice the andongan concept. Meanwhile, the quality of irrigation water is decreasing due to the influx of household and industrial waste into irrigation canals. This research aims to document the local wisdom of water purification through the andongan concept in Subak Sembung, Denpasar, and understand the role of andongan in maintaining water quality in Subak Sembung. Specifically, this research aims to identify the types of plants used in andongan and their function in water purification. Another aim is to analyze the water purification process through andongan.

Samples and research methods

The research was conducted in the Subak Sembung area, Denpasar, Bali from February to May 2024. The Subak Sembung area was chosen as the focus of the research because this area has developed and been designated as an eco-tourism area located in the center of Denpasar City. Subak Sembung, as a Subak area that has become a tourist destination, also still preserves the concepts of local Balinese wisdom which are in line with sustainable agricultural development. Wiguna et al.[19] are of the view that Subak Sembung is one of the Subak that preserves nature. Subak Sembung is an urban area in Denpasar City that continues to be under pressure from tourism interests. Subak Sembung is also the hope of the city of Denpasar as a guardian of the green belt area and a large water catchment area.



Fig. 1. Subak Sembung research location, Denpasar

Subak Sembung has been one of the Subaks designated as an ecotourism area in Denpasar City, Bali since 2014. Subak Sembung Ecotourism is located in Peguyangan Village, North Denpasar District, Denpasar City with an area of

Subak reaching 115 ha and with several members of around 192 people [19]. The Denpasar City Government has made policies that support agricultural development, namely policies in terms of improving agricultural services by designating Subak Sembung as an ecotourism area. Ecotourism in question is a concept of sustainable tourism development that aims to support environmental conservation efforts [20]. The designation of Subak Sembung as an ecotourism area has caused several parties to encourage farmers in Subak Sembung to develop organic rice cultivation. Organic-based agriculture is also a form of the green revolution as a form of improving planting systems and maintaining sustainable agriculture [21].

Methodologically, this research uses qualitative methods with the hope that it will be able to explore and formulate the concept of andongan and its relationship to efforts to purify irrigation water to improve the quality and quantity of agricultural products. The qualitative method with a case study approach was chosen to explore information in more depth. This is in line with the definition of a case study as a research approach used to produce an in-depth understanding of a contemporary issue or phenomenon within a limited system [22]. The case study method identifies holistic and meaningful characteristics of real-life events. In case studies, theoretical generalizations are possible but not statistical generalizations [23]. This condition causes the case study approach to often be criticized for being too specific, not generalizable, and limited in its contribution to theory [24].

The research instrument uses the principle that the researcher is the main research instrument (human instrument). During data collection, several data collection tools were used, including draft questions for interviews, observation guidelines, and documentation sheets. Based on the human instrument principle, the types of data in this research are words, actions, situations, and events, as well as documents that can be observed. According to Takahashi & Araujo [25], the case study approach does not bind researchers to specific data collection or interpretation methods. Case study research allows for many possibilities, and should be celebrated for its diversity rather than just considering the research method to be monolithic. Qualitative case studies allow researchers to conduct an in-depth exploration of complex phenomena in several specific contexts [26].

The data processing and analysis techniques in this research were carried out qualitatively, grouping and classifying the data thoroughly based on logical connections, then interpreted in the overall research context. Researchers in this activity will try to bring out the meaning of each existing data so that it is not only descriptive but also touches on the transcendent dimension.

Research results and discussion

Andongan as Local Wisdom

Andongan for farmers in Subak Sembung, Denpasar is nothing new, because its application and use have been carried out for generations. Continuous implementation has resulted in andongan still being implemented today. This condition is in line with the basic concept of local wisdom as a legacy from generation to generation that is not eroded by various external cultural elements. Learning local wisdom is an inevitable need [27]. Another view defines local wisdom as ideas, views, or values held by a community in a place that is wise and good and that is shared by the entire community [28]. Ecological awareness is very important for communities in managing natural resource potential for the development of local wisdom [29].

Local wisdom values contain the noble values of the nation's ancestors which can be used as capital to build a nation with good and strong character [30]. Some communities still adhere to generations-old traditions of managing natural resources wisely. The application of local wisdom values needs to be taught so that future generations will better appreciate the local culture and potential that exists in the region [31]. Learning local wisdom and developing local wisdom is a step for the next generation to prove themselves so that the elders are aware of the responsibility for this learning [32].

Learning regarding the function and role of andongan is carried out in practice directly from farmers to their children or the next generation. The learning process is not carried out through providing theory but is a field learning process. This is in line with the views of Zulfadrim et al. [33] who stated that local wisdom is a system of knowledge obtained from a long process of experience in the past, adopted and passed on to the next generation through an evolutionary process. Chaer et al. [34] stated that local knowledge will only survive if local learning is applied concretely in everyday life. Efforts to represent the concept of education are not just normative; they only state and explain, but attempt a performative form. Education not only teaches concepts but also forms attitudes and character to preserve local culture. Knowledge of local wisdom is a means to achieve the goal of better understanding and loving culture [35].

Andongan is a form of Balinese wisdom in managing and treating water. Water is seen as a source of life to produce food and keep the agricultural sector sustainable. Some literature states that Balinese people respect water as part of nature which must be preserved [36]. Water is a source of life on the surface of the earth because it is a need for every organism. The need for water contin-

ues to increase, but the availability of clean water continues to decrease [10]. Conservation efforts carried out by Balinese people to extend the life of the environment through manipulating the ecology of the built environment have existed since pre-Hindu times. This effort is carried out through the community's socio-cultural belief system, and by glorifying mountains as the center of natural power that provides fertility [37].

Andongan is not only Bali's cultural heritage but also a sustainable solution for preserving water. This system is environmentally friendly and easy to maintain. Andongan is an inspiration for the development of effective and sustainable water management technology. The glorification of water, as an important component of farming life in Bali, has been mentioned explicitly in traditional texts. The Manawa Dharmaśastra, Canakya Nitisastra, Artha Śāstra, and Śarasamuccaya texts state that it is important to make every effort to preserve water so that life can survive forever. Facts on the ground show that the quality of the water used to irrigate wet rice fields is inadequate because it has been polluted by various types of waste [38]. For the Balinese people, water is a symbol of Vishnu, who is a manifestation of God as the preserver of life in the world. Positioning water as something sacred means an obligation to maintain the quality and quantity of water [10].

Andongan as an Implementation of Phytoremediation Innovation

Conceptually, the andongan is in the form of a shallow pond containing water plants such as Water Hyacinth (*Eichornia Crassipes*) and Lotus (*Nymphae sp.*) whose function is to improve water quality before it is used to irrigate rice fields. Andongan is usually made by farmers at the water inlet before it flows into the rice fields. The local wisdom of Andongan, if linked to innovation in water purification with plants, is the same as phytoremediation technology. This follows the meaning of phytoremediation which is defined as an effective, environmentally friendly, and economical technique. Various types of phytoremediation methods can be used to reduce heavy metal contamination, such as phytoextraction, phytovolatilization, phytostabilization, and phytofiltration [39]. These methods are efficient, environmentally friendly, and economical [40].

Phytoremediation is a realistic and promising strategy to remove heavy metals from polluted areas, based on the use of hyper-accumulator plant species that are highly tolerant to heavy metals present in the environment or soil. Green plants are used to remove, decompose, or detoxify harmful metals in this technique [41]. Phytoremediation has become a concern since the last decade, as a new, cheaper technology [42]. The success of the phytoremediation

process is known from several physical-chemical water parameters and several diatom biotic indices as well as the Shannon Wiener diversity index obtained from artificial substrates [43].



Fig. 2. Condition of carriages in Subak Sembung, Denpasar

The sizes of the andongan ponds in Subak Sembung vary greatly, and the size of the andongan ponds in their construction is based on the area of land that will be irrigated. The size of the carriage is between 1 m x 2 m to 2 m x 6 m, with an average depth of between 10-15 cm. The size of the andongan does not seem to have much influence on the quality of water purification, but in each andongan the types of plants used are generally the same. This is in line with the opinion of Jia et al. [44] which states that plant species are the main factor that drives variations in removal efficiency in phytoremediation. Plant species can influence the colonization pattern and metabolic activity of inoculated endophytic bacteria and ultimately influence the phytoremediation process [45]. Plants primarily use their metabolism including interactions with microorganisms to improve their ecological environment. In the remediation process, plant purification factors are influenced by many conditions such as light intensity, stomatal conductance, temperature, and microbial species [46]. Important practical considerations in implementing aquatic phytoremediation include the use of invasive species, optimal timing and frequency of harvesting to remove pollutants with macrophyte biomass, and the full role of microbial biofilms in phytoremediation [47].

During phytoremediation, plants can transport trace elements and bind them in their cell walls, chelate them in the soil in an inactive form using secreted organic compounds, or complex them in tissues after transporting them into specialized cells and cell compartments [48]. The efficiency of phytoremedi-

ation depends on several factors including metal bioavailability and plant uptake, translocation, and tolerance mechanisms [49]. Many factors influence the selection of a suitable phytoremediation strategy for soil decontamination. This depends on soil properties, levels and characteristics of heavy metals, plant species, and climatic conditions [50]. Aquatic phytoremediation is a nature-based solution that has the potential to provide efficient, spatially adaptable, and multi-target treatment of polluted waters by using the ability of macrophytes to absorb, adsorb and degrade pollutants [47].



Fig. 3. One of the large carriages (1.5 m x 5 m) in Subak Sembung

Identification of Water Purification Plants in the Implementation of Andongan

There are 2 types of plants used in andongan, namely water hyacinth (*Eichornia Crassipes*) and lotus (*Nymphaeae sp.*). The choice of these two types of plants is also related to their use in the daily lives of farmers in Subak Sembung. When the water hyacinth is large and lush, it can be harvested to be used as feed for ducks and pigs. Water hyacinth in Sri Lanka has for decades been used as feed for ruminants, pigs, ducks, geese, and fish because of its high crude protein content and progressive growth [51]. The amino acid profile of water hyacinth makes it suitable for use as feed pigs. When water hyacinth is used as poultry feed, it increases egg laying ratio and improves cellular immunity of birds [52].

The selection of water hyacinth as a plant in the carriage is based on the knowledge obtained from generation to generation by farmers from their predecessors. Based on the knowledge and experience gained, farmers believe that water hyacinths can improve water quality. This knowledge of farmers in Subak Sembung is in line with several research results that state that water hyacinth can be used to purify water [53]. Water hyacinth is a macrophyte that has the potential to remove ammonia nitrogen [54]. Ammonia appears to be the water hyacinth's preferred nitrogen source. Water hyacinth can survive bad weather conditions below 5 °C for a short time [53].

The ability to adapt to various environmental conditions and high nutrient absorption capacity means water hyacinth has a broad contribution to phytoremediation purposes [54]. Nitrate in agricultural eutrophic wastewater can be utilized by water hyacinth as nitrogen nutrition and can promote plant growth by using soluble sugars and urea to synthesize amino acids and proteins [55]. Water hyacinth has a biosorption capacity in reducing the concentration of dyes, and heavy metals and minimizing certain other physiochemical parameters such as TSS (total solid suspension), TDS (total dissolved solids), COD (chemical oxygen demand) and BOD (biological oxygen demand) in textile wastewater [56].

The flowers on the andongan are usually used by farmers for religious ceremonies. The lotus is seen as a sacred flower with many virtues that other plant flowers generally do not have. Lotus in general, has a living habitat in three realms; namely land (lower realm), water (middle realm), and air (upper realm). A lotus flower that blooms perfectly seems to be able to separate itself from all the dirt in its place of life. A study revealed that the lotus flower has great religious and cultural significance, revered for its characteristic of being able to rise above muddy water, which shows how one can overcome the inner defilements of life. Apart from being a motivation for life, this plant also provides fiber which is used to make rare types of fabric that match the perfect quality of silk [57].

The lotus flower is one of the most famous plants in ancient Egyptian civilization because of its connection with religion and the daily life of ancient Egyptian society [58]. Lotuses are highly valued for their decorative, economic, and cultural uses [59]. This fragrant flower with white, blue, and red colors, and as a sacred symbol in the life of the ancient Egyptians was not only an aesthetic decorative component depicted by the ancient Egyptians on the walls of temples, or used in making perfume. And cosmetics, but also used in the decoration of palaces, houses, and tombs in certain decorative forms [58].

The use of lotus as part of the carriage was obtained by farmers from the knowledge gained from generation to generation. This farmer's knowledge is

in line with research results which state that lotus flowers are naturally occurring superhydrophobic. Superhydrophobicity is evolutionarily adaptive to the surrounding environment. Self-cleaning agents function effectively on superhydrophobic surfaces so that water droplets rise and fall from the surface thereby removing contamination particles [60].

Lotus plants are hyperaccumulators because they can significantly reduce the load of physicochemical pollutants and heavy metals in industrial waste. The heavy metal content in lotus roots is generally higher than in plant leaves [61]. Lotus can act as a hyperaccumulator of Lead (Pb), thereby reducing the danger of metal pollution in water ecosystems and decontaminating fresh water [62]. Lotus plants are also able to remove organic contaminants from surface water by supplying O₂ gas at 0.2–2.1 ml/minute [63]. Based on experiments, lotus was able to reduce COD by 32.91 %, reduce BOD levels by 31.54 %, reduce phosphate levels by 3.55 %, and reduce nitrate by 19.61 % [64]. This causes the Lotus plant to provide a sustainable approach towards effective biotreatment of mixed hazardous waste using plant-based environmentally friendly technology [61].

Sustainability of Implementation of Andongan Innovation

Andongan, as a phytoremediation concept that has existed since ancient times, has great potential for cleaning contaminated soil and water. However, its sustainable implementation still faces several challenges. Based on the results of an interview with the Chairman of Subak Sembung, I Made Darayasa, the biggest challenge in preserving andongan lies in the farmer's decision. There is a tendency that sharecroppers are reluctant to make carriages because it will reduce the planting area which will then have an impact on production or crop yields. Where around 40% of farmers in Subak Sembung are sharecroppers and 60 % are farmers who are also landowners. This is in line with the view of Tesfahunegn [65] who states that socioeconomic and biophysical factors determine farmers' views on efforts to preserve the environment. The main cognitive driving factors that influence farmers' attitudes include increasing crop yields, reducing labor, improving soil quality, and reducing weeds [66]. Unsustainable production systems can exacerbate negative impacts and changes in land use, thereby increasing the vulnerability of local populations to environmental and economic crises [67].

The next challenge in preserving andongan is the limited number of farmers who farm in an integrated manner while raising ducks, cows, and pigs. The impact is that farmers no longer cultivate water hyacinths to use as animal feed. This condition is in line with farmers around Lake Mutirikwi, Masvingo, Zimbabwe, where the perceptions and attitudes of farmers who have small livestock

and do not have livestock tend to dislike and do not use water hyacinth plants [68]. Water hyacinth tends to be considered an aquatic invasive weed because people do not know how to use it, such as using it for sustainable wastewater management [69]. Water hyacinth is an ancient technology that is still used today. Water hyacinth has been proven to be suitable for controlling various types of wastewater originating from urban and industrial areas [70].

The next challenge is that young farmers in Subak Sembung still don't know enough about andongan and its benefits in environmental remediation. Limited information about andongan causes reluctance to implement it. The same condition occurs in various countries, although research on phytoremediation technology is seen as a potentially useful contribution to more sustainable remediation, in fact this practice is still rarely implemented in remediation practices in European countries [71]. Phytoremediation is underutilized despite its proven success and potential. Commercial phytoremediation technologies appear to be underutilized globally [72]. Phytoremediation provides an approach that requires minimal costs and environmental impact. Integrating phytoremediation with other profitable activities including food production can be an alternative to optimize the implementation of phytoremediation [73].

Conclusion

Andongan as a local wisdom from Subak in Bali has a function as a water purifier by using plants as water purifiers. An andongan concept is a form of implementation of phytoremediation technology that has been carried out by Subak farmers in Bali for generations. Andongan is part of integrated farming with animal husbandry, where farmers dispose of andongan as part of efforts to purify water and as part of providing feed for pigs and ducks.

Two types of plants are very commonly used in making andongan, namely water hyacinth (*Eichornia Crassipes*) and lotus (*Nymphaeae sp.*). When the water hyacinth grows in thousands, it is used by farmers as feed for ducks and pigs. The lotus was chosen in the Andongan because the flowers are used for religious ceremonies. Sometimes farmers also sell the lotus flowers they produce, because of the high demand for lotus flowers during religious ceremonies in Bali.

The challenge in sustaining the andongan concept in Subak is currently hampered by the land ownership status of farmers. Cultivator farmers tend to be reluctant to make carriages because they think it will reduce the production area which will have an impact on reducing production. Another challenge is that farmers are increasingly integrating agriculture with animal husbandry so that hyacinth production is no longer used as feed for ducks or pigs.

References

1. Norken, I. N., Suputra, I. K., & Arsana, I. G. N. K. (2015). *Aktivitas Aspek Tradisional Religius Pada Irigasi Subak: Studi Kasus Pada Subak Piling, Desa Biaung, Kecamatan Penebel, Kabupaten Tabanan*. Universitas Udayana.
2. Salamanca, A., Nugroho, A., Osbeck, M., Bharwani, S., & Dwisasanti, N. (2015). *Managing a living cultural landscape: Bali's subaks and the UNESCO World Heritage Site*. Bangkok.
3. Doerr, F., & Virk, U. (2014). More than irrigation — The Balinese Subak system as a unique form of cooperative water resource management in Indonesia. *Journal of Food, Agriculture & Society*, 2, 181-182.
4. Norken, I. N., Suputra, I., & Arsana, I. G. N. K. (2016). Challenges to the conservation of Subak system as world cultural heritage in Bali. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 6, 215-225. <https://doi.org/10.17265/2161-6264/2016.04.001>
5. Rahmi, D. H., & Setiawan, B. (2020). Pressures on the Balinese world cultural landscape heritage: The case of Jatiluwih Subak Village. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 501. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/501/1/012032> EDN: <https://elibrary.ru/ryioan>
6. Zen, I. S., Surata, S. P. K., Titisari, P. W., Ab Rahman, S. A., & Zen, S. (2024). Sustaining subak, the Balinese traditional ecological knowledge in the contemporary context of Bali. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1306. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1306/1/012034>
7. Yekti, M. I., Schultz, B., Norken, I. N., Gany, A. H. A., & Hayde, L. (2017). Learning from experiences of ancient Subak schemes for participatory irrigation system management in Bali. *Irrigation and Drainage*, 66, 567-576. <https://doi.org/10.1002/ird.2122>
8. Sedana, G., Yastini, N. N., & Maulina, N. M. I. (2021). Roles of local farmers' organization in supporting food security: Case of Subak in Bali, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 911. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/911/1/012083> EDN: <https://elibrary.ru/oqfton>
9. Resiani, N. M. D., & Sunanjaya, I. W. (2020). The efficiency of water in supporting local wisdom and food sustainability in Subak Sange, Bali, Indonesia. *Agromet*, 34, 67-74. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.34.2.67-74> EDN: <https://elibrary.ru/shyjwa>
10. Muliarta, I. N., Suanda, I. W., & Suriani, N. L. (2021). Local wisdom of Balinese people managing water in Tirta (holy water) concept. *Asian Journal of Applied Research in Community Development and Empowerment*, 5, 28-31. <https://doi.org/10.29165/ajarcde.v5i3.76> EDN: <https://elibrary.ru/udvqaq>

11. Malakar, A., Snow, D. D., & Ray, C. (2019). Irrigation water quality — A contemporary perspective. *Water (Switzerland)*, 11, 1-24. <https://doi.org/10.3390/w11071482> EDN: <https://elibrary.ru/krrybv>
12. Rengasamy, P. (2018). Irrigation water quality and soil structural stability: A perspective with some new insights. *Agronomy*, 8, 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050072>
13. Allende, A., & Monaghan, J. (2015). Irrigation water quality for leafy crops: A perspective of risks and potential solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 7457-7477. <https://doi.org/10.3390/ijerph120707457>
14. Lothrop, N., Bright, K. R., Sexton, J., Pearce-Walker, J., Reynolds, K. A., & Verhougstraete, M. P. (2018). Optimal strategies for monitoring irrigation water quality. *Agricultural Water Management*, 199, 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.018>
15. Bortolini, L., Maucieri, C., & Borin, M. (2018). A tool for the evaluation of irrigation water quality in the arid and semi-arid regions. *Agronomy*, 8, 1-15. <https://doi.org/10.3390/agronomy8020023> EDN: <https://elibrary.ru/ygeyux>
16. Gusain, R., Kumar, N., & Ray, S. S. (2020). Recent advances in carbon nanomaterial-based adsorbents for water purification. *Coordination Chemistry Reviews*, 405, 213111. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.213111> EDN: <https://elibrary.ru/utkxpx>
17. Bolisetty, S., Peydayesh, M., & Mezzenga, R. (2019). Sustainable technologies for water purification from heavy metals: Review and analysis. *Chemical Society Reviews*, 48, 463-487. <https://doi.org/10.1039/c8cs00493e>
18. Abas, A., Aziz, A., & Awang, A. (2022). A systematic review on the local wisdom of indigenous people in nature conservation. *Sustainability*, 14, 3415. <https://doi.org/10.3390/su14063415> EDN: <https://elibrary.ru/eiabsr>
19. Wiguna, I. P. P., Sudarta, W., & Diarta, I. K. S. (2018). Model diversifikasi fungsi Subak sebagai daya tarik ekowisata di Subak Sembung, Peguyangan, Kecamatan Denpasar Utara. *Journal of Agribusiness and Agritourism*, 7, 542. <https://doi.org/10.24843/jaa.2018.v07.i04.p09>
20. Togatorop, T. T., Wijayanti, P. U., & Anggreini, I. G. A. A. L. (2022). Aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan ekowisata Subak Sembung, Kelurahan Peguyangan, Kecamatan Denpasar Utara, Kota Denpasar, Provinsi Bali. *Journal of Agribusiness and Agritourism*, 11, 1-23. <https://doi.org/10.24843/JAA.2022.v11.i02.p36>
21. Laksmi, P. K. W., Lasmi, N. W., Sukarnasih, D. M., & Wirati Adriati, I. G. A. (2019). The effect of organic rice productivity on Bali food security: A case study in Subak Peguyangan Denpasar, Bali. *International Business Research*, 12, 22. <https://doi.org/10.5539/ibr.v12n11p22>

22. Coombs, H. (2022). Case study research defined (White Paper). *Psychoanalytic Online*, 4, 49-59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7604301>
23. Chowdhury, A., & Shil, N. C. (2021). Thinking 'qualitative' through a case study: Homework for a researcher. *American Journal of Qualitative Research*, 5, 190-210. <https://doi.org/10.29333/ajqr/11280> EDN: <https://elibrary.ru/bqwazv>
24. Lucas, P., Fleming, J., & Bhosale, J. (2018). The utility of case study as a methodology for work-integrated learning research. *International Journal of Work-Integrated Learning*, 19, 215-222.
25. Takahashi, A. R. W., & Araujo, L. (2020). Case study research: Opening up research opportunities. *RAUSP Management Journal*, 55, 100-111. <https://doi.org/10.1108/RAUSP-05-2019-0109>
26. Rashid, Y., Rashid, A., Warraich, M. A., Sabir, S. S., & Waseem, A. (2019). Case study method: A step-by-step guide for business researchers. *International Journal of Qualitative Methods*, 18, 1-13. <https://doi.org/10.1177/1609406919862424>
27. Jumriani, J., Mutiani, M., Putra, M. A. H., Syaharuddin, S., & Abbas, E. W. (2021). The urgency of local wisdom content in social studies learning: Literature review. *Innovative Social Studies Journal*, 2, 103. <https://doi.org/10.20527/iis.v2i2.3076> EDN: <https://elibrary.ru/eracid>
28. Hasyem, M., & Ferizaldi. (2022). Community development based on local wisdom (Study on BUMK Tirtona in Hakim Wihllang Village, Bandar District, BenerMeriah Regency). *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, 648, 294-299. <https://doi.org/10.5220/0009901800002480>
29. Yuliana, E., Maulana, Y., Nitmalasary, T. N., Amri, N. H., Erlyn, P., Hariani, P. L., et al. (2021). Natural resources and environment management for the development of local wisdom. *Budapest International Research Critics Institute-Journal*, 4, 8248-8254.
30. Marhayani, D. A. (2016). Development of character education based on local wisdom in indigenous people Tengahan Sedangagung. *Journal of Education and Teaching in Learning*, 1, 66. <https://doi.org/10.26737/jetl.v1i2.40>
31. Yuliana, Sriyati, S., & Sanjaya, Y. (2017). Local wisdom of Ngata Toro community in utilizing forest resources as a learning source of biology. *AIP Conference Proceedings*, 1868. <https://doi.org/10.1063/1.4995217>
32. Ueangchokchai, C. (2022). Process of local wisdom transfer to promote good relationship between the elderly and new generations. *High Education Studies*, 12, 86. <https://doi.org/10.5539/hes.v12n3p86> EDN: <https://elibrary.ru/ayihed>
33. Zulfadrim, Z., Toyoda, Y., & Kanegae, H. (2018). The implementation of local wisdom in reducing natural disaster risk: A case study from West Sumatra. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 106. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012008>

34. Chaer, M. T., Rochmah, E. Y., & Sukatin, S. (2021). Education based on local wisdom. *Journal of Islamic Education*, 6, 145. <https://doi.org/10.52615/jie.v6i2.216>
35. Pamenang, F. D. N. (2021). Local wisdom in learning as an effort to increase cultural knowledge: Students' perception as prospective teachers. *International Journal of Indonesian Education and Teaching*, 5, 93-101. <https://doi.org/10.24071/ijiet.v5i1.3050> EDN: <https://elibrary.ru/tpspr>
36. Pradipta, I., Herdiansyah, H., & Putri, L. S. (2023). Balinese way of governing water: A social survey on water governance. *Journal of Research in Science Education*, 9, 4983-4990. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i7.3679> EDN: <https://elibrary.ru/yygdje>
37. Geria, I. M., Nastiti, T. S., Handini, R., Sujarwo, W., Dwijendra, A., Fauzi, M. R., et al. (2023). Built environment from the ancient Bali: The Balinese heritage for sustainable water management. *Heliyon*, 9, e21248. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21248> EDN: <https://elibrary.ru/fzooyk>
38. Suardiana, I. W. (2023). The discourse of glorifying water in the Balinese scriptural tradition to support the agricultural culture as the implementation of "Nangun Sad Krti Loka Bali". *E-Journal of Cultural Studies*, 16, 57. <https://doi.org/10.24843/cs.2023.v16.i01.p05> EDN: <https://elibrary.ru/mqjxia>
39. Shen, X., Dai, M., Yang, J., Sun, L., Tan, X., Peng, C., et al. (2022). A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. *Chemosphere*, 291, 132979. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132979> EDN: <https://elibrary.ru/zpmtcu>
40. Muthusaravanan, S., Sivarajasekar, N., Vivek, J. S., Paramasivan, T., Naushad, M., Prakashmaran, J., et al. (2018). Phytoremediation of heavy metals: Mechanisms, methods and enhancements. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 1339-1359. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0762-3> EDN: <https://elibrary.ru/wmvld>
41. Bhat, S., Bashir, O., Hag, S. A., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., et al. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303, 134788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788> EDN: <https://elibrary.ru/baqsro>
42. Sharma, P., & Pandey, S. (2014). Status of phytoremediation in world scenario. *International Journal of Environmental Bioremediation and Biodegradation*, 2, 178-191. <https://doi.org/10.12691/ijebb-2-4-5>
43. Retnaningdyah, C., Arisoesilaningsih, E., & Samino, S. (2017). Use of local hydromacrophytes as phytoremediation agent in pond to improve irrigation water quality evaluated by diatom biotic indices. *Biodiversitas*, 18, 1611-1617. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180440>

44. Jia, F., Li, Y., Hu, Q., Zhang, L., Mao, L., Zhu, L., et al. (2023). Factors impacting the behavior of phytoremediation in pesticide-contaminated environment: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 892, 164418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164418> EDN: <https://elibrary.ru/lrfwdw>
45. Fatima, K., Imran, A., Amin, I., Khan, Q. M., & Afzal, M. (2016). Plant species affect colonization patterns and metabolic activity of associated endophytes during phytoremediation of crude oil-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 6188-6196. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5845-0> EDN: <https://elibrary.ru/vkjwrg>
46. Wei, Z., Van Le, Q., Peng, W., Yang, Y., Yang, H., Gu, H., et al. (2021). A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123658. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123658> EDN: <https://elibrary.ru/lxbzqn>
47. Fletcher, J., Willby, N., Oliver, D. M., & Quilliam, R. S. (2020). Phytoremediation using aquatic plants. In B. Shmaefsky (Ed.), *Phytoremediation* (pp. 205-260). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00099-8_7
48. Magdziak, Z., Gasecka, M., Golinski, P., & Mleczek, M. (2015). Phytoremediation and environmental factors. In A. Ansari (Ed.), *Phytoremediation Management of Environmental Contamination* (Vol. 1, pp. 1-348). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10395-2>
49. Pinto, E., Aguiar, A. A. R. M., & Ferreira, I. M. P. L. V. O. (2014). Influence of soil chemistry and plant physiology in the phytoremediation of Cu, Mn, and Zn. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33, 351-373. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.885729>
50. Laghlimi, M., Baghdad, B., Hadi, H. El, & Bouabdli, A. (2015). Phytoremediation mechanisms of heavy metal contaminated soils: A review. *Open Journal of Ecology*, 5, 375-388. <https://doi.org/10.4236/oje.2015.58031>
51. Wimalarathne, H. D. A., & Perera, P. C. D. (2019). Potentials of water hyacinth as livestock feed in Sri Lanka. *Indian Journal of Weed Science*, 51, 101. <https://doi.org/10.5958/0974-8164.2019.00024.8>
52. Rajan, R. G. P., Jona, S. E., Dhinakaran, S., Dinesh, J., Deepika, R., Aruna, S., et al. (2022). Water hyacinth a sustainable source of feed, manure and industrial products: A review. *Agricultural Review*, 1, 3-6. <https://doi.org/10.18805/ag.r-2181> EDN: <https://elibrary.ru/nsckcg>
53. Dölle, K., Tong, J., Wang, Q., Lorenz, V., Hennwood, A. J., & Dominesey, T. M. (2018). Water hyacinths - Biomass and water purifying potential for agricultural applications. *Journal of Advanced Biology and Biotechnology*, 18, 1-9. <https://doi.org/10.9734/jabb/2018/42741>

54. Ting, W. H. T., Tan, I. A. W., Salleh, S. F., & Wahab, N. A. (2018). Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.011> EDN: <https://elibrary.ru/yelyxz>
55. Wu, W., Liu, A., Wu, K., Zhao, L., Bai, X., Li, K. Z., et al. (2016). The physiological and biochemical mechanism of nitrate-nitrogen removal by water hyacinth from agriculture eutrophic wastewater. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 59, 1-10. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2016160517>
56. Priya, E. S., & Selvan, P. (2017). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) - An efficient and economic adsorbent for textile effluent treatment - A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3548-S3558. <https://doi.org/10.1016/j.arab-jc.2014.03.002>
57. Gardetti, M. A., & Muthu, S. S. (2015). *Handbook of sustainable luxury textiles and fashion* (Vol. 1, pp. 1-211). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-633-1>
58. Ahmed, A. M. (2022). Imitation of the lotus flower in architecture: Its use in the decoration of walls and ceilings of palaces, houses, and tombs in ancient Egypt. *Res Mobilis*, 11, 1-20. <https://doi.org/10.17811/RM.11.14.2022.1-20> EDN: <https://elibrary.ru/uhorqy>
59. Zhang, W., Tian, D., Huang, X., Xu, Y., Mo, H., Liu, Y., et al. (2014). Characterization of flower-bud transcriptome and development of genic SSR markers in Asian lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.). *PLOS ONE*, 9, 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112223>
60. Zang, D., Xun, X., Gu, Z., Dong, J., Pan, T., & Liu, M. (2020). Fabrication of superhydrophobic self-cleaning manganese dioxide coatings on Mg alloys inspired by lotus flower. *Ceramics International*, 46, 20328-20334. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.121> EDN: <https://elibrary.ru/tymqyc>
61. Al-Huqail, A. A., Kumar, P., Eid, E. M., Taher, M. A., Kumar, P., Adelodun, B., et al. (2022). Phytoremediation of composite industrial effluent using sacred lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn): A lab-scale experimental investigation. *Sustainability*, 14. <https://doi.org/10.3390/su14159500> EDN: <https://elibrary.ru/gkpofo>
62. Jyoti, D. (2017). Comparative study of the role of *Nelumbo nucifera* (Sacred Lotus) in phytoremediation for sewage untreated water from Khan River and Annapurna Lake water at Indore, Madhya Pradesh. *International Journal of Applied Pure and Applied Sciences*, 3, 70-73. <https://doi.org/10.22623/ijapsa.2017.3043.pqehn>
63. Abd Rasid, N. S., Naim, M. N., Che Man, H., Abu Bakar, N. F., & Mokhtar, M. N. (2019). Evaluation of surface water treated with lotus plant; *Nelumbo*

- nucifera. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 103048. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103048>
64. Noerhayati, E., Suprpto, B., Rahmawati, A., & Mustika, S. (2023). Improving wastewater quality system using the Internet of Things-based phytoremediation method. *Journal of Ecological Engineering*, 24, 254-262. <https://doi.org/10.12911/22998993/158382> EDN: <https://elibrary.ru/kjxjrw>
65. Tesfahunegn, G. B. (2019). Farmers' perception on land degradation in northern Ethiopia: Implication for developing sustainable land management. *Social Science Journal*, 56, 268-287. <https://doi.org/10.1016/j.soscij.2018.07.004>
66. Lalani, B., Dorward, P., Holloway, G., & Wauters, E. (2016). Smallholder farmers' motivations for using conservation agriculture and the roles of yield, labour and soil fertility in decision making. *Agricultural Systems*, 146, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.04.002>
67. Seghezzo, L., Huaranca, L. L., Vega, M. L., Jeckeln, G. V., Avalos, M. A., Iribarnegaray, M. A., et al. (2020). Sustainable farmers, deficient State? Self-reported agricultural sustainability in the Argentine Chaco region. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 0, 473-491. <https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1793645> EDN: <https://elibrary.ru/odkhdp>
68. Hungwe, T., Baloyi, J., & Ngongoni, N. (2016). Local knowledge, perceptions and attitudes about water hyacinth among communities adjacent to Shagashe River and. *Indilinga: African Journal of Indigenous Knowledge Systems*, 15, 123-138. <https://hdl.handle.net/10520/EJC194927>
69. Van Oijstaeijen, W., Van Passel, S., Cools, J., Janssens de Bisthoven, L., Hugé, J., Berihun, D., et al. (2020). Farmers' preferences towards water hyacinth control: A contingent valuation study. *Journal of Great Lakes Research*, 46, 1459-1468. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.06.009> EDN: <https://elibrary.ru/vqwagw>
70. Rezanias, S., Ponraj, M., Talaiekhazani, A., Mohamad, S. E., Md Din, M. F., Taib, S. M., et al. (2015). Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*, 163, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.018> EDN: <https://elibrary.ru/vftmur>
71. Bleicher, A. (2016). Technological change in revitalization - Phytoremediation and the role of nonknowledge. *Journal of Environmental Management*, 184, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.046>
72. Gerhardt, K. E., Gerwing, P. D., & Greenberg, B. M. (2017). Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Science*, 256, 170-185. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.016> EDN: <https://elibrary.ru/yzwlhf>

73. Haller, H., & Jonsson, A. (2020). Growing food in polluted soils: A review of risks and opportunities associated with combined phytoremediation and food production (CPFP). *Chemosphere*, 254, 126826. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126826> EDN: <https://elibrary.ru/iwreqr>

DATA ABOUT THE AUTHOR

I Nengah Muliarta, Dr. of Agricultural Science

Warmadewa University

Jl. Terompong No.24, Sumerta Kelod, Denpasar-Bali, Indonesia

nengahmuliarta@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5389-4528>

Scopus Author ID: 57212138910

Поступила 16.10.2024

После рецензирования 25.11.2024

Принята 28.11.2024

Received 16.10.2024

Revised 25.11.2024

Accepted 28.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1165

EDN: ENIMQQ

УДК 581.5:58.056



Научная статья

АРИДИЗАЦИЯ КЛИМАТА В ЗАПАДНОМ ПРИКАСПИИ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ПАСТБИЩНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

Л.П. Рыбаилыкова

Аннотация

Обоснование. Полупустынная зона Западного Прикаспия подвержена жестким климатическим изменениям в период вегетации культур, в том числе и на естественных пастбищных угодьях, что служит причиной опустынивания территорий. Объектом рассмотрения засушливой территории Западного Прикаспия на предмет аридизации климата является Нефтекумский район, где в наибольшей степени проявляются факторы аномальных климатических изменений, характерных для данной зоны, влияющих, в том числе и на продуктивность пастбищных фитоценозов.

Цель исследований – изучить динамику изменения климатических условий в районе Западного Прикаспия с оценкой снижения продуктивности пастбищных фитоценозов.

Результаты. Результаты анализа климатических изменений за апрель - октябрь 31-его летнего периода исследований (1993-2023 гг.) показали среднегодовой рост температур на 0,05 °С с наиболее интенсивным его темпом с 2018 по 2023 годы, составляющим 0,11 °С. Аналогичная тенденция отмечается и по количеству осадков, ежегодное снижение с 2018 по 2023 годы составляет 11,8 мм. Отмечается интенсивное снижение значения ГТК периода с апреля по октябрь 2011-2023 годов со скоростью 0,03 единицы в год, что говорит об интенсивной аридизации климата. Анализ данных реестра засух показал, что если в первое десятилетие (1993-2002 гг.) периоды сильной засух наблюдались в 34,3 % случаев, то в последнее десятилетие (2014-2023 гг.) – в 47,1%, следовательно, наблюдается интенсивный процесс аридизации.

Заключение. Анализ данных засух 31-летнего периода по месяцам (апрель – октябрь) показал, что наиболее сильная засуха отмечается в июле

(51,6% лет) и августе (54,8 % лет), при этом если в августе 1993-2002 годов сильная засух наблюдалась в 5 случаях определенных лет, то в период 2014-2023 годов их было 9 единиц.

В различные по агроклиматическим условиям годы исследований (2018-2023 гг.) установлены значимые колебания продуктивности пастбищ. В благоприятном 2021 году, при значении ГТК апреля и мае 0,64, а июня – 1,86, продуктивность кормов полынно-злакового пастбища составил 1,18 т/га, в критически аномальном 2022 году с ГТК апреля – мая равным 0,2 – 0,25 всего 0,53 т/га. Аналогичная закономерность установлена для эфемерово-злаковых и разнотравно-злаковых пастбищ, где снижение продуктивности составило 0,52 и 0,53 т/га соответственно в сравнении с 2021 годом.

Ключевые слова: аридизация; Западный Прикаспий; климат; пастбищные фитоценозы; продуктивность

Для цитирования. Рыбашлыкова, Л. П. (2025). Аридизация климата в Западном Прикаспии как фактор снижения продуктивности пастбищных фитоценозов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 133-147. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1165>

Original article

ARIDIZATION OF THE CLIMATE IN THE WESTERN CASPIAN REGION AS A FACTOR IN REDUCING THE PRODUCTIVITY OF PASTURE PHYTOCENOSES

L.P. Rybashlykova

Abstract

Background. The semi-desert zone of the Western Caspian Sea is subject to severe climatic changes during the growing season of crops, including on natural pasture lands, which causes desertification of territories. The object of consideration of the arid territory of the Western Caspian Sea for climate aridization is the Neft-ekumsky district, where the factors of abnormal climatic changes characteristic of this zone are most pronounced, affecting, among other things, the productivity of pasture phytocenoses.

The **purpose** is to study the dynamics of changes in climatic conditions in the Western Caspian region with an assessment of the decrease in productivity of pasture phytocenoses.

Results. The results of the analysis of climate change for April - October of the 31-year research period (1993-2023) showed an average annual temperature increase of 0.05 °C with its most intense rate from 2018 to 2023, amounting to 0.11 °C. A similar trend is observed in terms of precipitation, the annual decrease from 2018 to 2023 is 11.8 mm. There is an intensive decrease in the value of the HTC in the period from April to October 2011-2023 at a rate of 0.03 units per year, which indicates an intensive aridization of the climate. Analysis of the data from the register of droughts showed that if in the first decade (1993-2002) periods of severe droughts were observed in 34.3% of cases, then in the last decade (2014-2023) – in 47.1%, therefore, an intensive process of aridization is observed.

Conclusion. An analysis of the data of droughts of the 31-year period by month (April – October) showed that the most severe drought is observed in July (51.6% of years) and August (54.8% of years). If in August 1993-2002 severe droughts were observed in 5 cases of certain years, then in the period 2014-2023 there were 9 units.

Significant fluctuations in pasture productivity have been established in the years of research that differ in agro-climatic conditions (2018-2023). In a favorable year 2021, with a value of 0.64 HTC in April and May, and 1.86 in June, the productivity of wormwood and cereal pasture feed was 1.18 t/ha, in a critically abnormal 2022 with an even 0.2 – 0.25 HTC of April - May, only 0.53 t/ha. A similar pattern was established for ephemeral-cereal and mixed-grass pastures, where productivity decreased by 0.52 and 0.53 t/ha, respectively, compared with 2021.

Keywords: aridization; Western Caspian; climate; pasture phytocenoses; productivity

For citation. L Rybashlykova, L. P. (2025). Aridization of the climate in the Western Caspian region as a factor in reducing the productivity of pasture phytocenoses. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 133-147. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1165>

Введение

Современные изменения климатических условий на территории России [1; 6; 23] характеризуются повышением температурного режима, снижением количества осадков и экстремальным ростом числа аномальных природных явлений: засухи, ветры и фрагментарные интенсивные осадки ливневого характера [15; 16; 17]. В определенной степени это может быть обосновано известным климатологическим циклом Брикнера, выражающимся в переходе от холодных и влажных лет к теплым и сухим с продолжительностью 30-35 лет [18]. Важным является тот факт, что глобализация изменений климатических факторов влияет на интенсивность

развития аграрного сектора производства, в том числе в южном регионе России [7; 12]. При этом сельское хозяйство попадает в аномальные климатические условия, связанные с повышением температуры окружающей среды и понижением количества осадков, что негативно влияет на уровень урожайности культур [4; 10; 14]. Западный Прикаспий подвержен сильно ужесточенным климатическим изменениям в период вегетации культур, в том числе и на пастбищных угодьях, что служит причиной опустынивания территорий. По данным ученых ФБНУ Северо-Кавказский ФНАЦ с 2013 по 2022 годы среднегодовой рост температуры воздуха по сравнению с многолетней климатической нормой составил в крайне засушливой зоне Ставропольского края 1,7 °С, а в засушливой зоне – на 1,5°С, при этом в крайне засушливой зоне отмечается снижение осадков на 10%, а в засушливой зоне на 6% [5]. Метеорологические данные показывают, что за последнее столетие среднегодовые температуры повысились и, как ожидается, будут постоянно повышаться на 2-5°С в будущем [11; 19; 20; 21; 25]. Повышение температуры и бесконтрольное использование животными кормовых угодий оказывает влияние на нарастающую степень деградации пастбищных фитоценозов и приводит к нарушению стабильности природных экосистем, низкой кормовой продуктивности (0,05-0,10 т/га), выпадению из травостоя ценных видов злаковых, бобовых растений и разнотравья, снижению их роста и развития [3; 8; 13; 22; 24].

Цель исследований – изучить динамику изменения климатических условий в районе Западного Прикаспия с оценкой снижения продуктивности пастбищных фитоценозов.

Новизна и актуальность исследований заключается в анализе долгосрочной динамики изменения климатических факторов крайне засушливой зоны Западного Прикаспия с констатацией деградиционных изменений в пастбищных фитоценозах.

Материалы и методы

Исследования в Западном Прикаспии, с анализом климатических условий, охватывающим 31-и летний период с апреля по октябрь 1993-2023 годов, проводились в Нефтекумском районе, где в большей степени проявляются характерные изменения климатических факторов для данной зоны. Почвы района исследования светло-каштановые средне- и легкосуглинистого механического состава с бонитетом 19-29 баллов. Климат – резко континентальный. Среднегодовое количество осадков 387-400 мм, ГТК – 0,63-0,72, сумма температур выше 10 °С – 3720 – 3750 °С. Верхний

предел температуры отмечается в августе до 41,1°C, а самый нижний до -14,1°C в январе. Средняя температура воздуха в Нефтекумском районе, принимая во внимание многолетние наблюдения, оценивается в 16,4°C. На протяжении года: солнечно-ясных дней - 152, дней со снегопадом - 19, дней с осадками - 72, пасмурных дней – 123. Геоботанические описания растительности и оценка состояния кормовых угодий выполнялась на постоянных пробных площадях размером 10X10 м. Урожайность травостоя по хозяйственно ценным группам определялась методом скашивания на делянках размером 1м² в 5-ти кратной повторности.

Информация об агроклиматических условиях в Нефтекумском районе за 1993-2023 годы получена по данным электронного ресурса: <https://climate.sniish.ru/> и материалам научного издания [2]. Группировка значений метеорологических условий по усредненным 10-и летним периодам, для построения графиков в программе Microsoft Excel проводилась методом скользящих данных.

Результаты и их обсуждение

Для выявления региональных аспектов глобального изменения климата в Западном Прикаспии был выбран 31-и летний период наблюдений с 1993 по 2023 годы. Установлен нелинейный тренд скользящих значений роста среднегодовых температур за последний 31 год на 0,05 °C с наиболее интенсивным его темпом с 2018 по 2023 годы, составляющим 0,11 °C.

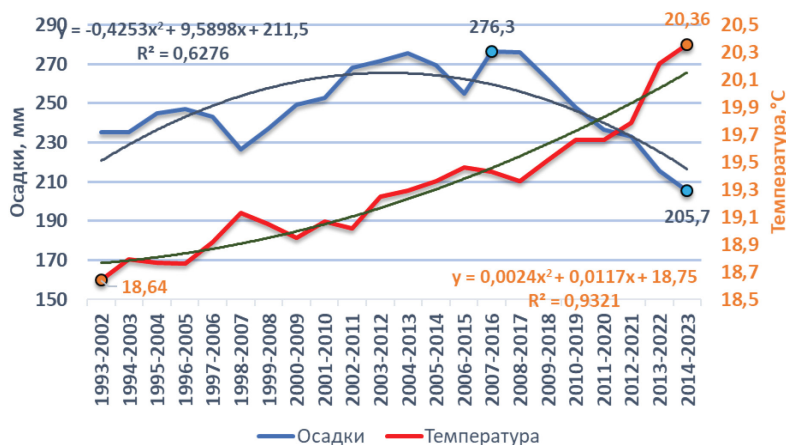


Рис. 1. Скользящие значения 10-летних периодов годовых температур и количества осадков в Нефтекумском районе за период 1993-2023 гг.

Проверка временного ряда роста температур по знаковому критерию тренда Кокса и Стюарта [9] показал, что значению показателя $z = 3,2$ при двухстороннем критерии соответствует вероятность $P = 0,010$, то есть установлено достоверное возрастание тренда при 5% уровне значимости. Аналогичная тенденция отмечается и по количеству осадков, ежегодное снижение с 2018 года составляет 11,8 мм (рис. 1).

Анализ значений ГТК периода с апреля по октябрь показал снижение этого показателя с 2011 по 2023 годы со скоростью 0,03 единицы в год, что говорит об интенсивной аридизации климата (рис. 2). Этот период обусловлен исключительной важностью, поскольку климатические условия в период апрель – октябрь определяют продуктивность пастбищных фитоценозов.

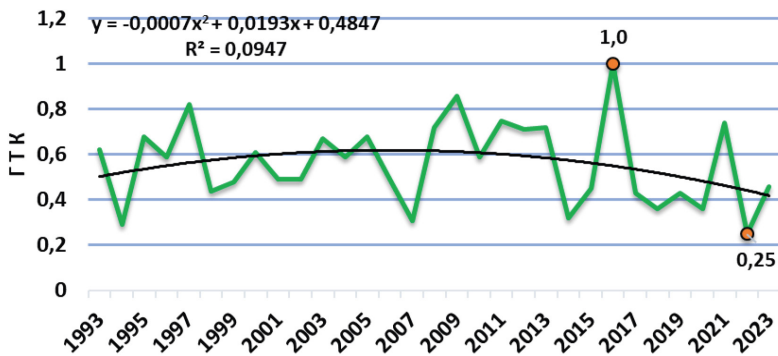


Рис. 2. Динамика осредненного гидротермического коэффициента в Нefтекумском районе за период 1993-2023 гг.

Разработка реестра засух весенне-осеннего периода за 1993-2023 годы позволяет дать оценку гидротермического режима в длительном цикле наблюдений с возможностью прогнозировать изменение погодных условий, используя годы – аналоги (рис. 3). Анализ данных показал, что в первое десятилетие (1993-2002 гг.) периоды сильной засух наблюдались в 34,3 % случаев, средней засухи в 14,2%, а в последнее десятилетие (2014-2023 гг.) – в 47,1% и 11,4% случаев соответственно, следовательно, наблюдается интенсификация процесса аридизации. При этом рассмотрение 31-летнего периода по месяцам установлено, что наиболее сильная засуха отмечается в июле (51,6% случаев) и августе (54,8 % случаев), при этом если в августе 1993–2002 годов сильная засух наблюдалась в 5 случаях определенных лет, то в период 2014–2023 годов их было 9 единиц.

Месяц / Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
1993	0,01	1,1	0,55	0,45	1	0,07	0,31
1994	0,17	0,82	0,55	0,08	0,23	0,01	0,2
1995	1,86	0,25	0,31	0,5	0,29	0,88	2,03
1996	0,75	0,3	0,85	0,21	0,79	0,42	1,61
1997	2,92	0,44	2,1	0,72	0,22	0,53	0,07
1998	0,6	0,22	1,51	0,08	0,11	0,37	0,03
1999	0,66	0,98	0,03	0,05	1,04	0,55	0,09
2000	1,42	0,98	0,54	0,3	0,3	0,64	0,71
2001	2,36	0,71	0,47	0,05	0,27	0,22	0,82
2002	1,54	0,61	1,42	0,11	0,71	0,13	0,94
2003	1,43	0,63	0,49	0,01	0,03	0,28	1,9
2004	1,49	0,14	0,8	0,54	0,37	0,48	0,98
2005	1,38	0,88	0,89	0,6	0,2	0,42	1,74
2006	0,5	1,95	0,32	0,03	0,39	0,07	0,75
2007	0,01	0,37	0,29	0,16	0,37	0,34	0,37
2008	0,73	1,56	0,96	0,57	0,09	0,96	0,49
2009	0,01	0,9	0,58	0,73	0,81	2	0,12
2010	1,08	0,95	0,49	0,7	0,01	0,29	2,04
2011	0,01	1,65	0,87	0,44	0,53	0,1	1,64
2012	0,24	0,7	1,54	1,16	0,38	0,46	0,02
2013	0,9	1,26	0,25	0,62	0,57	1,16	0,22
2014	0,67	0,65	0,21	0,21	0,14	0,38	0,01
2015	1,1	0,54	0,65	0,28	0,06	0,69	0,01
2016	0,74	2,44	1,18	1,53	0,01	0,27	0,01
2017	1,7	1,36	0,33	0,13	0,07	0,01	0,84
2018	0,46	0,15	0,41	0,79	0,28	0,23	0,01
2019	1,05	0,81	0,51	0,18	0,23	0,27	0,43
2020	0,1	0,9	0,31	0,1	0,55	0,43	0,01
2021	0,64	0,64	1,86	0,22	0,15	0,92	1,34
2022	0,2	0,26	0,25	0,19	0,01	0,49	0,64
2023	0,76	0,84	0,25	0,72	0,01	0,55	0,3

< 0,3	сильная засуха	0,7-0,9	засушливость
0,3-0,5	средняя засуха	0,9-1,1	неустойчивое увлажнение
0,5-0,7	слабая засуха	>1,1	достаточное увлажнение

Рис. 3. Реестр засух Нefтекумского района за 1993-2023 гг.

Климатические изменения в течение вегетационного периода способны менять видовую структуру травостоя и состояние отдельных видов

растений, что влияет на сроки стравливания и урожайность травостоя. В засушливые периоды объем фитомассы уменьшается в 2 раза, а содержание белка в кормах снижается в 1,5 раза. В самый засушливый период вегетации (июнь-август), при минимальном количестве осадков (<30 мм) и высокой теплообеспеченности (25,0-28,0°C), урожайность снижается на всех типах пастбищ на 61,7 %. С дефицитом осадков связано изменение не только качественного, но и количественного состава травостоя, особенно неблагоприятны засушливые условия, повторяющиеся 3-4 года, подряд и губительно сказывающиеся на урожае последующих лет. В условиях крайнего недостатка влаги большинство растений не заканчивает полный цикл своего развития и, следовательно, в этом году не обсеменяются. На следующий год всходов появляется меньше и при повторении засухи растения слабо обсеменяются или вовсе не дают семян. К примеру, недобор осадков за апрель – октябрь в 2022 году (107 мм от среднегодовой нормы) обусловил ко времени активной вегетации трав очень низкие почвенные запасы влаги, вследствие чего уже в мае метровый слой почвы иссушился. С середины мая до середины сентября травы находились в состоянии летнего покоя из-за большого недобора осадков. И только со второй половины сентября, на фоне понижения температуры и накопления почвенной влаги за счет выпавших осадков, началось осеннее отрастание трав.

Таблица 1.

Динамика продуктивности пастбищных фитоценозов за 2018-2023 годы

Тип пастбища / год	Продуктивность травостоя, т/га						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	среднее
полынно-злаковое	0,83	0,71	0,60	1,18	0,53	0,52	0,71
эфемерово-злаковое	0,80	0,68	0,54	0,92	0,40	0,45	0,63
разнотравно-злаковое	0,75	0,63	0,52	0,90	0,37	0,50	0,61
НСР ₀₅							0,07

Основными типами пастбищ района исследования являются злаковые, полынно-злаковые и разнотравно-злаковые. Максимальный урожай полынно-злакового сообщества наблюдается обычно в июне, снижаясь к осени на 50-60% и более. В полынно-прутняково-житняковом сообществе наибольший кормовой запас отмечается в июле, к осени он уменьшается на 20-30%. Данный тип пастбища характеризуется более стабильной урожайностью в течение вегетационного периода. Объясняется это тем, что в травостое имеются полукустарниковые виды, с длительным периодом вегетации, которые хорошо приспособлены к тем или иным условиям местообитания.

Статистический анализ средней продуктивности пастбищных фитоценозов за годы исследований (2018-2023 гг.) показал, что наиболее продуктивными являются полынно-злаковые пастбища (0,71 т/га), при этом показатели продуктивности эфемерово-злаковых и разнотравно-злаковых ценозов значимо ниже, снижение составляет 0,08 и 0,1 т/га соответственно (табл. 1). Однако в различные по метеорологическим условиям годы отмечаются достаточно значимые колебания продуктивности пастбищ. Так в 2021 году, когда в апреле и мае ГТК равнялось 0,64 (слабая засуха), а в июне – 1,86 (достаточное увлажнение), продуктивность кормов полынно-злакового пастбища составила 1,18 т/га, а в 2022 всего 0,53 т/га ввиду экстремальных климатических условий, так как ГТК апреля – мая составил 0,2 – 0,25, что соответствует сильной засухе (рис. 3). Аналогичная закономерность установлена для эфемерово-злаковых и разнотравно-злаковых пастбищ, когда при сложившихся экстремальных природно-климатических условиях 2022 года, снижение продуктивности составило 0,52 и 0,53 т/га соответственно в сравнении с 2021 годом.

Поэтому при введении пастбищеоборотов и заготовке страховых запасов кормов важно учитывать прогнозные колебания климатических факторов, влияющих на продуктивность пастбищных фитоценозов.

Заключение

1. Аридизация климатических условий в крайне засушливой зоне Западного Прикаспия связана с аномальными явлениями, выражающимися в более интенсивном росте температур с 2018 по 2023 годы на 0,11 °С и снижением количества осадков на 11,8 мм.

2. Установлено снижение значения ГТК с 2011 по 2023 годы со скоростью 0,03 единицы в год, что говорит об интенсивной аридизации климата. Отмечается увеличение процентного числа сильных засух с 34,3 % в первом десятилетии (1993 – 2002 гг.) до 47,1% в последнее десятилетие (2014 – 2023 гг.). Наиболее сильная засуха за все годы исследований отмечается в июле (51,6% случаев) и августе (54,8 % случаев), при этом если в августе 1993 – 2002 годов сильная засуха наблюдалась в 5 случаях, то в период 2014 – 2023 годов – 9 случаев.

3. При низких весенних почвенных влагозапасах (45-50% от нормы) и дефиците осадков в весенне-летний период максимальный урожай составляет 30-50% от среднееголетних значений. В такие годы необходимо создание запасов страховых кормов на весь период зимовки.

Информация о спонсорстве. Данное исследование было выполнено в рамках Государственного задания: «Разработка теории и системы мероприятий устойчивого функционирования пастбищных экосистем в аридных и субаридных зонах Прикаспия», 124013000642-9.

Список литературы

1. Антонов, С.А. & Каторгин, И.Ю. (2021). Картографирование характеристик изменения климата в Ставропольском крае. *Интеркарто. Интергис*, 27(3), 171-182. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-171-182> EDN: <https://elibrary.ru/lpbymu>
2. Бадахова, Г.Х. & Кнутов, А.В. (2007). *Ставропольский край: современные климатические условия*. Ставрополь: ГУП ИК «Региональные сети связи». 272 с. ISBN: 978-5-91228-012-2 EDN: <https://elibrary.ru/qkglej>
3. Бананова, В.А., Лазарева, В.Г. & Петров, К.М. (2021). Тенденции процессов опустынивания в северо-западной части Прикаспийской низменности. *Геология, география и глобальная энергия*, 1(80), 77-86. EDN: <https://elibrary.ru/imirkw>
4. Васильев, Ю.И., Волошенкова, Т.В. & Овечко, Н.Н. (2013). Методология прогноза варьирования урожая зерновых культур в агролесоландшафте в связи с нестабильностью климатических характеристик. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*, 4, 54-57. EDN: <https://elibrary.ru/qcnhrj>
5. Волошенкова, Т.В., Антонов, С.А., Калашникова, А.А. & Перегудов, С.В. (2023). Тенденции изменения климата в засушливых районах Ставропольского края. *Достижения науки и техники АПК*, 37(11), 5-11. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_11_5 EDN: <https://elibrary.ru/qehdpn>
6. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации* (2014). М.: Росгидромет. 1008 с. ISBN: 978-5-9631-0322-7
7. *Глобальные проявления изменений климата в агропромышленной сфере* (2004) / Под ред. акад. РАСХН А.Л. Иванова. М. 332 с.
8. Дедова, Э.Б., Гольдварг, Б.А. & Цаган-Манджиев, Н.Л. (2020). Деградация земель Республики Калмыкия: проблемы и пути их восстановления. *Аридные экосистемы*, 26(2), 63-71. EDN: <https://elibrary.ru/pqelox>
9. Закс, А. (1976). *Статистическое оценивание*. М.: Изд-во Статистика. 598 с.
10. Захарян, Ю.Г., Комаров, А.А. & Янко, Ю.Г. (2023). Оценка дифференциации агротехнологий по трём градациям с учётом глобального изменения климата. *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из*

- космоса, 20(3), 67-70. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-61-70> EDN: <https://elibrary.ru/bfskie>
11. Золотокрылин, А.Н., Черенкова, Е.А. & Титкова, Т.Б. (2020). Аридизация засушливых земель европейской части России и связь с засухами. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2, 207-217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X> EDN: <https://elibrary.ru/sfckus>
 12. Ксенофонов, М.Ю. & Ползиков, Д.А. (2020). К вопросу о влиянии климатических изменений на развитие сельского хозяйства России в долгосрочной перспективе. *Проблемы прогнозирования*, 3(180), 82-92. EDN: <https://elibrary.ru/fsisnb>
 13. Манаенков, А.С. & Рыбашлыкова, Л.П. (2023). Эколого-биологические аспекты кустарниковой мелиорации деградированных пастбищ на бугристо-увалистых комплексах песчаных земель Прикаспия. *Устойчивое развитие горных территорий*, 15(2), 246-255. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-246-255> EDN: <https://elibrary.ru/rzrfbx>
 14. Павлова, В.Н., Переведенцев, Ю.П., Караченкова, А.А., Тагиров, М.Ш. & Мирсаева, Н.А. (2023). Оценка агроклиматических ресурсов и урожайности яровой пшеницы в Республике Татарстан. *Метеорология и гидрология*, 1, 90-102. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-1-90-102> EDN: <https://elibrary.ru/hnahvo>
 15. Попов, В.В., Бокучава, Д.Д. & Матвеева, Т.А. (2022). Экстремальная засуха на восточно-европейской равнине в период потепления середины XX столетия: климатические характеристики и аналоги в условиях современного климата. *Аридные экосистемы*, 29(2), 3-11. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-2-3-11> EDN: <https://elibrary.ru/cailxd>
 16. Сажин, А.Н., Петров, С.А., Погосян, Н.В., Васильев, Ю.И., Волошенкова, Т.В., Козина, О.В. & Моников, С.Н. (2006). Взаимосвязь внутривековых изменений влажности со сменой эпох циркуляции и ее отражение в природных процессах Атлантико-европейского сектора Евразии. *Труды Российской академии наук. Серия географическая*, 1, 26-34.
 17. Чернокульский, А.В., Елисеев, А.В., Козлов, Ф.А., Коршунова, Н.Н., Курганский, М.В., Мохов, И.И., Семенов, В.А., Швец, Н.В., Шихов, А.Н. & Ярынич, Ю.И. (2022). Опасные атмосферные явления конвективно-го характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным. *Метеорология и гидрология*, 5, 27-41. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-5-27-41> EDN: <https://elibrary.ru/lxtplq>
 18. Brückner, E. (1890). Climate fluctuations since 1700: in addition to remarks on the climate fluctuations of the diluvial period. *Geographische Abhandlungen*, p. 325.

19. Gourdj, S. M., Sibley, A. M., & Lobell, D. B. (2013). Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024041. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024041>
20. Hidalgo-Galvez, M. D., Matías, L., Cambrollé, J., et al. (2023). Impact of climate change on pasture quality in Mediterranean dehesas subjected to different grazing histories. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05986-9> EDN: <https://elibrary.ru/tyktdu>
21. Liu, C., & Allan, R. P. (2013). Observed and simulated precipitation responses in wet and dry regions 1850-2100. *Environmental Research Letters*, 8, 034002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034002> EDN: <https://elibrary.ru/sqghb>
22. Manaenkov, A. S., Rybashlykova, L. P., Sivtseva, S. N., & Makhovikova, T. F. (2023). Silvopastoral transformation of desert lands in the Caspian Sea region. *Arid Ecosystems*, 13(1), 11-19. <https://doi.org/10.1134/S2079096123010080> EDN: <https://elibrary.ru/kgkatb>
23. Marvel, K., Cook, B., Bonfils, C., et al. (2019). Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence. *Nature*, 569(7754), 59-65. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1149-8>
24. Rybashlykova, L. P., Sivceva, S. N., & Makhovikova, T. F. (2023). Relationship between hydrothermal coefficient (HTC) and productivity of pastures in the arid zone of Northwestern Caspian Sea. *Journal of Agrometeorology*, 25(3), 454-457. <https://doi.org/10.54386/jam.v25i3.2220> EDN: <https://elibrary.ru/wwnzce>
25. Zolotokrylin, A. N., Cherenkova, E. A., & Titkova, T. B. (2018). Bioclimatic subhumid zone of Russian plains: droughts, desertification, and land degradation. *Arid Ecosystems*, 8(1), 7-12. <https://doi.org/10.1134/S2079096118010122> EDN: <https://elibrary.ru/xxrtlf>

References

1. Antonov, S. A., & Katorgin, I. Yu. (2021). Mapping of climate change characteristics in the Stavropol Territory. *Interkarto. Intergis*, 27(3), 171-182. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-171-182> EDN: <https://elibrary.ru/lpbymu>
2. Badakhova, G. Kh., & Knutov, A. V. (2007). *Stavropol Territory: Modern climatic conditions*. Stavropol: State Unitary Enterprise IC "Regional Communication Networks". 272 p. ISBN: 978-5-91228-012-2 EDN: <https://elibrary.ru/qkgclj>
3. Bananova, V. A., Lazareva, V. G., & Petrov, K. M. (2021). Trends of desertification processes in the northwestern part of the Caspian lowland. *Geology, Geography and Global Energy*, 1(80), 77-86. EDN: <https://elibrary.ru/imirkw>
4. Vasiliev, Yu. I., Voloshenkova, T. V., & Ovechko, N. N. (2013). Methodology for forecasting grain crop yield variation in agroforest landscape in connection

- with climatic characteristics instability. *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, 4, 54-57. EDN: <https://elibrary.ru/qcnhrj>
5. Voloshenkova, T. V., Antonov, S. A., Kalashnikova, A. A., & Peregudov, S. V. (2023). Climate change trends in arid regions of the Stavropol Territory. *Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex*, 37(11), 5-11. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_11_5 EDN: <https://elibrary.ru/qehdpn>
 6. *Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences in the Russian Federation* (2014). Moscow: Roshydromet. 1008 p. ISBN: 978-5-9631-0322-7
 7. *Global manifestations of climate change in the agro-industrial sector* (2004). Ed. by Acad. RASKHN A. L. Ivanov. Moscow. 332 p.
 8. Dedova, E. B., Goldvarg, B. A., & Tsagan-Mandzhiev, N. L. (2020). Land degradation in the Republic of Kalmykia: problems and ways of their restoration. *Arid Ecosystems*, 26(2), 63-71. EDN: <https://elibrary.ru/pqelox>
 9. Zaks, A. (1976). *Statistical estimation*. Statistics Publishing House. 598 p.
 10. Zakharyan, Yu. G., Komarov, A. A., & Yanko, Yu. G. (2023). Assessment of agrotechnology differentiation by three gradations considering global climate change. *Modern Problems of Remote Sensing of Earth from Space*, 20(3), 67-70. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-61-70> EDN: <https://elibrary.ru/bfskie>
 11. Zolotokrylin, A. N., Черенкова, Е. А., & Titkova, T. B. (2020). Aridization of arid lands in the European part of Russia and its connection with droughts. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2, 207-217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X> EDN: <https://elibrary.ru/sfckus>
 12. Ksenofontov, M. Yu., & Polzikov, D. A. (2020). On the impact of climate changes on the development of agriculture in Russia in the long term. *Problems of Forecasting*, 3(180), 82-92. EDN: <https://elibrary.ru/fsisnb>
 13. Manaenkov, A. S., & Rybashlykova, L. P. (2023). Ecological and biological aspects of shrubland reclamation of degraded pastures on hummocky-ridge complexes of Caspian sandy lands. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 15(2), 246-255. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-246-255> EDN: <https://elibrary.ru/rzrfbx>
 14. Pavlova, V. N., Perevedentsev, Yu. P., Karachenkova, A. A., Tagirov, M. Sh., & Mirsaeva, N. A. (2023). Assessment of agroclimatic resources and spring wheat yield in the Republic of Tatarstan. *Meteorology and Hydrology*, 1, 90-102. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-1-90-102> EDN: <https://elibrary.ru/hnahvo>

15. Popova, V. V., Bokuchava, D. D., & Matveeva, T. A. (2022). Extreme drought in the East European Plain during the warming period of the mid-20th century: climatic characteristics and analogs in the current climate. *Arid Ecosystems*, 29(2), 3-11. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-2-3-11> EDN: <https://elibrary.ru/cailxd>
16. Sazhin, A. N., Petrov, S. A., Pogosyan, N. V., Vasiliev, Yu. I., Voloshenkova, T. V., Kozina, O. V., & Monikov, S. N. (2006). Relationship between intra-century humidity changes and circulation epochs and its reflection in natural processes of the Atlantic-European sector of Eurasia. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 1, 26-34.
17. Chernokulsky, A. V., Eliseev, A. V., Kozlov, F. A., Korshunova, N. N., Kur-gansky, M. V., Mokhov, I. I., Semenov, V. A., Shvets, N. V., Shikhov, A. N., & Yarynich, Yu. I. (2022). Convective atmospheric hazards in Russia: observed changes according to various data. *Meteorology and Hydrology*, 5, 27-41. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-5-27-41> EDN: <https://elibrary.ru/lxtplq>
18. Brückner, E. (1890). Climate fluctuations since 1700: in addition to remarks on the climate fluctuations of the diluvial period. *Geographische Abhandlungen*, p. 325.
19. Gourdji, S. M., Sibley, A. M., & Lobell, D. B. (2013). Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024041. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024041>
20. Hidalgo-Galvez, M. D., Matias, L., Cambrollé, J., et al. (2023). Impact of climate change on pasture quality in Mediterranean dehesas subjected to different grazing histories. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05986-9> EDN: <https://elibrary.ru/kytdu>
21. Liu, C., & Allan, R. P. (2013). Observed and simulated precipitation responses in wet and dry regions 1850-2100. *Environmental Research Letters*, 8, 034002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034002> EDN: <https://elibrary.ru/sqghb>
22. Manaenkov, A. S., Rybashlykova, L. P., Sivtseva, S. N., & Makhovikova, T. F. (2023). Silvopastoral transformation of desert lands in the Caspian Sea region. *Arid Ecosystems*, 13(1), 11-19. <https://doi.org/10.1134/S2079096123010080> EDN: <https://elibrary.ru/kgkatb>
23. Marvel, K., Cook, B., Bonfils, C., et al. (2019). Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence. *Nature*, 569(7754), 59-65. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1149-8>
24. Rybashlykova, L. P., Sivceva, S. N., & Makhovikova, T. F. (2023). Relationship between hydrothermal coefficient (HTC) and productivity of pastures in the arid

- zone of Northwestern Caspian Sea. *Journal of Agrometeorology*, 25(3), 454-457. <https://doi.org/10.54386/jam.v25i3.2220> EDN: <https://elibrary.ru/wwnzce>
25. Zolotokrylin, A. N., Cherenkova, E. A., & Titkova, T. B. (2018). Bioclimatic subhumid zone of Russian plains: droughts, desertification, and land degradation. *Arid Ecosystems*, 8(1), 7-12. <https://doi.org/10.1134/S2079096118010122> EDN: <https://elibrary.ru/xxrtlf>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Рыбашлыкова Людмила Петровна, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук (ФНЦ агроэкологии РАН)»*

Университетский проспект, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация

rybashlykova-l@yfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Ludmila P. Rybashlykova, Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist

Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences

97, Universitetskiy prospect, Volgograd, 400062, Russian Federation

rybashlykova-l@yfanc.ru

SPIN-code: 3365-6897

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3675-6243>

Поступила 28.09.2024

После рецензирования 07.11.2024

Принята 15.11.2024

Received 28.09.2024

Revised 07.11.2024

Accepted 15.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1222

EDN: EYOLBF

УДК 581.5:631.6



Научная статья

МОНИТОРИНГ, КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ОПУСТЫНИВАНИЯ ПАСТБИЩ И ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИКАСПИЯ

Л.П. Рыбаилыкова

Аннотация

Обоснование. Статья посвящена детальному анализу состояния пастбищ, подверженных опустыниванию в условиях Северо-Западного Прикаспия, сложившегося конкретно на сильноосбитых пастбищах Республики Калмыкия. Отмечается, что основными причинами деградационных процессов на естественных пастбищах являются как сложившиеся природно-климатические условия, так и неоднозначная стратегия использования пастбищных угодий.

Цель исследований – оценка опустынивания сильноосбитых пастбищ полупустынной зоны Калмыкии и приемы фитомелиоративного восстановления пастбищных экосистем.

Материалы и методы. Исследования проводились согласно общепринятым методикам в геоинформатике и геоботанике. Оценка распространения песков по территории восточных районов Калмыкии проводилась с помощью программного комплекса ARC GIS и данных съемки со спутников Landsat 9. Комплексный показатель оценки состояния сильноосбитых пастбищ рассчитывался по формуле $W = \sqrt[n]{Z_1^{a_1} \cdot Z_2^{a_2} \cdot Z_3^{a_3}}$, где Z_i – желательности i -го показателя; a_i – его весомость, n – число показателей. Желательности Z_i для отдельных показателей рассчитывались с помощью линейных уравнений вида $Z_i = ax_i + b$, полученных на основании функциональной зависимости стандартных желательностей от средних значений диапазонов показателей пастбищ. Весомость показателей a_i определялась методом экспертной оценки. Геоботаническое описание растительности выполняли на пробных участках площадью 0,25 га. Названия растительных сообществ устанавливались по доминантным видам растений, обилие по шкале О. Друдэ. На заложенных трансектах размером 300 м x 4 м учет объема фитомассы кустарников и полукустарников проводился способом модельных кустов, а трав – укосным методом.

Результаты. Разработана карта площадей пастбищ, подверженных распространению песков в восточных районах Калмыкии показывающая, что площади песков в Черноземельском, Яшкульском и Юстинском районах составляют диапазон в пределах 648,0 – 281,3 т. га, с меньшей площадью распространения песков в Лаганском районе – 117,7 т. га. Эти факторы послужили основанием для проведения расчетов комплексного показателя оценки деградации почвенно-растительного покрова сильноосбитых пастбищ республики (W), взяв за основу натуральные значения показателей: сбитость пастбищ, проективное покрытие, продуктивность пастбищных угодий. Установлено, что сильноосбитые пастбища восточной зоны Калмыкии в Черноземельском районе ($W = 0,442$) находятся в состоянии критического уровня деградации, а в Юстинском ($W = 0,761$), Лаганском ($W = 0,814$) и Яшкульском ($W = 0,949$) районах уровень деградации почвенного покрова пастбищ достаточно высок, что предполагает потенциальное распространение на этих территориях песков.

Заключение. Предложено при освоении открытых песчаных массивов и истощённых угодий применять фитомелиорацию (травы + кустарники). Травянисто-кустарниковые угодья, с пастбищезащитными полосами и мелиоративно-кормовыми насаждениями, включающими засухоустойчивые виды кустарника *Calligonum aphyllum* и полукустарника *Krascheninnikovia ceratoides*, обеспечивают проективное покрытие почвы, составляющее 65–70% при увеличении фитомассы, в зависимости от видового состава, от 13,8 до 33,6 ц/га.

Ключевые слова: мониторинг; комплексная оценка; деградация; пастбища; очаги дефляции; фитомелиорация

Для цитирования. Рыбашлыкова, Л. П. (2025). Мониторинг, комплексная оценка опустынивания пастбищ и их восстановление в условиях Северо-Западного Прикаспия. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 148-168. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1222>

Original article

MONITORING, COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF PASTURE DESERTIFICATION AND THEIR RESTORATION IN THE CONDITIONS OF THE OF THE NORTHWESTERN CASPIAN SEA

L.P. Rybashlykova

Abstract

Background. The article is devoted to a detailed analysis of the state of pastures subject to desertification in the conditions of the Northwestern Caspian Sea, which has de-

veloped specifically on heavily beaten pastures of the Republic of Kalmykia. It is noted that the main causes of degradation processes in natural pastures are both the prevailing natural and climatic conditions and an ambiguous strategy for the use of pasture lands.

The **purpose** assessment of desertification of heavily beaten pastures of the semidesert zone of Kalmykia and methods of phytomeliorative restoration of pasture ecosystems.

Materials and methods. The research was conducted according to generally accepted methods in geoinformatics and geobotany. The assessment of the distribution of sands over the territory of the eastern regions of Kalmykia was carried out using the ARC GIS software package and Landsat 9 satellite imagery data. The complex indicator is calculated using the formula $W = \sqrt[n]{Z_1^{a_1} \cdot Z_2^{a_2} \cdot Z_3^{a_3}}$, where Z_i is a desirability of the i -th indicator; a_i is its weight. The desirability of Z_i for individual indicators was calculated using linear equations of the form $Z_i = ax_i + b$, obtained on the basis of the functional dependence of standard desirability on the average values of ranges of pasture indicators. The weight of a_i indicators was determined by the method of expert assessment. The geobotanical description of vegetation was performed on trial plots with an area of 0.25 hectares. The names of plant communities were established according to the dominant plant species, abundance according to the O. Drude scale. On the laid transects measuring 300 m x 4 m, the volume of phytomass of shrubs and semi-shrubs was taken into account by the method of model bushes, and grasses by the mowing method.

Results. A map of the areas of pastures exposed to the spread of sands in the eastern regions of Kalmykia has been developed showing that the areas of sands in the Chernozemelsky, Yashkul'sky and Yustinsky districts range from 648.0 – 281.3 t. ha, with a smaller area of sand distribution in the Lagansky district – 117.7 t. ha. These factors served as the basis for calculating the integrated indicator for assessing the degradation of the soil and vegetation cover of heavily beaten pastures of the republic (W), taking as a basis the natural values of the indicators: downed pastures, projective coverage, productivity of pastures. It was found that the heavily beaten pastures of the eastern zone of Kalmykia: Justinsky (W = 0.761), Lagansky (W = 0.814), Chernozemelsky (W = 0.442) and Yashkul'sky (W = 0.949) districts are in a state of high soil degradation, suggesting the potential spread of sands in these territories.

Conclusion. It is proposed to use phytomelioration (grasses + shrubs) in the development of open sandy massifs and depleted lands. Herbaceous and shrubby lands, with pasture-protective belts and reclamation and forage plantations, including drought-resistant species of shrub *Calligonum aphyllum* and semi-shrub *Krascheninikovia ceratoides*, provide a projective soil coverage of 65-70% with an increase in phytomass, depending on the species composition, from 13.8 to 33.6 c/ha.

Keywords: Degradation; desertification; monitoring; integrated assessment; pastures; foci of deflation; phytomelioration

For citation. Rybashlykova, L. P. (2025). Monitoring, comprehensive assessment of pasture desertification and their restoration in the conditions of the of the Northwestern Caspian Sea. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 148-168. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1222>

Введение

В современных условиях борьба с опустыниванием и предупреждение деградации почвенного покрова пастбищ являются одними из приоритетных направлений мирового значения [10; 11; 16; 18; 28; 32]. Ежегодно процессу опустынивания во всем мире подвергается территория, равная половине Европейского Союза (4,18 млн. км²). Международные организации (ФАО, ЮНЕП, ИКРАФ, КБО ООН) уделяют большое внимание мероприятиям по борьбе с этим опасным явлением [30]. Оценка, проведенная в 1992 году ЮНЕП показала, что в глобальном масштабе опустыниванию подвержены 3.6 млрд. га или 70% всех засушливых территорий, причем наиболее ярким следствием опустынивания является деградация 3.3 млрд. га пастбищных угодий [34]. По данным ООН более 75% земной поверхности суши уже деградировано и к 2050 году этот показатель может превысить 90% [3]. Пастбища в РФ занимают 57,1 млн. га или 15% земель сельскохозяйственного назначения [5]. Основные площади пастбищных угодий страны сосредоточены в зонах сухих степей и полупустынь, в том числе на территории Республики Калмыкия.

Современная тенденция увеличения количества открытых песков в восточных районах Калмыкии создает серьезную проблему сохранения существующих полупустынных пастбищ, которые все больше трансформируются в пустынные. Очаги открытых песков при определенных условиях являются резервом для прогрессирования опустынивания [2; 7; 27].

Одной из значимых проблем экологического состояния пастбищ Республики Калмыкия является опустынивание, выражающееся в деградации почвенного покрова пастбищ, составляющей до 80 % [6; 17]. Динамика и направленность процессов опустынивания связана как с природно-климатическими условиями аридной территории Калмыкии, так и с интенсивностью и направленностью хозяйственного использования пастбищ. В ряде исследований [8; 9; 23; 26; 31] предлагаются концептуальные решения и методы восстановления деградированного почвенного покрова пастбищ. Прежде всего, это касается пастбищ с высокой степенью их сбитости, по-

скольку уровень этого показателя напрямую связан с подверженностью данной территории распространению развеваемых песков.

Сильносбитые пастбища имеют ряд технологических и продуктивных показателей, основными из которых является сбитость пастбищ, обусловленная нарушением структурного состояния верхнего слоя почвы; проективное покрытие, т.е. наличие поверхностного растительного покрова, защищающего почву от испарения влаги и объем продуктивной фитомассы пастбищных угодий, связанный с интенсивностью выпаса. Однако эти показатели имеют не только различную размерность (% и т/га), но и по-разному оцениваются экспертами на предмет весомости того или иного показателя в плане общей оценки состояния почвенно-растительного покрова сильносбитых пастбищных угодий. Поэтому для оценки состояния таких пастбищ, прежде всего в восточных районах Калмыкии, в большей степени подверженных риску распространения массивов открытых песков, необходима разработка комплексного показателя состояния пастбищ (W), учитывающего как желательность, так и весомость каждого из показателей. Современная наука и практика предлагают технологии биологической рекультивации почв деградированных пастбищ на основе направленной фитомелиорации [12; 14; 21; 24; 29; 33].

Учеными ВНИАЛМИ и Калмыцкой НИАГЛЮС Петровым В.И., Маенаевым А.С., Гольдварг Б.А., Кладиевым А.К., Лачко О.А. и др. в 80-е гг. разработаны и апробированы на практике технологии комплексной фитомелиорации опустыненных пастбищ. В дальнейшем они применялись для восстановления почвенно-растительного покрова пастбищ и формирования травянисто-кустарниковых насаждений в очагах дефляции легких почв, а также улучшения пастбищ с деградированным покровом на бугристых песках, подверженных дефляции [4; 13; 15; 20; 22].

Опыт научных учреждений и производственных организаций показал, что лесонасаждения, создаваемые на пастбищах из разных жизненных форм растений (деревья, кустарники, полукустарники), оказывают большое влияние на повышение объема наземной растительной фитомассы и защиту почв от ветровой эрозии и дефляции.

Цель исследования – оценка опустынивания сильносбитых пастбищ полупустынной зоны Калмыкии и приемы фитомелиоративного восстановления пастбищных экосистем.

Материалы и методы

Географическое расположение территории Калмыкии определяет основные климатические особенности, проявляющиеся в формировании

континентального климата, свойственного для значительных по площади участков суши, а также в периодическом проникновении воздушных масс Атлантики. В соответствии с этими особенностями, на исследуемой территории формируется климат со сравнительно холодной, малоснежной зимой и продолжительным жарким летом. Максимальная температура июля $+42^{\circ}\text{C}$, минимальная температура января $-34\ldots-36^{\circ}\text{C}$, средняя температура января $-5\ldots-8^{\circ}\text{C}$, средняя температура июля $+23\ldots-26^{\circ}\text{C}$. Сумма температур составляет $3745-3960^{\circ}\text{C}$, вегетационный период с температурой выше 10°C продолжается от 180 до 213 дней. Неблагоприятные климатические условия: сухость, ветреность, сильная жара, почвенная засуха из-за отсутствия осадков, высокая температура воздуха, достигающая более $+40$ градусов, порывы ветра более 20 м/с, способствуют образованию новых очагов открытых песков и снижению продуктивности скудных по кормоёмкости пастбищ.

Комплексная оценка приемов фитомелиорации проводилась на локальных участках в крупных очагах дефляции Черноземельского и Яшкульского районов Калмыкии. За период исследований (2021-2023 гг.) среднегодовое количество осадков составляло 149-244 мм в Черноземельском районе при норме 270 мм, а в Яшкульском районе 140-355 мм при норме 255 мм. Современный вторичный растительный покров в этих районах сформировался под влиянием аридизации климата с ГТК в пределах 0,2-0,4 и нагрузки животных на пастбища в Черноземельском районе, составляющей 0.56 гол/га, в Яшкульском районе – 0.64 гол/га, что превышает нормативы на 27.8 и 36.2% соответственно.

Объектами исследований являлись участки травянисто-кустарниковых пастбищ с пастбищезащитными полосами из *Calligonum aphyllum* Pall. и мелиоративно-кормовыми насаждениями из *Krascheninnikovia ceratoides* L. Gueldenst. созданные в 1985-1988 годах в очагах дефляций на зональных бурых почвах, преимущественно легкого механического состава.

Участок 1. «Аэросев», Черноземельский район: координаты $45^{\circ}48'846''\text{N}$, $45^{\circ}49'968''\text{E}$, площадь 4000 га, возраст сукцессии 36 лет. Рельеф бугристо-грядовая равнина, почвы песчаные. Пастбище 3-х ярусное: 1 ярус - кустарниковый из *C. aphyllum*, 2 ярус – полукустарниковый из *K. ceratoides*, 3 ярус - травянистый из естественной и зональной растительности.

Участок 2. Система пастбищезащитных и мелиоративно-кормовых насаждений «Молодежный (джузгун)», Яшкульский район: координаты $46^{\circ}27'086''\text{N}$, $46^{\circ}24'535''\text{E}$, площадь 1500 га, возраст сукцессии 39 лет. Расстояние между полосами *C. aphyllum* 6 и 12 м, полукустарник *Krascheninnikovia* расположен в междурядных кулисах. Рельеф бугристо-грядовая равнина, пески слабогумусированные. Пастбище 3-х ярусное: 1 ярус - кустарниковый

из *C. aphyllum*, 2 ярус – полукустарниковый из *K. ceratoides*, 3 ярус – травянистый из естественной и зональной растительности.

Участок 3. Мелиоративно-кормовые насаждения «Молодежный (терескен)», Яшкульский район: координаты 46°33'011"N, 46°28'169"E, площадь 850 га, возраст сукцессии 39 лет. Почвы – бурые в комплексе с солонцами полупустынными 25-50 %, супесчаного механического состава. Рельеф – плоская равнина с развитым микрорельефом. Пастбище 2-х ярусное: 1 ярус – полукустарниковый из *K. ceratoides*, 2 ярус – травянистый из естественной и зональной растительности.

Участок 4. Мелиоративно-кормовые насаждения «Приканальное», Яшкульский район: координаты 45°98'736"N, 46°03'310"E, площадь 230 га, возраст сукцессии 38 лет. Рельеф – плоская равнина с микрорельефом, почвы песчаного механического состава. Пастбище 2-х ярусное: 1 ярус – полукустарниковый из *K. ceratoides*, 2 ярус – травянистый из естественной и зональной растительности.

Для оценки фитомелиорированных пастбищ использовались данные ежегодных полевых обследований по биоразнообразию, обилию видов, проективному покрытию и продуктивности. Геоботаническое описание растительности выполняли на пробных участках площадью 0,25 га. Названия растительных сообществ устанавливались по доминантным видам растений, обилие по шкале О. Друдэ. На заложенных трансектах размером 300 м x 4 м учет объема фитомассы кустарников и полукустарников проводился способом модельных кустов, а трав – укосным методом. Собранные научные материалы явились основанием для формирования базы данных, которые затем систематизировались, анализировались и обрабатывались.

Оценка распространения песков по территории восточных районов Калмыкии проводилась с помощью программного комплекса ARC GIS и данных съемки со спутников Landsat 9 [25]. Далее комплексно оценивалось состояние сильносбитых пастбищ районов Калмыкии. Расчет комплексного показателя (W) проводился по методике [19], основанной на использовании значений показателей: площади сбитости пастбищ, % (C_1), площади проективного покрытия, % (C_2) и объем фитомассы, ц/га (C_3). Комплексный показатель рассчитывался по формуле $W = \sqrt[n]{Z_1^{a_1} \cdot Z_2^{a_2} \cdot Z_3^{a_3}}$, где Z_i – желательности i -го показателя; a_i – его весомость. Желательности Z_i для отдельных показателей рассчитывались с помощью линейных уравнений вида $Z_i = a_i x_i + b_i$, полученных на основании функциональной зависимости стандартных желательностей от средних значений диапазонов показателей пастбищ. Весомость показателей a_i определялась методом экспертной оценки. Согласованность экспертной оценки проверялась методом χ^2 . Диапазон изменения

комплексного эталонного показателя W_z от «неудовлетворительной ситуации до критической» определяли методом группировки данных [1].

Результаты и их обсуждение

Главной и самой неблагоприятной особенностью открытых песков является их подвижность. Информация о месте и площади их распространения позволяет правильно определить технологию и сроки закрепления очагов дефляции и выработать тактику внедрения эффективных видов фитомелиорации. Оценка площадей пространственного размещения песков по районам восточной зоны Калмыкии (рис. 1) показала, что в Черноземельском районе площадь локальных наносов песков составляет 648,0 т. га территории района, в Яшкульском – 401,0 т. га, в Юстинском – 281,3 т. га и несколько меньше в Лаганском районе – 117,7 т. га, что позволяет принимать решения в плане проведения фитомелиоративных мероприятий в данных районах.

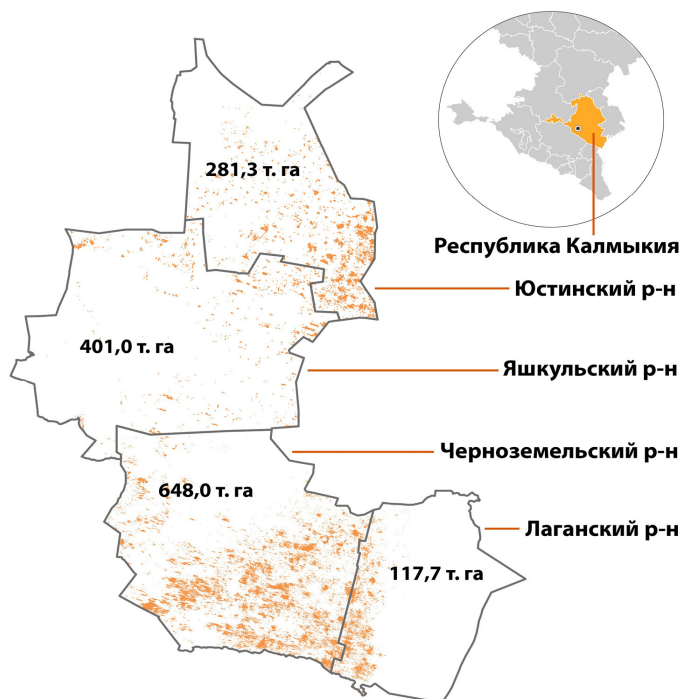


Рис. 1. Площади распространения комплексов из открытых и слобозаросших песков в районах восточной зоны Калмыкии

Основными типами пастбищ на территории Калмыкии являются: однолетниково-полынные, злаково-полынные и однолетниковые, составляющие около 90% всех пастбищ. По индикационным показателям растительного покрова пастбища подразделяются на несбитые и слабосбитые, среднесбитые, сильносбитые и очень сильносбитые. Наибольшую угрозу опустынивания представляют сильносбитые пастбища. Натуральные значения показателей состояния сильносбитых пастбищ Калмыкии представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Показатели состояния пастбищ Северо-Западного Прикаспия (Республика Калмыкия), 2024 г.

Районы обследования	Сбитость пастбищ, % (C ₁)	Проективное покрытие растительностью, % (C ₂)	Продуктивность, ц/га (C ₃)
Восточная зона			
Лаганский	30	15	1,75
Черноземельский	40	15	1,25
Юстинский	35	20	1,50
Яшкульский	27	20	1,75
Центральная зона			
Ики-Бурульский	20	17,5	1,25
Приютненский	27	17,5	1,25
Целинный	23	20	1,50
Кетченеровский	23	17,5	2,0
Сарпинский	25	15	1,25
Малодербетовский	25	20	2,0
Октябрьский	25	20	2,0

Экспертная оценка весомости показателей, характеризующих пастбища, проводилась с привлечением специалистов в области борьбы с деградацией пастбищных экосистем (табл. 2).

Таблица 2.

Результаты экспертной оценки

Эксперты	Показатели		
	C ₁	C ₂	C ₃
1	1/0,65*	3/0,15	2/0,2
2	1/0,75	3/0,05	2/0,2

3	1/0,75	3/0,05	2/0,2
4	1/0,65	3/0,15	2/0,2
5	1/0,55	3/0,15	2/0,3
6	1/0,85	3/0,05	2/0,1
7	1/0,7	3/0,1	2/0,2
Сумма рангов	7/0,7	21/0,1	14/0,2
Отклонение от средней суммы рангов	- 7	7	0
Квадраты отклонений	49	49	0

* в числителе – ранг показателя; в знаменателе – весомость показателя.

Применяя метод группировки данных (табл. 3), определялись диапазоны натуральных значений показателей, соответствующих определенным уровням относительной желательности (1 ... 0,2). Эталонные значений комплексного показателя W_j рассчитывались по уровням желательности Z_i (1 ... 0,2), с учетом установленных весомостей $a_1 \dots a_3$, при этом диапазоны с $W_j = 0,857 \dots 0,718$ и $W_j = 0,718 \dots 0,585$ условно принимаются как пастбища с высоким и очень высоким уровнем деградации соответственно.

Таблица 3.

Желательность диапазонов натуральных значений показателей пастбищ

Показатели	Обозначения	Желательность, Z_i				
		1	0,80	0,63	0,37	0,2
Сбитость, %	C_1	23-26,4	26,4-29,8	29,8-33,2	33,2-36,6	36,6-40
Проективное покрытие, %	C_2	20-19	19-18	18-17	17-16	16-15
Продуктивность, ц/га	C_3	2,0-1,85	1,85-1,7	1,7-1,55	1,55-1,4	1,4-1,25
Эталонные значения показателя W_j		0,997	0,928	0,857	0,718	0,585

Желательность натуральных значений показателей пастбищ определялась линейными уравнениями вида $Z_i = ax_i + b$ (табл. 4), полученным по пяти базовым точкам с желательностями Z_i равными 1, 0,80, 0,63, 0,37 и 0,2, усредненные значения натуральных показателей вычислялись по материалам таблицы 3.

Таблица 4.

Уравнения желательности Z_i для натуральных показателей

Показатели	Уравнения	r^2
C_1	$Z_1 = -0,06C_1 - 2,49$	0,93
C_2	$Z_2 = 0,2 C_2 - 2,95$	0,95
C_3	$Z_3 = 1,35 C_3 - 1,59$	0,97

Значения критерия W , рассчитанные на основе определения значений желательности $Z_{1...3}$ каждого из показателей и их весомости $a_1 \dots a_3$, приводятся в таблице 5.

Таблица 5.

Комплексный показатель W состояния сильноосбитых пастбищ районов обследования

Районы обследования	Сбитость, % (C_1)	Проективное покрытие, % (C_2)	Продуктивность, ц/га (C_3)	W
Восточная зона				
Лаганский	0,771*	0,741	0,949	0,814
Черноземельский	0,185	0,741	0,628	0,442
Юстинский	0,517	1,005	0,847	0,761
Яшкульский	0,907	1,005	0,949	0,949
Центральная зона				
Ики-Бурульский	1,195	0,941	0,627	0,891
Приютненский	0,907	0,941	0,627	0,813
Целинный	1,075	1,005	0,847	0,971
Кетченеровский	1,075	0,942	1,021	1,011
Сарпинский	0,993	0,741	0,628	0,773
Малодербетовский	0,993	1,005	1,021	1,006
Октябрьский	0,993	1,005	1,021	1,006

* Z_i – желательности показателей.

В результате расчетов комплексного показателя деградации пастбищ W и сравнение этих результатов с диапазонами эталонных значений W_z (табл. 3) установлено, что в восточной зоне Калмыкии сильноосбитые пастбища Черноземельского района ($W = 0,442$) находятся в состоянии близком к критическому уровню деградации, Лаганского ($W = 0,814$) и Юстинского ($W = 0,761$) районов в высокой степени деградации, в несколько меньшая степень деградация пастбищ отмечается в Яшкульском районе ($W = 0,949$).

На основании обследования территорий пастбищ и оценке приемов фитомелиорации на локальных участках в восточной зоне Калмыкии приводятся результаты состояния ранее фитомелиорированных угодий в Черноземельском и Яшкульском районах.

Для повышения продуктивности, созданные на отдельных участках кустарниковые насаждения (*K. ceratoides*, *C. aphyllum*), служат дополнительным источником корма и превращают естественные участки в травянисто-кустарниковые пастбища. Эти культуры, пережив многие годы жесточайших засух, сохранились до настоящего времени. Указанные кустарники характеризуются высокой кормовой производительностью, кустарник *C. aphyllum*, в зависимости от возраста и густоты стояния, даёт 4,0-5,3 ц/га воздушно-сухой кормовой массы на участке «Молодежный (джузгун)». Эффективность повышения продуктивности пастбищ за счёт посадки полукустарника *K. ceratoides* подтверждается более чем тридцатилетними опытами, заложенными на участках «Молодежный (терескен)», «Приканальное», «Аэросев». Проведённые учёты показали, что на участке «Молодежный (терескен)» на одном гектаре имеется 10-12 тысяч кустов *K. ceratoides* с урожайностью сухой поедаемой массы в 24,2 ц/га, на участке «Приканальное» 12,0-13,2 тыс. кустов с продуктивностью 20 ц/га. Пастбищезащитные лесные полосы, улучшая микроклимат, изменяя режим влажности почвы, защищая почву от дефляции на межполосных пространствах, создают более благоприятные условия для роста и развития естественной растительности. Средняя урожайность травостоя в межполосном пространстве, либо между кустарниками в зависимости от условий года и участка, в среднем колеблется в пределах от 8,5 до 13,1 ц/га, что в 1,1-1,5 раза выше по сравнению с открытой степью (рис. 2).

Геоботанический анализ участков показал, что растительный покров на травянисто-кустарниковых пастбищах в основном слагают злаковые ассоциации (участок «Молодежный (джузгун)»: *Poa bulbosa* L. (Cop₂), *Stipa capillata* L. (Cop₃), участок «Аэросев»: *P. bulbosa* (Cop₃), *Stipa sareptana* L. (Cop₃)), терескено-полынно-злаковые (участок «Молодежный (терескен)»: *P. bulbosa* (Cop₃), *Stipa lessingiana*, *S. capillata* (Cop₃), *Artemisia lerchiana* Weber ex Stechm. (Sp.), *K. ceratoides* (Sp.)), разнотравно-злаковые сообщества (участок «Приканальное» *Alyssum desertorum* (Stapf) Botsch. (Cop₂), *Sisymbrium loeselii* L. (Sol.), *S. capillata*, *S. lessingiana* (Cop₃)). *K. ceratoides*, *C. aphyllum*, являясь постоянными источниками корма для животных, создают более устойчивую кормовую базу в полупустынных условиях и закрепляют весьма податливые к ветровой эрозии песчаные почвы.



Рис. 2. Травянисто-кустарниковое пастбище Приканальное (слева) и прилегающая территория, контроль (степь) (справа) в летний период (2022 г. фото автора)

Таблица 6.

Агроэкологическое состояние и урожайность фитомелиорированных пастбищ (2021-2024 гг.)

Участок	Технология / фитомелиоранты	Анализ современного состояния		
		ПП, %	ботанический состав фитомассы, %	Продуктивность фитомассы, ц/га
«Молодежный (джузгун)»	под защитой борозд-валов испытаны различные варианты создания насаждений из <i>Calligonum aphyllum</i> , <i>Krascheninnikovia ceratoides</i> в междурядьях <i>Bassia prostrata</i> , <i>Agropyron fragile</i> , <i>Elytrigia intermedia</i>	55-60	Poa.-29 Ast.-41 Ama.-6 другие- 24	травы 8,5 куст 5,3 общая масса 13,8
«Молодежный (терескен)»	под защитой борозд-валов испытаны различные варианты создания насаждений из <i>Krascheninnikovia ceratoides</i> в междурядьях <i>B. prostrata</i> , <i>A. fragile</i> , <i>E. intermedia</i> .	60-70	Poa.-25 Ast.-8 Ama.-25 другие- 42	травы 9,4 куст 24,2 общая масса 33,6
«Приканальное»	на участке заложен опыт по ускоренному блокированию переноса песка и восстановлению растительного покрова с помощью кулис <i>Leymus racemosus</i> , с последующей посадкой сеянцев <i>Krascheninnikovia</i> .	65-70	Poa.-35 Ast.-20 Ama.-10 другие- 35	травы 7,2 куст 20,0 общая масса 27,2
«Аэросев»	испытан метод аэросева (самолет АН-2) мелиоранты – <i>Ulmus pumila</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> ., <i>Fraxinus pennsylvanica</i> , <i>Callygonum aphyllum</i> , <i>Krascheninnikovia ceratoides</i> , <i>Leymus racemosus</i> .	40-60	Poa.-29 Ast.-29 Ama.18- другие- 24	травы 13,1 куст 4,8 общая масса 17,9

Таким образом, общая продуктивность травяно-кустарниковых пастбищ на пробных площадях в Яшкульском районе на участке «Молодежный (джузгун)», где степень проективного покрытия 60 % и преобладает в составе фитомассы 41% видов семейства *Asteraceae*, с учетом кустарникового и полукустарникового яруса, составляет 13,8 ц/га. На участке «Молодежный (терескен)», с проективным покрытием 65% и преобладанием видов семейства *Poaceae* и *Amaranthaceae* по 25%, урожайность возрастает за счет плотности и количества кустарников на гектар, достигая 33,6 ц/га. На пастбище «Приканальное», где проективное покрытие составляет 70% с преобладанием видов семейства *Poaceae* 35%, урожайность сухой массы – 27,2 ц/га, что в 8-19 раз или на 12,1 -31,8 ц/га выше урожайности сена на сильноосбитых пастбищах. Обследование пастбища («Аэросев») в Черноземельском районе показало, что при проективном покрытии, составляющем 55% и преобладанием видов семейства *Poaceae* и *Amaranthaceae* по 29%, урожайность составляет 17,9 ц/га, что выше по сравнению с сильноосбитыми пастбищами на 16,4 ц/га (табл. 6).

Многолетний опыт показывает возможности улучшения состояния почв пастбищных угодий с применением методов фитомелиорации в жестких природных условиях Северо-Западного Прикаспия.

Заключение

1. Мониторинг площадей распространения песков в районах восточной зоны Калмыкии подтвердил наличие локальных наносов песков в Черноземельском районе, составляющее 648,0 тыс. га, в Яшкульском районе – 401,0 тыс. га, в Юстинском районе – 281,3 тыс. га с несколько меньшей площадью в Лаганском районе – 117,7 тыс. га, что является основанием для проведения комплекса фитомелиоративных мероприятий в данных районах.

2. Оценка деградационных процессов на сильноосбитых пастбищах восточных районов Республики Калмыкия, по комплексному показателю W , показала высокий уровень деградации пастбищных угодий Яшкульского ($W = 0,949$), Лаганского ($W = 0,814$) и Юстинского ($W = 0,761$) районов, а также близкого к критическому уровню состояние пастбищ в Черноземельском районе ($W = 0,442$).

3. Создание 2-3 ярусных травянисто-кустарниковых пастбищ в очагах дефляций является надежным и эффективным способом восстановления почвенно-травянистого покрова и повышения объема фитомассы. На начальном этапе восстановления и улучшения пастбищ основой является выбор технологии, породного состава (травы+полукустарники+кустарники) с учетом почвенно-климатических и других условий территории.

Информация о спонсорстве. Данное исследование было выполнено в рамках Государственного задания: «Разработка теории и системы мероприятий устойчивого функционирования пастбищных экосистем в аридных и субаридных зонах Прикаспия», 124013000642-9.

Список литературы

1. Айвазян, В.М., Бухштабер, И.С., Енюков, Л.Д. & Мешалкин, Л.Д. (1989). *Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности*. М.: Финансы и статистика. 607 с.
2. Бананова, В.А., Лазарева, В.Г. & Петров, К.М. (2021). Тенденции процессов опустынивания в северо-западной части Прикаспийской низменности. *Геология, география и глобальная энергия*, 1(80), 77-86. EDN: <https://elibrary.ru/imirkw>
3. Барабанщиков, Д.А. & Сердюкова, А.Ф. (2017). Борьба с опустыниванием земель. *Молодой ученый*, 25(159), 95-98. EDN: <https://elibrary.ru/yuhwhj>
4. Буянкин, В.И., Манаенков, А.С. & Лиманская, В.Б. (2019). *Повышение продуктивности деградированных земель засушливой зоны*. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН. 156 с.
5. *Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2022 году (2023)* / Составитель: Захарова Ж.Ю. М. 189 с.
6. Дедова, Э.Б. (2018). Адаптивные методы реализации экосистемного водопользования в АПК Республики Калмыкия. *Основные результаты исследований института за 2017 год. Сборник научных трудов*. М.: издательство ВНИИГиМ, 123-142. EDN: <https://elibrary.ru/xtzoc2>
7. Дедова, Э.Б., Гольдварг, Б.А. & Цаган-Манджиев, Н.Л. (2020). Деграация земель Республики Калмыкия: проблемы и пути их восстановления. *Аридные экосистемы*, 26(2), 63-71. EDN: <https://elibrary.ru/pqelox>
8. Зонн, И.С. & Куст, Г.С. (1999). Проблема опустынивания в России: состояние, оценка, пути решения. *Опустынивание и деградация почв. Материалы Международной научной конференции*. М.: Издательство МГУ, 52-65.
9. Кулик, К.Н., Габунщина, Э.Б., Кружилин, И.П., Куст, Г.С., Манаенков, А.С., Павловский, Е.С., Савостьянов, В.К., Тулухонов, А.К. & Петров, В.И. (2007). *Опустынивание и комплексная мелиорация агроландшафтов засушливой зоны*. Волгоград. 86 с. ISBN: 5-900761-44-9 EDN: <https://elibrary.ru/qkymrz>
10. Куст, Г.С., Андреева, О.В., Лобковский, В.А. & Славко, В.Д. (2021). Проблемы землепользования и деградации земель в контексте Программы ЮНЕСКО “Человек и Биосфера”. *Вопросы географии. Человек и биос-*

- фера*, 152, 222-252. <https://doi.org/10.24057/probl.geogr.152.8> EDN: <https://elibrary.ru/qdmsto>
11. Лобковский, В.А., Андреева, О.В. & Куст, Г.С. (2022). Интеграция международной и национальной систем мониторинга и оценки деградации земель в России. *Известия РАН. Серия географическая*, 86(1), 9-27. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010095> EDN: <https://elibrary.ru/lczoei>
 12. Манаенков, А.С. & Кулик, А.К. (2016). *Закрепление и облесение песков засушливой зоны*. Волгоград. 55 с.
 13. Манаенков, А.С. (2018). *Лесомелиорация арен засушливой зоны*. 2-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ВНИАЛМИ. 428 с. ISBN: 978-5-9909842-3-3 EDN: <https://elibrary.ru/yqfgtj>
 14. Манаенков, А.С. & Рыбашлыкова, Л.П. (2023). Эколого-биологические аспекты кустарниковой мелиорации деградированных пастбищ на бугристо-увалистых комплексах песчаных земель Прикаспия. *Устойчивое развитие горных территорий*, 15(2), 246-255. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-246-255> EDN: <https://elibrary.ru/rzrfbx>
 15. *Методические рекомендации по фитомелиоративной реконструкции деградированных и опустыненных пастбищ Российской Федерации инновационными экологически безопасными ресурсосберегающими технологиями* (2021) / А.И. Беляев, К.Н. Кулик, А.С. Манаенков [и др.]. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН. 68 с.
 16. *Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием (НПДБО) в Калмыкии* (1995). Элиста: ЮжНИИгипрозем. 179 с.
 17. *Национальный доклад "Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)"* (2019) / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО "Изд-во МБА". 476 с.
 18. *Национальный доклад "Глобальный климат и почвенный покров России: проявление засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)"* (2021) / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. ООО "Изд-во МБА". 700 с.
 19. Сохт, К.А. (2001). *Машинные технологии возделывания зерновых культур*. Краснодар. С. 24-28.
 20. *Субрегиональная национальная программа действий по борьбе с опустыниванием (НПДБО) для юго-востока европейской части Российской Федерации* (1999) / Под ред. Е.С. Павловского, К.Н. Кулика. Волгоград: ВНИАЛМИ. 314 с.
 21. Тютюма, Н.В., Булахтина, Г.К., Кудряшов, А.В. & Кудряшова, Н.В. (2020). Мелиоративная эффективность кустарниковых кулис на аридных

- пастбищах юга России. *Аридные экосистемы*, 26(1), 62-68. <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10084> EDN: <https://elibrary.ru/rjkrn>
22. *Федеральная программа развития агролесомелиоративных работ в России* (1995). Волгоград: ВНИАЛМИ. 245 с.
23. Шамсутдинов, Н.З. (2015). *Биоресурсный потенциал галофитов и проблемы фитомелиорации деградированных аридных земель*. М.: Угрешская типография. 348 с.
24. Шамсутдинов, Н.З., Каминов, Ю.Б. & Батыров, В.А. (2019). Биологические особенности и кормовая продуктивность полукустарников в условиях Прикаспийской полупустыни. *Успехи современного естествознания*, 7, 39-44. <https://doi.org/10.17513/use.37157> EDN: <https://elibrary.ru/otjfyb>
25. ArcGIS Pro Overview. <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
26. Irwin, R., Short, I., Mohammadrezaei, M. & Dhubháin, Á.N. (2023). Increasing tree cover on Irish dairy and drystock farms: the main attitudes, influential bodies and barriers that affect agroforestry uptake. *Environmental Science & Policy*, 146, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.03.022> EDN: <https://elibrary.ru/pupoem>
27. Kulik, K.N., Petrov, V.I., Rulev, A.S., Kosheleva, O.Y. & Shinkarenko, S.S. (2018). On the 30th anniversary of the “general plan to combat desertification of black lands and kizlyar pastures”. *Arid Ecosystems*, 8(1), 5-12. <https://doi.org/10.1134/S2079096118010067> EDN: <https://elibrary.ru/yrmjff>
28. Khrutskii, V.S. & Golubeva, E.I. (2011). Desertification dynamics of arid ecosystems in inner Asia. *Geographical Natural Resources*, 32(4), 394-400. <https://doi.org/10.1134/S1875372811040159> EDN: <https://elibrary.ru/rhfmrl>
29. Manaenkov, A.S. & Rybashlykova, L.P. (2020). Increasing the Efficiency of Plant-Cover Restoration in the Modern Focus of Deflation on Pastures of the Northwestern Caspian Region. *Arid Ecosystems*, 10(4), 358-367. <https://doi.org/10.1134/S2079096120040149> EDN: <https://elibrary.ru/lkhhap>
30. Orr, B.J., Cowie, A.L., Castillo Sanchez, V.M. et al. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality*. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany. 129 p.
31. Ruba, U.B. & Talucder, M.S.A. (2023). Potentiality of homestead agroforestry for achieving sustainable development goals: Bangladesh perspectives. *Heliyon*, 9(3), e14541. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14541> EDN: <https://elibrary.ru/bjlnqe>
32. Sahar, A.A., Rasheed, M.J., Uaid, D.A.A.H. & Jasim, A.A. (2021). Mapping Sandy Areas and their changes using remote sensing. A Case Study at North-

- East Al-Muthanna Province, South of Iraq. *Revista de Teledetección*, 58, 39-52. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.13622> EDN: <https://elibrary.ru/qacwbe>
33. Seidl, A., Tremetsberger, K., Pfanzelt, S., Blattner, F.R., Neuffer, B., Friesen, F., Hurka, H., Shmakov, A., Batlai, O., Čalasan, A.Ž., Vesselova, P.V. & Bernhardt, K.G. (2021). The phylogeographic history of Krascheninnikovia reflects the development of dry steppes and semi-deserts in Eurasia. *Scientific Reports*, 1, 66-45. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85735-z> EDN: <https://elibrary.ru/tzkoii>
34. Zonn, I.S., Kust, G.S. & Andreeva, O.V. (2017). Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts. *Arid Ecosystems*, 7(3), 131-141. <https://doi.org/10.1134/S2079096117030118> EDN: <https://elibrary.ru/zutquj>

References

1. Aivazyan, V. M., Bukhstab, I. S., Enyukov, L. D., & Meshalkin, L. D. (1989). *Applied statistics. Classification and dimensionality reduction*. Moscow: Finance and Statistics, 607 p.
2. Bananova, V. A., Lazareva, V. G., & Petrov, K. M. (2021). Trends in desertification processes in the northwestern part of the Caspian lowland. *Geology, Geography and Global Energy*, 1(80), 77-86. EDN: <https://elibrary.ru/imirkw>
3. Barabanshchikov, D. A., & Serdyukova, A. F. (2017). Combating land desertification. *Young Scientist*, 25(159), 95-98. EDN: <https://elibrary.ru/yuhwhj>
4. Buyankin, V. I., Manayenkov, A. S., & Limanskaya, V. B. (2019). *Increasing productivity of degraded lands in arid zones*. Volgograd: Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, 156 p.
5. *State (national) report on the status and use of lands in the Russian Federation in 2022 (2023)* / Compiled by: Zakharova Zh. Yu. Moscow, 189 p.
6. Dedova, E. B. (2018). Adaptive methods for implementing ecosystem water use in the agro-industrial complex of the Republic of Kalmykia. *Main research results of the institute for 2017. Collection of scientific papers*. Moscow: VNIIGiM Publishing House, 123-142. EDN: <https://elibrary.ru/xtzoct>
7. Dedova, E. B., Goldvarg, B. A., & Tsagan-Mandzhiev, N. L. (2020). Land degradation in the Republic of Kalmykia: problems and ways of restoration. *Arid Ecosystems*, 26(2), 63-71. EDN: <https://elibrary.ru/pqelox>
8. Zonn, I. S., & Kust, G. S. (1999). The problem of desertification in Russia: status, assessment, ways of solution. *Desertification and soil degradation. Materials of the International Scientific Conference*. Moscow: Moscow State University Publishing House, 52-65.
9. Kulik, K. N., Gabunschina, E. B., Kruzhilin, I. P., Kust, G. S., Manayenkov, A. S., Pavlovsky, E. S., Savostyanov, V. K., Tulukhonov, A. K., & Petrov, V. I. (2007).

- Desertification and complex reclamation of agricultural landscapes in arid zones.* Volgograd, 86 p. ISBN: 5-900761-44-9 EDN: <https://elibrary.ru/qkymrz>
10. Kust, G. S., Andreeva, O. V., Lobkovsky, V. A., & Slavko, V. D. (2021). Land use and land degradation problems in the context of the UNESCO Man and the Biosphere Program. *Questions of Geography. Man and the Biosphere*, 152, 222-252. <https://doi.org/10.24057/probl.geogr.152.8> EDN: <https://elibrary.ru/qdmsto>
 11. Lobkovsky, V. A., Andreeva, O. V., & Kust, G. S. (2022). Integration of international and national systems for monitoring and assessing land degradation in Russia. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 86(1), 9-27. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010095> EDN: <https://elibrary.ru/lczoei>
 12. Manayenkov, A. S., & Kulik, A. K. (2016). *Stabilization and afforestation of sands in arid zones.* Volgograd, 55 p.
 13. Manayenkov, A. S. (2018). *Forest reclamation of arid zone sands.* 2nd ed., rev. and add. Volgograd: VNIALMI, 428 p. ISBN: 978-5-9909842-3-3 EDN: <https://elibrary.ru/yqfgtj>
 14. Manayenkov, A. S., & Rybashlykova, L. P. (2023). Ecological and biological aspects of shrub reclamation of degraded pastures on hummocky-ridge complexes of sandy lands in the Caspian region. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 15(2), 246-255. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-246-255> EDN: <https://elibrary.ru/rzrfbx>
 15. *Methodological recommendations for phytomeliorative reconstruction of degraded and desertified pastures of the Russian Federation using innovative environmentally friendly resource-saving technologies* (2021) / A. I. Belyaev, K. N. Kulik, A. S. Manayenkov [et al.]. Volgograd: Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, 68 p.
 16. *National Action Program to Combat Desertification (NAPCD) in Kalmykia* (1995). Elista: YuzhNIIGiprozem, 179 p.
 17. *National report "Global climate and soil cover of Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)"* (2019) / Ed. by R. S.-Kh. Edelgeriev. Moscow: MBA Publishing House LLC, 476 p.
 18. *National report "Global climate and soil cover of Russia: drought manifestations, prevention, control, aftermath elimination and adaptation measures (agriculture and forestry)"* (2021) / Ed. by R. S.-Kh. Edelgeriev. MBA Publishing House LLC, 700 p.
 19. Sokht, K. A. (2001). *Machine technologies for cultivation of grain crops.* Krasnodar, pp. 24-28.

20. *Subregional National Action Program to Combat Desertification (NAPCD) for the southeast of the European part of the Russian Federation* (1999) / Ed. by E. S. Pavlovsky, K. N. Kulik. Volgograd: VNIALMI, 314 p.
21. Tyutyuma, N. V., Bulakhtina, G. K., Kudryashov, A. V., & Kudryashova, N. V. (2020). Reclamation efficiency of shrub windbreaks on arid pastures of southern Russia. *Arid Ecosystems*, 26(1), 62-68. <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10084> EDN: <https://elibrary.ru/rjkrn>
22. *Federal Program for the Development of Agroforestry Works in Russia* (1995). Volgograd: VNIALMI, 245 p.
23. Shamsutdinov, N. Z. (2015). *Bioresources potential of halophytes and problems of phytomelioration of degraded arid lands*. Moscow: Ugreshskaya Printing House, 348 p.
24. Shamsutdinov, N. Z., Kaminov, Yu. B., & Batyrov, V. A. (2019). Biological characteristics and fodder productivity of subshrubs in the Caspian semi-desert conditions. *Advances in Modern Natural Sciences*, 7, 39-44. <https://doi.org/10.17513/use.37157> EDN: <https://elibrary.ru/otjfyb>
25. ArcGIS Pro Overview. <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
26. Irwin, R., Short, I., Mohammadrezaei, M. & Dhubbáin, Á.N. (2023). Increasing tree cover on Irish dairy and drystock farms: the main attitudes, influential bodies and barriers that affect agroforestry uptake. *Environmental Science & Policy*, 146, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.03.022> EDN: <https://elibrary.ru/pupoem>
27. Kulik, K.N., Petrov, V.I., Rulev, A.S., Kosheleva, O.Y. & Shinkarenko, S.S. (2018). On the 30th anniversary of the “general plan to combat desertification of black lands and kizlyar pastures”. *Arid Ecosystems*, 8(1), 5-12. <https://doi.org/10.1134/S2079096118010067> EDN: <https://elibrary.ru/ymjjf>
28. Khrutskii, V.S. & Golubeva, E.I. (2011). Desertification dynamics of arid ecosystems in inner Asia. *Geographical Natural Resources*, 32(4), 394-400. <https://doi.org/10.1134/S1875372811040159> EDN: <https://elibrary.ru/rhfmrl>
29. Manaenkov, A.S. & Rybashlykova, L.P. (2020). Increasing the Efficiency of Plant-Cover Restoration in the Modern Focus of Deflation on Pastures of the Northwestern Caspian Region. *Arid Ecosystems*, 10(4), 358-367. <https://doi.org/10.1134/S2079096120040149> EDN: <https://elibrary.ru/lkhhap>
30. Orr, B.J., Cowie, A.L., Castillo Sanchez, V.M. et al. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality*. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany. 129 p.

31. Ruba, U.B. & Talucder, M.S.A. (2023). Potentiality of homestead agroforestry for achieving sustainable development goals: Bangladesh perspectives. *Heliyon*, 9(3), e14541. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14541> EDN: <https://elibrary.ru/bjlnqe>
32. Sahar, A.A., Rasheed, M.J., Uaid, D.A.A.H. & Jasim, A.A. (2021). Mapping Sandy Areas and their changes using remote sensing. A Case Study at North-East Al-Muthanna Province, South of Iraq. *Revista de Teledetección*, 58, 39-52. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.13622> EDN: <https://elibrary.ru/qacwbe>
33. Seidl, A., Tremetsberger, K., Pfanzelt, S., Blattner, F.R., Neuffer, B., Friesen, F., Hurka, H., Shmakov, A., Batlai, O., Čalasan, A.Ž., Vesselova, P.V. & Bernhardt, K.G. (2021). The phylogeographic history of Krascheninnikovia reflects the development of dry steppes and semi-deserts in Eurasia. *Scientific Reports*, 1, 66-45. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85735-z> EDN: <https://elibrary.ru/tzkoiy>
34. Zonn, I.S., Kust, G.S. & Andreeva, O.V. (2017). Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts. *Arid Ecosystems*, 7(3), 131-141. <https://doi.org/10.1134/S2079096117030118> EDN: <https://elibrary.ru/zutquj>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Рыбашлыкова Людмила Петровна, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук (ФНЦ агроэкологии РАН)»*

Университетский проспект, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация

rybashlykova-l@yfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Ludmila P. Rybashlykova, Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist

Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences

97, Universitetskiy prospect, Volgograd, 400062, Russian Federation

rybashlykova-l@yfanc.ru

SPIN-code: 3365-6897

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3675-6243>

Поступила 29.11.2024

После рецензирования 13.02.2025

Принята 20.02.2025

Received 29.11.2024

Revised 13.02.2025

Accepted 20.02.2025

БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1244

EDN: ECLXVD

УДК 579.67



Научная статья

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ОСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА НА РОСТ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ

А.П. Никифорова, И.С. Хамагаева

Аннотация

Обоснование. На сегодняшний день использование молочнокислых бактерий не нашло широкого промышленного применения при производстве рыбных продуктов. В то же время, научное направление, связанное с разработкой и применением бактериальных культур при переработке продукции гидробионтов, обладает высокой актуальностью. Производственные процессы, связанные с переработкой рыбы, зачастую предусматривают применение высоких концентраций поваренной соли и низких положительных температур, которые ингибируют рост и развитие большинства микроорганизмов. Поэтому при создании бактериальных культур, предназначенных для производства рыбных продуктов, важным этапом исследований является изучение устойчивости применяемых штаммов к воздействию неблагоприятных факторов. Бактерии вида *Latilactobacillus sakei* имеют большие перспективы использования в качестве бактериальных культур при производстве рыбных продуктов в связи с высокой биохимической активностью и потенциальными пробиотическими свойствами.

Целью исследования являлось изучение устойчивости молочнокислых бактерий вида *Latilactobacillus sakei* к высоким концентрациям хлорида натрия и низким температурам.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись четыре штамма бактерий вида *Latilactobacillus sakei*. Культивирование молочнокислых бактерий проводили на полужидкой среде MRS при температуре 37 °С. Способность бактерий расти в присутствии хлорида натрия определяли на полужидкой среде MRS с содержанием 12 % поваренной соли, а толерантность бактерий к низким положительным температурам изучали при культивировании штаммов при температуре 8 °С.

Результаты. В результате проведенных исследований доказано, что штаммы *Llb. sakei* LSK-45, *Llb. sakei* LSK-104, *Llb. sakei* LSK-103 способны расти при высоком содержании в питательной среде поваренной соли (12 %) и при низких положительных температурах.

Заключение. Установлено, что применение штаммов *Llb. sakei* LSK-45, LSK-104, LSK-103 в составе бактериальных культур для рыбоперерабатывающей промышленности представляет большой научный интерес.

Ключевые слова: рыбные продукты; молочнокислые бактерии; *Latilactobacillus sakei*; хлорид натрия; осмотический стресс; солевой стресс; низкие температуры

Для цитирования. Никифорова, А.П. & Хамагаева, И.С. (2025). Влияние низких температур и осмотического стресса на рост молочнокислых бактерий. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 169-187. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1244>

Original article

EFFECT OF LOW TEMPERATURES AND OSMOTIC STRESS ON THE GROWTH OF LACTIC ACID BACTERIA

A.P. Nikiforova, I.S. Khamagaeva

Abstract

Background. To date, the use of lactic acid bacteria has not found wide industrial application in the production of fish products. At the same time, the scientific direction associated with the development and use of bacterial cultures for the processing of fish products is highly relevant. Technological processes of fish processing often involve the use of high concentrations of NaCl and low positive temperatures; these factors inhibit the growth and development of most microorganisms. Therefore, the development of bacterial cultures to produce fish products should include the study

of tolerance of probiotic strains to these stress factors. *Latilactobacillus sakei* species have great prospects for the use as bacterial cultures for fish products processing due to high biochemical activity and potential probiotic properties.

Purpose. The aim of the study was to study the resistance of *Latilactobacillus sakei* strains to high sodium chloride concentrations and low temperatures. The objects of the study were four strains of *Latilactobacillus sakei*.

Materials and methods. Cultivation of lactic acid bacteria was carried out on MRS medium at a temperature of 37 °C. The ability of bacteria to grow in the presence of sodium chloride was determined on MRS medium containing 12% NaCl, and the tolerance of bacteria to low positive temperatures was studied by strains cultivation at 8 °C.

Results. As a result of the studies, it was proven that the strains *Llb. sakei* LSK-45, *Llb. sakei* LSK-104, *Llb. sakei* LSK-103 can grow in the medium with a high concentration of NaCl (12%) and at low positive temperatures.

Conclusion. Thus, the use of *Llb. sakei* LSK-45, *Llb. sakei* LSK-104, *Llb. sakei* LSK-103 strains in the fish processing industry is of great scientific interest.

Keywords: fish products; lactic acid bacteria; *Latilactobacillus sakei*; sodium chloride; osmotic stress; salt stress; low temperatures

For citation. Nikiforova, A.P. & Khamagaeva, I.S. (2025). The effect of low temperatures and osmotic stress on the growth of lactic acid bacteria. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 169-187. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1244>

Введение

По данным Росрыболовства общероссийский вылов рыбы и морепродуктов характеризуется стабильным ростом. В соответствии с рекомендациями Минздрава России рекомендуется употреблять 28 кг рыбы и рыбопродуктов на человека в год, но по данным Росстата в 2022 г. ежегодное потребление рыбы и рыбных продуктов составило только 21,9 кг.

Исследования, проведенные зарубежными учеными, показали, что регулярное употребление рыбы имеет ряд положительных эффектов на здоровье человека: оно обеспечивает защиту внутренних органов, в том числе сердца и печени, обладает антиоксидантным, противовоспалительным, ранозаживляющим эффектом [5; 6; 8]. В связи с этим, большой интерес представляет поиск технологических решений, связанных с разработкой новых наименований рыбных продуктов. Для повышения качества и безопасности и расширения ассортимента имеющейся на рынке продукции большие перспективы имеет применение бактериальных культур при переработке рыбы [2; 22].

Для консервирования рыбы с целью получения продуктов высокого качества применяются различные способы производства. Посол рыбы является одним из самых распространенных способов [18]. При изготовлении соленой рыбы используются технологические режимы, связанные с низкими положительными температурами и высокими концентрациями поваренной соли [18]. Эти параметры оказывают ингибирующее действие на большинство микроорганизмов. Таким образом, оценка толерантности бактерий к осмотическому стрессу и низким температурам является важным этапом при поиске штаммов, пригодных для применения при переработке рыбного сырья.

Молочнокислые бактерии играют важную роль при производстве различных пищевых продуктов. Например, они широко применяются в составе заквасок для производства кисломолочных продуктов, а также сырокопченых колбас. К сожалению, в настоящее время методы, связанные с использованием бактериальных культур, не нашли широкого применения в рыбоперерабатывающей промышленности, однако известно, что они обладают свойствами, которые способны положительно влиять на качество рыбных продуктов. Их применение способствует улучшению органолептических характеристик, повышению безопасности рыбных продуктов, сокращению продолжительности технологического процесса [3; 22].

Бактерии вида *Latilactobacillus sakei* обладают высоким потенциалом применения при производстве рыбных продуктов [2]. Это обусловлено тем, что этот вид считается хорошо адаптированным для роста в мясе и рыбе, благодаря ряду характеристик, таких как способность использовать различные источники углерода. Например, они способны ферментировать рибозу, которая присутствует в сыром мясе, через АТФ-зависимую систему [4; 26].

Микроорганизмы вида *Latilactobacillus sakei* содержатся в составе микрофлоры и играют важную роль в формировании показателей качества и безопасности традиционных ферментированных рыбных продуктов, таких как раффиск, jeotgal, и т.д. [20; 21].

Отдельно стоит отметить высокий пробиотический потенциал бактерий этого вида. Так, в работе Zou X. и др. доказано, что *Latilactobacillus sakei* L-7 имеет высокую выживаемость (89 %) после 7 ч в условиях, имитирующих процесс пищеварения человека. Прием данного штамма повышал количество микроорганизмов родов *Akkermansia*, *Allobaculum* и *Parabacteroides* и разнообразие микрофлоры в кишечнике мышей [27].

В работе Kim H.-S. др. установлено, что штамм *Latilactobacillus sakei* НЕМ 224 способен облегчать воспаления, как в желудочно-кишечном, так

и в дыхательном тракте посредством укрепления эпителиального барьера и иммуномодуляции [13].

Исследования Tajdozian H. и др. в экспериментах *in vitro* и *in vivo* показали, что штамм *Latilactobacillus sakei* PMC104 оказывает ингибирующее действие против бактерий вида *Klebsiella pneumoniae*, устойчивых к карбапенемам, способных вызывать различные инфекции [23].

В связи с этим, изучение влияния стрессовых факторов, таких как высокие концентрации поваренной соли и низкие положительные температуры на выживаемость и рост штаммов *Latilactobacillus sakei* является актуальной задачей пищевой промышленности.

Целью исследования является изучение толерантности молочнокислых бактерий вида *Latilactobacillus sakei* к высоким концентрациям хлорида натрия и низким положительным температурам.

Материалы и методы

Объектами исследований являлись штаммы молочнокислых бактерий вида *Latilactobacillus sakei*: а) штамм LSK-45; б) штамм DSM 20017, в) штамм LSK-104, г) штамм LSK-103. Исследованные бактериальные штаммы были получены из фонда Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт».

Для изучения толерантности бактерий к высоким концентрациям хлорида натрия в стерильную полужидкую среду MRS с содержанием 12 % NaCl вносили инокулят, содержащий различные штаммы *Latilactobacillus sakei*, и культивировали при температуре 37 °C.

Для исследования роста микроорганизмов при низких положительных температурах бактерии культивировали на полужидкой среде MRS при температуре 8 °C.

О росте штаммов судили по уровню накопления биомассы (изменению оптической плотности) и количеству жизнеспособных клеток бактерий через определенное время культивирования. Измерение оптической плотности среды проводили при длине волны 590 нм на спектрофотометре PD-303 (APEL, Япония).

Количественный учет клеток молочнокислых бактерий проводили методом предельных разведений на агаризованной среде MRS (ООО «НПЦ «Биокомпас-С»).

При культивировании также измеряли активную кислотность (pH) питательной среды с применением pH-метра Анион 4100 (ООО НПЦ «Инфраспек-Аналит», Россия).

Для изучения морфологии клеток молочнокислых бактерий готовили препараты, окрашенные по Граму. Микроскопирование полученных препаратов проводили с использованием микроскопа Микмед-6 (ЛОМО, Россия).

Статистическую обработку результатов исследований проводили с помощью компьютерной программы Microsoft Excel 2019 (Microsoft, США). Исследования проводили в двух повторностях. Проводили расчет среднего значения и ошибки средней величины. Нулевая гипотеза отклонялась при уровне значимости $P < 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение

Известно, что поваренная соль используется для стимулирования процесса ферментации пищевых продуктов в связи с тем, что молочнокислые бактерии зачастую обладают более высокой устойчивостью к осмотическому стрессу по сравнению с многими патогенными видами бактерий. Но, несмотря на это, осмотический стресс считается одним из основных барьеров для развития молочнокислых бактерий при производстве продуктов питания [1; 25]. В связи с этим, первый этап исследований был посвящен изучению толерантности штаммов вида *Latilactobacillus sakei* к высоким концентрациям поваренной соли. С этой целью изучали морфологию клеток изучаемых штаммов при росте в питательной среде с содержанием хлорида натрия 12% и без добавления NaCl (контроль), производили подсчет клеток молочнокислых бактерий на этих средах, вычисляли выживаемость бактерий.

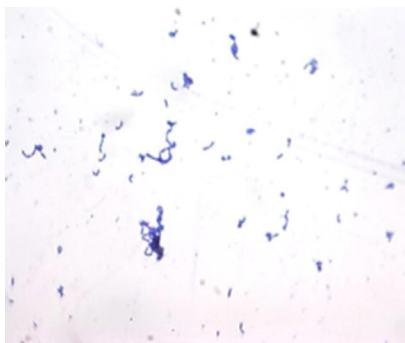
Изменение морфологии клеток бактерий вида *Latilactobacillus sakei* на питательной среде с содержанием хлорида натрия 12 % и без его добавления (0 %), представлено на рисунке 1.

Данные о количестве жизнеспособных клеток и выживаемости штаммов молочнокислых бактерий вида *Llb. sakei* представлены в таблице 1.

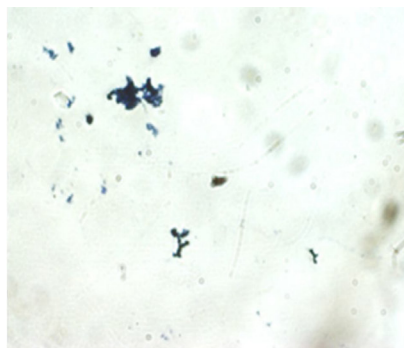
Таблица 1.

Количество клеток и выживаемость штаммов *Latilactobacillus sakei* в среде с различным содержанием хлорида натрия

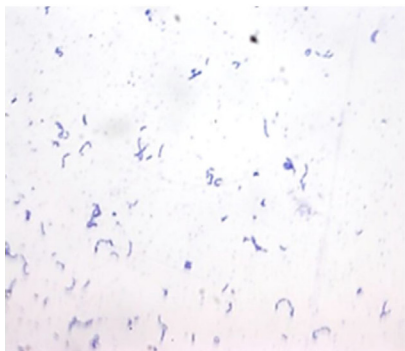
Наименование штамма <i>Llb. sakei</i>	Количество клеток молочнокислых бактерий (КОЕ/см ³) в питательной среде без NaCl и с содержанием 12%		Выживаемость штаммов <i>Llb. sakei</i> (%) в среде с содержанием NaCl 12 %
	0 %	12 %	
LSK-45	$2 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^8$	89,25
DSM 20017	$5 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^5$	56,70
LSK-104	$5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^8$	74,77
LSK-103	$2 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^8$	86,02



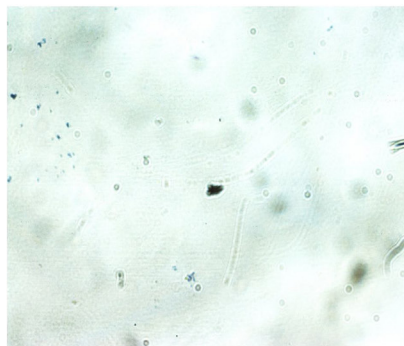
Llb. sakei LSK-45, 0 %



Llb. sakei LSK-45, 12 %



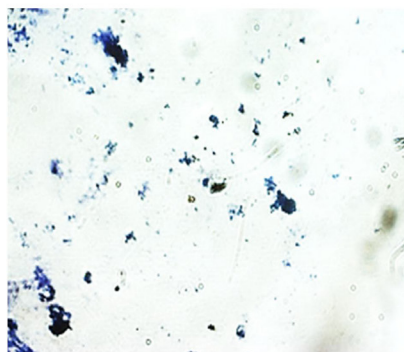
Llb. sakei DSM 20017, 0 %



Llb. sakei DSM 20017, 12 %



Llb. sakei LSK-104, 0 %



Llb. sakei LSK-104, 12 %

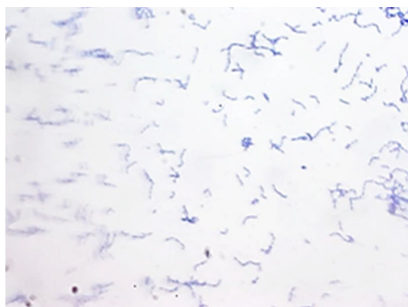
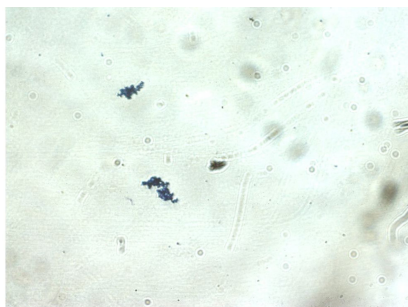
*Llb. sakei* LSK-103, 0 %*Llb. sakei* LSK-103, 12 %

Рис. 1. Морфология бактерий вида *Latilactobacillus sakei* на среде MRS с различной концентрацией NaCl

Полученные результаты (Табл. 1) показывают, что изучаемые штаммы *Llb. sakei* LSK-45, *Llb. sakei* LSK-104, *Llb. sakei* LSK-103 способны выживать в питательной среде, содержащей 12 % NaCl (выживаемость клеток составляет 74,77-89,25%), тогда как штамм DSM 20017 – недостаточно устойчив к высоким концентрациям поваренной соли (выживаемость клеток составила 56,7%). Возможно, это связано с тем, что штаммы LSK-45, LSK-104, LSK-103 были выделены из мясных ферментированных колбас, которые содержат поваренную соль, а штамм DSM 20017 – из саке, японского алкогольного напитка. Таким образом, устойчивость *Llb. sakei* к хлориду натрия зависит от штамма. Полученные результаты подтверждают результаты других ученых: так, в работе Montanari и др. показана высокая вариабельность показателей, характеризующих рост бактерий, на питательной среде с содержанием NaCl 8 % [17].

Микрофотографии, представленные на рисунке 1, показывают, что высокое содержание хлорида натрия в среде приводит к усилению межклеточных взаимодействий у штаммов *Llb. sakei* LSK-45, *Llb. sakei* LSK-104, *Llb. sakei* LSK-103.

Известно, что адаптация молочнокислых бактерий к стрессовым воздействиям происходит, благодаря различным механизмам [9; 10; 16].

Одним из механизмов, позволяющим обеспечить защиту молочнокислых микроорганизмов от избыточного осмотического давления, является поглощение растворенных веществ из питательной среды. К веществам-осмопротекторам относят такие как глицин-бетаин, холин, карнитин, сульфобетаин. Еще одним из механизмов, позволяющих молочнокислым бактериям выживать в неблагоприятных условиях среды, – это

регулирование внутриклеточных концентраций определенных аминокислот. Например, известно, что внутриклеточные концентрации пролина, глутаминовой кислоты, аланина и аспарагиновой кислоты увеличиваются в условиях высокого осмотического давления [11].

Микроорганизмы способны проявлять различные формы коллективного поведения [3]. Когезия (агрегация клеток, в зарубежной литературе - autoaggregation) – это один из них [24]. Для бактериальных систем характерна контактная и дистантная коммуникация. Дистантная регулируется сигнальными веществами или физическими факторами [3]. Процесс когезии часто происходит за счет системы «quorum sensing», представляющей собой тип регуляции экспрессии генов бактерий, функционирующий при высокой плотности популяции, реализующейся за счет малых сигнальных молекул (аутоиндукторов) [3; 16; 24]. Концентрация аутоиндукторов в среде увеличивается с ростом плотности популяции микроорганизмов. Коммуникация микроорганизмов через аутоиндукторы может происходить, как в рамках одного вида, так и между бактериями разных видов [16].

Доказано, что quorum sensing играет важную роль в процессах жизнедеятельности молочнокислых бактерий, таких как адгезия и образование биопленок, синтез бактериоцинов, а также способность противостоять неблагоприятным условиям окружающей среды, например кислотному стрессу [10; 12; 19].

Предположительно, в условиях осмотического стресса высокая плотность популяции штаммов *Llb. sakei* LSK-45, *Llb. sakei* LSK-104, *Llb. sakei* LSK-103 (10^8 - 10^9 КОЕ/см³) приводит к активизации системы quorum sensing, что обеспечивает когезию клеток. По всей видимости, когезия обеспечивает более высокую выживаемость клеток в неблагоприятных условиях, так как известно, что при высокой плотности популяции агрегированные клетки имеют конкурентное преимущество перед одиночными – лучший доступ к питательным веществам. Однако при низкой плотности клеток агрегированные клетки находятся в невыгодном положении, поскольку клетки в центре агрегата имеют ограниченный доступ к питательным веществам [24].

Важным фактором, который необходимо учитывать при разработке бактериальных заквасок, предназначенных для производства рыбных продуктов, является устойчивость применяемых микроорганизмов к низким положительным температурам. Это обусловлено тем, что производство рыбных продуктов, в основном, происходит с применением низких температур. В связи с этим, следующий этап эксперимента был посвящен

исследованию роста изучаемых штаммов температуре 8 °С. Полученные данные представлены на рисунках 2 и 3.

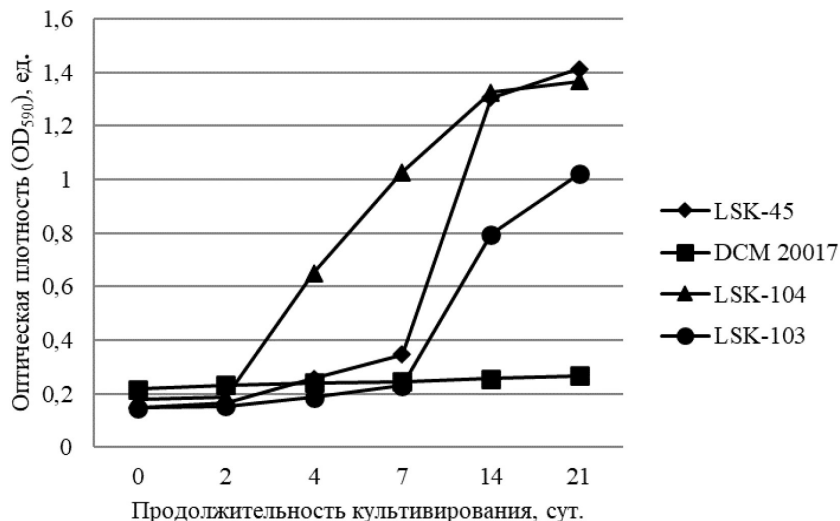


Рис. 2. Изменение оптической плотности питательной среды при культивировании молочнокислых бактерий при температуре 8 °С

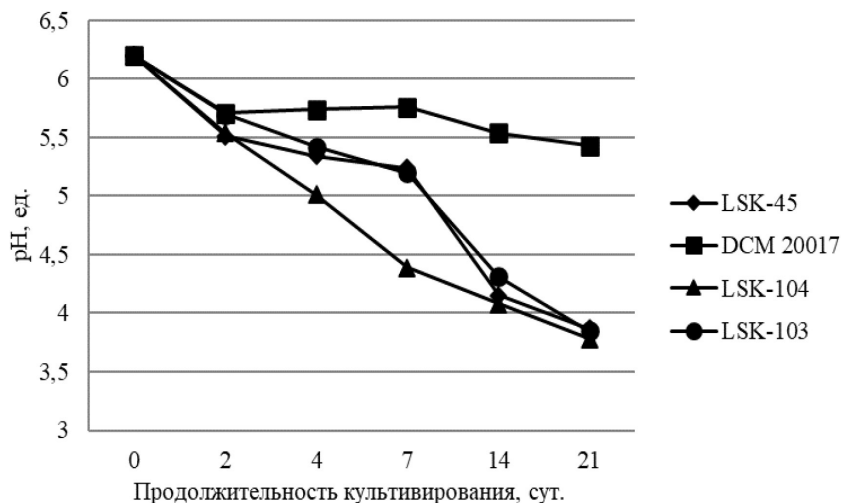


Рис. 3. Изменение значения активной кислотности питательной среды при культивировании молочнокислых бактерий при температуре 8 °С

Результаты, представленные на рисунках 2 и 3, показывают, что изученные штаммы *Latilactobacillus sakei* LSK-104, LSK-45, LSK-103 способны расти при низких положительных температурах, тогда как штамм DSM 20017 характеризуется незначительным ростом. Наиболее активный рост наблюдался у штаммов LSK-104 и LSK-45.

В ранее проведенных исследованиях доказана способность отдельных штаммов вида *Latilactobacillus sakei* развиваться при низких температурах. Так, в работе Marceau и др. показан медленный рост штамма *Llb. sakei* 23K при температуре 4 °C. Кроме того, установлено, что этот штамм способен выживать при этой температуре в течение 2,2 недель [15]. Кроме того, в работе Marceau и др. показано, что совместное действие низких температур и хлорида натрия (9 %) существенно повышают выживаемость бактерий до 28 недель [15].

Исследования Montanari и др. показали, что способность бактерий вида *Latilactobacillus sakei* расти при низких положительных температурах сильно зависит от штамма: вариация значений оптической плотности питательной среды разных штаммов при температуре 5 °C составила 61,4%.

Ammog и др. установлено, что из 36 изученных в работе штаммов *Latilactobacillus sakei* почти все (35) были способны расти при температуре 4 °C, и ни один – при температуре 0 °C [4].

Полученные нами результаты подтверждают имеющиеся сведения о том, что некоторые штаммы бактерий вида *Latilactobacillus sakei* способны расти при низких положительных температурах.

По мнению Chaillou и др. одним из ключевых факторов в адаптации штамма *Llb. sakei* 23K к низким температурам и соли может быть его способность эффективно накапливать осмо- и криозащитные вещества, такие как бетаин и карнитин. Также установлено, что *Llb. sakei* 23K имеет больше предполагаемых белков холодового стресса (LSA0768, LSA0946, LSA1152, LSA1561), по сравнению с другими лактобациллами, но столько же, сколько *L. monocytogenes*, для которых также характерна высокая толерантность к воздействию низких температур [7]. Liu и др. показано, что двухкомпонентная система, quorum sensing и ABC-транспортеры также принимают участие в процессе адаптации клеток *Lactiplantibacillus plantarum* к низким температурам [14].

Данные проведенных нами исследований показали высокую толерантность к осмотическому стрессу и способность расти при низких положительных температурах штаммов *Latilactobacillus sakei* LSK-104, LSK-45,

LSK-103. Таким образом, указанные штаммы являются перспективными для применения в составе бактериальных концентратов для производства рыбных продуктов.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. Показано, что штаммы молочнокислых бактерий *Latilactobacillus sakei* LSK-104, LSK-45, LSK-103, выделенные из ферментированных колбас, обладают высокой устойчивостью к осмотическому стрессу и низким температурам. Вероятно, указанные свойства обеспечиваются за счет когезии, механизма, повышающего выживаемость и толерантность к неблагоприятным факторам среды. Таким образом, указанные штаммы имеют широкие перспективы применения, в том числе в составе бактериальных культур для рыбоперерабатывающей промышленности.

2. Установлено, что штамм *Latilactobacillus sakei* DSM 20017, впервые выделенный из японского напитка саке, не обладает высокой толерантностью к высокому содержанию хлорида натрия в питательной среде, а также к низким положительным температурам.

Заключение комитета по этике. Не применимо.

Информированное согласие. Не применимо.

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

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Никифорова, А.П., Хазагаева, С.Н. & Артюхова, С.И. (2019). Исследование биохимической активности штамма *Lactobacillus sakei* LSK-104. *Вестник ВСГУТУ*, 4(75), 62-68. EDN: <https://elibrary.ru/arivmh>
2. Никифорова, А.П. (2020). Перспективы производства ферментированных рыбных продуктов с использованием молочнокислых бактерий. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 2, 17-24. <https://doi.org/10.24411/2311-6447-2020-10038> EDN: <https://elibrary.ru/zejayp>
3. Олескин, А.В. (2009). Биосоциальность одноклеточных (на материале исследований прокариот). *Журнал общей биологии*, 70(3), 225-238. EDN: <https://elibrary.ru/kavohr>

4. Ammor, S., Dufour, E., Zagorec, M., Chaillou, S. & Chevallier, I. (2005). Characterization and selection of *Lactobacillus sakei* strains isolated from traditional dry-sausage. *Food Microbiology*, 22, 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.11.016>
5. Bonaccio, M., Ruggiero, E., Castelnovo, A.D., Costanzo, S., Persichillo, M., Curtis, A.D. & Iacoviello, L. (2017). Fish intake is associated with lower cardiovascular risk in a Mediterranean population: Prospective results from the Molisani study. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 27, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2017.08.004>
6. Chai, H.J., Wu, C.J., Yang, S.H., Li, T.L. & Pan, B.S. (2016). Peptides from hydrolysate of lantern fish (*Benthosema pterotum*) proved neuroprotective in vitro and in vivo. *Journal of Functional Foods*, 24, 438-449. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.04.009>
7. Chaillou, S., Champomier-Vergès, M.C., Cornet, M., Crutz Le Coq, A.M., Dudzé, A.M., Martin, V., Beaufls, S., Bossy, R., Darbon-Rongère, E., Loux, V. et al. (2005). Complete genome sequence of the meat-borne lactic acid bacterium *Lactobacillus sakei* 23K. *Nature Biotechnology*, 23, 1527-1533. <https://doi.org/10.1038/nbt1160>
8. Chen, J., Jayachandran, M., Bai, W. & Xu, B. (2022). A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents. *Food Chemistry*, 369, 130874. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130874> EDN: <https://elibrary.ru/fjsqlf>
9. Gao, X., Kong, J., Zhu, H., Mao, B., Cui, S. & Zhao, J. (2022). *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* and *Lactococcus* response to environmental stress: Mechanisms and application of cross-protection to improve resistance against freeze-drying. *Journal of Applied Microbiology*, 132, 802-821. <https://doi.org/10.1111/jam.15251> EDN: <https://elibrary.ru/hezagp>
10. Gu, Y., Li, B., Tian, J., Wu, R. & He, Y. (2018). The response of LuxS/AI-2 quorum sensing in *Lactobacillus fermentum* 2-1 to changes in environmental growth conditions. *Annals of Microbiology*, 68, 287-294. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1337-z> EDN: <https://elibrary.ru/llqblr>
11. Van de Guchte, M., Serror, P., Chervaux, C., Smokvina, T., Ehrlich, S.D. & Maguin, E. (2002). Stress responses in lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology*, 82(1-4), 187-216. <https://doi.org/10.1023/A:1020631532202> EDN: <https://elibrary.ru/mcgexh>
12. Hossain, M.I. et al. (2021). Comprehensive molecular, probiotic, and quorum-sensing characterization of anti-listerial lactic acid bacteria, and applica-

- tion as bioprotective in a food (milk) model. *Journal of Dairy Science*, 104(6), 6516-6534. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19034> EDN: <https://elibrary.ru/dwfyde>
13. Kim, H.S., Oh, H., Kim, B. et al. (2023). Multifunctional effects of *Lactobacillus sakei* HEM 224 on the gastrointestinal tract and airway inflammation. *Scientific Reports*, 13, 17918. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45043-0> EDN: <https://elibrary.ru/cpgcrn>
 14. Liu, S., Ma, Y., Zheng, Y., Zhao, W., Zhao, X., Luo, T., Zhang, J. & Yang, Z. (2020). Cold-Stress Response of Probiotic *Lactobacillus plantarum* K25 by iTRAQ Proteomic Analysis. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(2), 187-195. <https://doi.org/10.4014/jmb.1909.09021> EDN: <https://elibrary.ru/slpyzn>
 15. Marceau, A., Zagorec, M. & Champomier-Vergès, M.C. (2003). Positive effects of growth at suboptimal temperature and high salt concentration on long-term survival of *Lactobacillus sakei*. *Research in Microbiology*, 154, 37-42. [https://doi.org/10.1016/S0923-2508\(02\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0923-2508(02)00010-4)
 16. Miller, M.B. (2001). Quorum sensing in bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 55, 165-199. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.165>
 17. Montanari, C., Barbieri, F., Magnani, M., Grazia, L., Gardini, F. & Tabanelli, G. (2018). Phenotypic Diversity of *Lactobacillus sakei* Strains. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02003>
 18. Nikiforova, A., Zamaratskaia, G. & Pickova, J. (2020). Fatty acid composition of salted and fermented products from Baikal omul (*Coregonus autumnalis migratorius*). *Journal of Food Science and Technology*, 57, 595-605. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04091-z> EDN: <https://elibrary.ru/zmeach>
 19. Qian, X., Tian, P., Zhao, J., Zhang, H., Wang, G. & Chen, W. (2022). Quorum Sensing of Lactic Acid Bacteria: Progress and Insights. *Food Reviews International*, 39(7), 4781-4792. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2062766> EDN: <https://elibrary.ru/mhdkzq>
 20. Skåra, T., Axelsson, L., Stefansson, G., Ekstrand, B. & Hagen, H. (2015). Fermented and ripened fish products in the northern European countries. *Journal of Ethnic Foods*, 2(1), 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2015.02.004>
 21. Song, E.J., Lee, E.S., Park, S.L., Choi, H.J., Roh, S.W. & Nam, Y.D. (2018). Bacterial community analysis in three types of the fermented seafood, jeotgal, produced in South Korea. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 82(8), 1444-1454. <https://doi.org/10.1080/09168451.2018.1469395>
 22. Speranza, B., Racioppo, A., Bevilacqua, A., Beneduce, L., Sinigaglia, M. & Corbo, M.R. (2015). Selection of Autochthonous Strains as Starter Cultures for

- Fermented Fish Products. *Journal of Food Science*, 80(1), M151-M160. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12721>
23. Tajdozian, H., Seo, H., Jeong, Y. et al. (2024). Efficacy of lyophilized *Lactobacillus sakei* as a potential candidate for preventing carbapenem-resistant *Klebsiella* infection. *Annals of Microbiology*, 74(28). <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01773-8> EDN: <https://elibrary.ru/ywbksc>
24. Trunk, T., Khalil, H.S. & Leo, J.C. (2018). Bacterial autoaggregation. *AIMS Microbiology*, 4(1), 140-164. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.1.140>
25. Yang, H., He, M. & Wu, C. (2021). Cross protection of lactic acid bacteria during environmental stresses: Stress responses and underlying mechanisms. *LWT*, 144, 111203. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111203> EDN: <https://elibrary.ru/nvykru>
26. Zagorec, M. & Champomier-Vergès, M.C. (2017). *Lactobacillus sakei*: A Starter for Sausage Fermentation, a Protective Culture for Meat Products. *Microorganisms*, 5(3), 56. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030056>
27. Zou, X., Pan, L., Xu, M., Wang, X., Wang, Q. & Han, Y. (2023). Probiotic potential of *Lactobacillus sakei* L-7 in regulating gut microbiota and metabolism. *Microbiological Research*, 274, 127438. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127438> EDN: <https://elibrary.ru/dbxzlz>

References

1. Nikiforova, A.P., Khazagaeva, S.N. & Artyukhova, S.I. (2019). Research of biochemical activity of *Lactobacillus sakei* LSK-104 strain. *Vestnik VSGUTU*, 4(75), 62-68. EDN: <https://elibrary.ru/arivmh>
2. Nikiforova, A.P. (2020). Prospects for the production of fermented fish products using lactic acid bacteria. *Technologies of Food and Processing Industry of Agro-Industrial Complex — Healthy Food Products*, 2, 17-24. <https://doi.org/10.24411/2311-6447-2020-10038> EDN: <https://elibrary.ru/zejayp>
3. Oleskin, A.V. (2009). Biosociality of unicellular organisms (based on research of prokaryotes). *Journal of General Biology*, 70(3), 225-238. EDN: <https://elibrary.ru/kavohr>
4. Ammor, S., Dufour, E., Zagorec, M., Chaillou, S. & Chevallier, I. (2005). Characterization and selection of *Lactobacillus sakei* strains isolated from traditional dry-sausage. *Food Microbiology*, 22, 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.11.016>
5. Bonaccio, M., Ruggiero, E., Castelnovo, A.D., Costanzo, S., Persichillo, M., Curtis, A.D. & Iacoviello, L. (2017). Fish intake is associated with lower cardiovascular risk in a Mediterranean population: Prospective results from the

- Molisan study. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 27, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2017.08.004>
6. Chai, H.J., Wu, C.J., Yang, S.H., Li, T.L. & Pan, B.S. (2016). Peptides from hydrolysate of lantern fish (*Benthoosema pterotum*) proved neuroprotective in vitro and in vivo. *Journal of Functional Foods*, 24, 438-449. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.04.009>
 7. Chaillou, S., Champomier-Vergès, M.C., Cornet, M., Crutz Le Coq, A.M., Dudzé, A.M., Martin, V., Beaufls, S., Bossy, R., Darbon-Rongère, E., Loux, V. et al. (2005). Complete genome sequence of the meat-borne lactic acid bacterium *Lactobacillus sakei* 23K. *Nature Biotechnology*, 23, 1527-1533. <https://doi.org/10.1038/nbt1160>
 8. Chen, J., Jayachandran, M., Bai, W. & Xu, B. (2022). A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents. *Food Chemistry*, 369, 130874. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130874> EDN: <https://elibrary.ru/fjsqlf>
 9. Gao, X., Kong, J., Zhu, H., Mao, B., Cui, S. & Zhao, J. (2022). *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* and *Lactococcus* response to environmental stress: Mechanisms and application of cross-protection to improve resistance against freeze-drying. *Journal of Applied Microbiology*, 132, 802-821. <https://doi.org/10.1111/jam.15251> EDN: <https://elibrary.ru/hezagp>
 10. Gu, Y., Li, B., Tian, J., Wu, R. & He, Y. (2018). The response of LuxS/AI-2 quorum sensing in *Lactobacillus fermentum* 2-1 to changes in environmental growth conditions. *Annals of Microbiology*, 68, 287-294. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1337-z> EDN: <https://elibrary.ru/llqblr>
 11. Van de Guchte, M., Serror, P., Chervaux, C., Smokvina, T., Ehrlich, S.D. & Maguin, E. (2002). Stress responses in lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology*, 82(1-4), 187-216. <https://doi.org/10.1023/A:1020631532202> EDN: <https://elibrary.ru/mcgexh>
 12. Hossain, M.I. et al. (2021). Comprehensive molecular, probiotic, and quorum-sensing characterization of anti-listerial lactic acid bacteria, and application as bioprotective in a food (milk) model. *Journal of Dairy Science*, 104(6), 6516-6534. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19034> EDN: <https://elibrary.ru/dwfyde>
 13. Kim, H.S., Oh, H., Kim, B. et al. (2023). Multifunctional effects of *Lactobacillus sakei* HEM 224 on the gastrointestinal tract and airway inflammation. *Scientific Reports*, 13, 17918. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45043-0> EDN: <https://elibrary.ru/cpgcrn>

14. Liu, S., Ma, Y., Zheng, Y., Zhao, W., Zhao, X., Luo, T., Zhang, J. & Yang, Z. (2020). Cold-Stress Response of Probiotic *Lactobacillus plantarum* K25 by iTRAQ Proteomic Analysis. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(2), 187-195. <https://doi.org/10.4014/jmb.1909.09021> EDN: <https://elibrary.ru/slpzyn>
15. Marceau, A., Zagorec, M. & Champomier-Vergès, M.C. (2003). Positive effects of growth at suboptimal temperature and high salt concentration on long-term survival of *Lactobacillus sakei*. *Research in Microbiology*, 154, 37-42. [https://doi.org/10.1016/S0923-2508\(02\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0923-2508(02)00010-4)
16. Miller, M.B. (2001). Quorum sensing in bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 55, 165-199. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.165>
17. Montanari, C., Barbieri, F., Magnani, M., Grazia, L., Gardini, F. & Tabanelli, G. (2018). Phenotypic Diversity of *Lactobacillus sakei* Strains. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02003>
18. Nikiforova, A., Zamaratskaia, G. & Pickova, J. (2020). Fatty acid composition of salted and fermented products from Baikal omul (*Coregonus autumnalis migratorius*). *Journal of Food Science and Technology*, 57, 595-605. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04091-z> EDN: <https://elibrary.ru/zmeach>
19. Qian, X., Tian, P., Zhao, J., Zhang, H., Wang, G. & Chen, W. (2022). Quorum Sensing of Lactic Acid Bacteria: Progress and Insights. *Food Reviews International*, 39(7), 4781-4792. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2062766> EDN: <https://elibrary.ru/mhdkzq>
20. Skåra, T., Axelsson, L., Stefansson, G., Ekstrand, B. & Hagen, H. (2015). Fermented and ripened fish products in the northern European countries. *Journal of Ethnic Foods*, 2(1), 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2015.02.004>
21. Song, E.J., Lee, E.S., Park, S.L., Choi, H.J., Roh, S.W. & Nam, Y.D. (2018). Bacterial community analysis in three types of the fermented seafood, jeotgal, produced in South Korea. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 82(8), 1444-1454. <https://doi.org/10.1080/09168451.2018.1469395>
22. Speranza, B., Racioppo, A., Bevilacqua, A., Beneduce, L., Sinigaglia, M. & Corbo, M.R. (2015). Selection of Autochthonous Strains as Starter Cultures for Fermented Fish Products. *Journal of Food Science*, 80(1), M151-M160. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12721>
23. Tajdozian, H., Seo, H., Jeong, Y. et al. (2024). Efficacy of lyophilized *Lactobacillus sakei* as a potential candidate for preventing carbapenem-resistant *Klebsiella* infection. *Annals of Microbiology*, 74(28). <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01773-8> EDN: <https://elibrary.ru/ywbksc>
24. Trunk, T., Khalil, H.S. & Leo, J.C. (2018). Bacterial autoaggregation. *AIMS Microbiology*, 4(1), 140-164. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.1.140>

25. Yang, H., He, M. & Wu, C. (2021). Cross protection of lactic acid bacteria during environmental stresses: Stress responses and underlying mechanisms. *LWT*, 144, 111203. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111203> EDN: <https://elibrary.ru/nvykru>
26. Zagorec, M. & Champomier-Vergès, M.C. (2017). *Lactobacillus sakei*: A Starter for Sausage Fermentation, a Protective Culture for Meat Products. *Microorganisms*, 5(3), 56. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030056>
27. Zou, X., Pan, L., Xu, M., Wang, X., Wang, Q. & Han, Y. (2023). Probiotic potential of *Lactobacillus sakei* L-7 in regulating gut microbiota and metabolism. *Microbiological Research*, 274, 127438. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127438> EDN: <https://elibrary.ru/dbxzlz>

ВКЛАД АВТОРОВ

Никифорова А.П.: разработка концепции научной работы, составление и редактирование черновика рукописи, сбор и анализ данных.

Хамагаева И.С.: научные консультации, разработка концепции научной работы.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anna P. Nikiforova: development of study conception, drafting of the manuscript, editing of the draft of the manuscript, writing of the manuscript.

Irina S. Khamagaeva: scientific consultations, the development of study conception

ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Никифорова Анна Платоновна, канд. техн. наук, доцент Факультета биотехнологий

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО)

Кронверкский проспект, 49А, г. Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,

anna.p.nikiforova@gmail.com

Хамагаева Ирина Сергеевна, д-р техн. наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»

*ул. Ключевская, 40В, стр. 1, г. Улан-Удэ, 670013, Российская Феде-
рация
ikhamagaeva@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna P. Nikiforova, Cand. Sci. (Technology), Associate Professor of the Fa-
culty of Biotechnologies

ITMO University

49A, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russian Federation

anna.p.nikiforova@gmail.com

SPIN-code: 1595-7018

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3003-8638>

ResearcherID: B-6798-2016

Scopus Author ID: 57194715586

Irina S. Khamagaeva, Dr. Sci. (Technology), Professor

East Siberia State University of Technology and Management

*40V, building 1, Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, 670013, Russian Fede-
ration*

ikhamagaeva@mail.ru

SPIN-code: 9964-4020

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4294-5857>

Scopus Author ID: 6506395213

Поступила 26.12.2024

После рецензирования 15.01.2025

Принята 13.02.2025

Received 26.12.2024

Revised 15.01.2025

Accepted 13.02.2025

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1186

EDN: DSUPHE

УДК 579.66



Научная статья

ОЦЕНКА БИОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИРОДНЫХ ШТАММОВ *BACILLUS* SPP., ОБЛАДАЮЩИХ ЦЕННЫМИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

А.Н. Иркитова, Д.Е. Дудник, А.В. Малкова, К.В. Хлопова

Аннотация

Обоснование. Современной тенденцией развития сельского хозяйства является его экологизация за счет использования микроорганизмов, обладающих комплексом полезных свойств (антагонистическая активность, продукция ферментов и пр.). Важным критерием отбора для включения микробов в состав биопрепаратов является их безопасность.

Цель. Настоящее исследование направлено на изучение безопасности природных штаммов *Bacillus* spp., обладающих ценными биотехнологическими свойствами.

Материалы и методы. Объектами исследования были 10 штаммов бацилл из коллекции Инжинирингового центра «Промбиотех» АлтГУ. Для штаммов определены: способность к продукции ферментов патогенности классическими микробиологическими методами (гемолитическая, фосфатазная, лецитиназная и рибонуклеазная активности), профиль генов синтеза энтеротоксинов и цереулидсинтетазы рвотного токсина (*cytK*, *hblC*, *entFM*, *nheA*, *ces*) с помощью тест-системы ПЦР-РВ, а также проведена оценка токсичности изучаемых штаммов бацилл на мышинной модели.

Результаты. Все изучаемые штаммы *Bacillus* spp. проявили как минимум одну энзиматическую активность (РНК-азную). Для видов *B. pumilus*, *B. toyonensis* и штамма *B. licheniformis* 6 выявили 3 положительных ферментативных теста из 4 (кроме лецитиназы). По данным ПЦР-РВ для всех исследуемых штаммов по пяти генам токсинов был получен отрицательный результат. Это подтвердилось в исследованиях *in vivo*, так как у подопытных мышей от действия супернатантов всех исследуемых штаммов *Bacillus* spp. не зафиксировали острый токсический эффект.

Заключение. Исследованные штаммы рода *Bacillus* не относятся к потенциальным возбудителям пищевых токсикоинфекций человека и животных, так как не продуцируют энтеротоксины и цереулид, а также не проявляют токсических свойств на мышинной модели.

Ключевые слова: *Bacillus*; биобезопасность; ферменты патогенности; энтеротоксины; цереулид

Для цитирования. Иркитова, А.Н., Дудник, Д.Е., Малкова, А.В. & Хлопова, К.В. (2025). Оценка биобезопасности природных штаммов *Bacillus* spp., обладающих ценными биотехнологическими свойствами. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 188-207. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1208>

Original article

THE BIOSAFETY EVALUATION OF NATURAL *BACILLUS* SPP. STRAINS WITH VALUABLE BIOTECHNOLOGICAL PROPERTIES

A.N. Irkitova, A.V. Malkova, D.E. Dudnik, K.V. Khlopova

Abstract

Background. The modern trend in the agriculture development is its greening through the use of microorganisms that have a range of useful properties (antagonistic activity, enzyme production, etc.). An important selection criterion for the inclusion of microbes in the composition of biopreparations is their safety.

Purpose. The present study aimed to investigate the safety of *Bacillus* spp. natural strains that possessing valuable biotechnological properties.

Material and methods. The objects of the study were 10 bacillus strains from the collection of the Engineering Center “Prombiotech” ASU. The strains were tested for: the ability to produce pathogenicity enzymes using classical microbiological methods (hemolytic, phosphatase, lecithinase and ribonuclease activity), the profile of genes synthesizing enterotoxins and cereulide synthetase of emetic toxin (cytK, hblC, entFM, nheA, ces) using the real-time PCR test system, and the ability of the studied bacillus strains toxicity on a mouse model.

Results. All the studied *Bacillus* spp. strains showed at least one enzymatic activity (RNAase). For the species *B. pumilus*, *B. toyonensis* and the *B. licheniformis* 6 strain, 3 out of 4 positive enzymatic tests were detected (except for lecithinase). According to the real-time PCR data, all the studied strains showed a negative re-

sult for five toxin genes. This was confirmed in vivo, since no acute toxic effect was recorded in the experimental mice from the action of the all the studied *Bacillus* spp. strains supernatants.

Conclusion. The studied genus *Bacillus* strains do not belong to potential pathogens of food poisoning in humans and animals, since they do not produce enterotoxins and cereulide, and do not exhibit toxic properties in a mouse model.

Keywords: *Bacillus*; biosafety; pathogenicity enzymes; enterotoxins; cereulide

For citation. Irkitova, A.N., Malkova, A.V., Dudnik, D.E. & Khlopova, K.V. (2025). The biosafety evaluation of natural *Bacillus* spp. strains with valuable biotechnological properties. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 188-207. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1186>

Введение

Достижения микробной биотехнологии активно используются в сельском хозяйстве, пищевом производстве, ветеринарии и медицине, а также других областях народного хозяйства. Для этого применяются различные штаммы бактерий, грибов, вирусов, водорослей и простейших. К прокариотам, часто используемым в производственных целях, относятся представители рода *Bacillus*, которые проявляют высокую биосинтетическую активность и выраженную резистентность к различным факторам среды. Известно более 370 видов бацилл, почти повсеместно распространенных по земной поверхности, а к патогенным для животных из них относятся многие штаммы *B. anthracis*, *B. cereus* и *B. thuringiensis* [20; 30].

При этом промышленные штаммы микроорганизмов должны селективироваться не только на основании полезных технологически-ценных свойств (антагонистическая активность, продукция ферментов, антибиотиков и пр.), но и по критериям биобезопасности – факторам патогенности, вирулентности, аллергенности и способности к загрязнению окружающей среды [10; 21]. Несмотря на то, что отсутствует международный стандарт по оценке биобезопасности микроорганизмов, внедряющихся в биотехнологические цепочки, в ряде государств действуют специальные органы для регулирования этого вопроса. Например, в Америке под контролем FDA («Food and Drug Administration») создан и обновляется реестр GRAS («Generally recognized as safe»), в который на данный момент включено более 60 штаммов *Bacillus* spp. или продуктов на их основе. А EFSA («European Food Safety Authority») регулярно пополняет список микроорганизмов со статусом QPS («Qualified presumption of safety»), которые можно использовать для производства кормов, ферментов, продуктов питания,

пищевых добавок и средств защиты растений. На июнь 2024 года в данном перечне учтены штаммы 18 видов бацилл [29; 33; 34; 37].

В России работа с микроорганизмами I-IV групп патогенности, в частности используемыми на биотехнологических производствах, осуществляется в соответствии с СанПиНом 3.3686-21. Формирование системы безопасности производственных штаммов подразумевает их гигиеническое нормирование, в основе которого лежит эмпирическое установление минимально действующих концентраций микробного загрязнителя и определение предельно допустимой концентрации. Например, в исследовании Шеиной и соавторов [14] доказана биобезопасность исследуемых промышленных штаммов *Bacillus* spp. на основании вышеизложенных критериев.

Патогенность – это потенциальная способность микроорганизмов вызывать инфекционный процесс, заложенная генетически. А вирулентность – степень реального проявления данной потенции. При этом даже внутри патогенного вида *B. anthracis* известны авирулентные штаммы [13]. Существуют различные подходы к классификации факторов патогенности. В основном их подразделяют на факторы адгезии, инвазии, колонизации, уклонения от иммунитета и агрессии [16; 36]. В работе Tuipulotu et al. [19] в качестве основных факторов патогенности *B. cereus* выделены порообразующие токсины, цереулид, энтеротоксины и ферменты (гемолизины, протеазы и фосфолипазы). Для *B. thuringiensis* характерна продукция тех же токсинов, что и для вида *B. cereus* кроме цереулида. А клетки *B. anthracis* синтезируют сибиреязвенный экзотоксин антракс [23].

Немаловажным этапом при оценке биобезопасности штаммов *Bacillus* spp. является определение их токсичности в условиях *in vivo*. Для этого могут использоваться культуры клеток (Hep2, Vero) и животные модели (мыши, кролики и пр.) [23; 28].

Несмотря на то, что описанные выше виды бацилл с патогенными свойствами относятся к группе *Bacillus cereus*, в составе данного комплекса известны и безопасные бактерии, входящие в состав зарегистрированных и разрешенных биопрепаратов. Например, кормовая добавка «Тоуосерин» содержит штамм *B. toyonensis* BCT-7112T. Данный микроорганизм относится к безопасным, так как гены токсинов либо полностью отсутствуют в его геноме, либо являются нефункциональными [24].

Бактерии из группы *B. subtilis* классически воспринимаются как биобезопасные, при этом в ряде исследований приведены данные о наличии у некоторых штаммов этих видов генов и способности к продукции токсинов, ранее выявляемых у представителей группы *B. cereus* [17; 31]. Поэто-

му оценка всех новых штаммов рода *Bacillus* по критериям биологической безвредности перед их промышленным использованием является важным этапом разработки биопрепаратов.

Цель исследования – оценить биобезопасность природных штаммов *Bacillus* spp., обладающих ценными биотехнологическими свойствами.

Материалы и методы

Используемые штаммы. В качестве объектов исследования использовали штаммы рода *Bacillus* из коллекции ИЦ «Промбиотех», представленные в таблице 1. Все они выделены из объектов окружающей среды и депонированы в отечественных коллекциях микроорганизмов (Все-российской Коллекции Промышленных Микроорганизмов (ВКПМ) или Сетевой биоресурсной коллекции в области генетических технологий для сельского хозяйства (ВКСМ)), часть – запатентованы.

Таблица 1.

Штаммы *Bacillus* spp., использованные в исследовании

№	Вид и авторский номер	Номер штамма в коллекциях (ВКПМ/ВКСМ) /номер патента	Полезные свойства
1	<i>B. pumilus</i> 4	RCAM05516/ Пат. 2797825	антагонисты к фитопатогенным микромицетам, стимуляторы роста растений
2	<i>B. pumilus</i> 7	RCAM05517/ Пат. 2797699	
3	<i>B. pumilus</i> 16	В-13250/ Пат. 2694522	антагонисты к патогенам человека и животных, стимуляторы роста аквакультуры
4	<i>B. toyonensis</i> 15	В-13249/ Пат. 2693439	
5	<i>B. licheniformis</i> 6	-/-	антагонисты к патогенам человека и животных
6	<i>B. licheniformis</i> 8	-/-	
7	<i>B. mojavensis</i> 9	RCAM05965/ Пат. 2804275	
8	<i>B. subtilis</i> 1/8	RCAM06733/-	
9	<i>B. atrophaeus</i> 1	RCAM06422/-	
10	<i>B. atrophaeus</i> 7	RCAM06423/ Пат. 2821008	

Примечание: «-» – не депонирован и/или не запатентован

В качестве положительного контроля в экспериментах использовали штаммы *B. cereus* Gnz1 В-8163 (для энтеротоксинов, определения токсичности на мышинной модели) и *B. cereus* JL452 (В-11257) (для цереулида) из Государственной Коллекции Патогенных Микроорганизмов (ГКПМ) «Оболенск».

Определение ферментов патогенности. Энзиматическую активность определяли качественно чашечными методами на агаризованных средах согласно методам, описанным ранее [1; 4; 7]. Для определения гемолитической, фосфатазной и лецитиназной активностей использовали среду Хоттингера с добавлением 5 % дефибринированной крови крупного рогатого скота, 0,001 % фенолфталейнфосфата натрия или 10 % желтка куриного яйца соответственно. Оценку рибонуклеазной активности проводили на МПА с добавлением 0,5, 1,0 или 2,0 мг/мл нуклеиновой кислоты (дрожжевой РНК).

Определение профиля генов синтеза энтеротоксинов и цереулидсинтетазы рвотного токсина (cytK, hblC, entFM, nheA, ces) по ПЦР-тест-системе. На данном этапе использовали прототип ПЦР-тест-системы, разработанной в ФБУН ГНЦ ПМБ [9]. ПЦР в реальном времени (ПЦР-РВ) проводили с использованием термоциклера «CFX96» (Bio-Rad, США) и 2,5х реакционной смеси для проведения ПЦР-РВ «ПЦР-Комплект» (Синтол, Россия) согласно инструкции производителя, с добавлением сконструированных праймеров и зондов (табл. 2). В качестве матрицы использовали ДНК исследуемых штаммов (5–20 нг ДНК на реакцию).

Таблица 2.

Олигонуклеотиды для выявления генов синтеза энтеротоксинов и цереулида

Название олигонуклеотида	SEQ ID No.	Флюорофор	Последовательность 5' -3'	Детектируемый токсин
2cytKF	1		tctcgacatatctatatgaatctgatgc	Цитотоксин К
2cytKR	2		agttccaaatgtgtagcctggacg	
2cytKZ	3	(ROX)	ggtttctctcctggatgatcgctgtt	
2nheA F	4		cagggttattggttacagcagtatctacg	Негемолитический энтеротоксин А
2nheA R	5		caattagcttcggattatattcatcaatcc	
2nheA Z	6	(ROX)	cttacgctaaggaggggcaaacggaagt	
hblC-F2	7		ttcctcttcattacgaaaattagggtc	Гемолизин BL
hblC-R2	8		tcgtcatagccatttctgaagtacttc	
hblC-Z2	9	(FAM)	cctaatacaacaagatatgaaggaat-ggtca	
2entFM F	10		caaaactgggtggtcttatgtttaacact	Энтеротоксин FM
2entFM R	11		ttacaaacttaacgaagtctgcacttacgt	
2entFM Z	12	(RG6)	agctacatacaacgctgtaatcggtgg	
cesTF	13		tgctctggtaaatggctaatacgga	Цереулид
cesTR	14		ggtcatagtatgggtgctttggcag	
cesTZ	15	(FAM)	cgatatcgcggtgcttctctcca	

Разработанный прототип ПЦР-тест-системы использовали в две стадии, так как наличие гена не эквивалентно экспрессии соответствующего-белка. На первом этапе проводили детекцию соответствующих генов в ДНК, выделенных из исследуемых штаммов. На второй стадии анализа выделяли из этих же штаммов РНК, и проводили реакцию последующей обратной транскрипции (с помощью наборов реагентов «РИБО-Преп» и «РЕВРЕТА-L», соответственно) с повторной постановкой ПЦР с полученной кДНК. Вывод об экспрессии целевого гена делали по превышению сигнала по соответствующему каналу над сигналом внутреннего контрольного образца, полученного благодаря наличию остаточной ДНК в препарате.

Определение токсичности супернатантов штаммов Bacillus spp. на мышинной модели. Надосадочные жидкости получали следующим образом: осуществляли посев споровой суспензии каждого штамма бацилл в 100 мл жидкой среды ВНИ (Condalab, Испания) (посевная доза – 1×10^4 спор на 1 мл среды), культивирование проводили при температуре 37 °C и 120 об/мин в течение 18 часов. Полученные культуральные жидкости центрифугировали в течение 10 мин при 8000 об/мин. Супернатанты замораживали при температуре – 70 °C.

Все протоколы экспериментов были одобрены комитетом по биоэтике ФБУН ГНЦ ПМБ. Работы выполняли в соответствии с руководством и правилами Евросоюза по обращению, уходу и защите лабораторных животных [18] и ГОСТ 33216-2014 [8]. Животных разделили на 12 групп: 1–10 – опытные (исследуемые штаммы), 11 – положительный контроль (*B. cereus* Gnz1 B-8163), 12 – отрицательный контроль (стерильная среда ВНИ). Заражение проводили однократно внутрибрюшинной инъекцией в объеме 500 мкл. Были использованы нелинейные мыши в возрасте 18–20 дней, по три мыши на каждую группу. Наблюдение за животными проводили в течение 7 дней. Выжившие животные были гуманно эвтаназированы ингаляцией CO₂.

Результаты и обсуждение

Детекция ферментов агрессии у исследуемых штаммов рода Bacillus. В ходе составления профиля ферментов патогенности бацилл было установлено, что для всех штаммов характерно проявление хотя бы одного типа энзиматической активности (*B. mojavensis* 9 и *B. atrophaeus* 7). Максимальный спектр биохимических реакций – 3 положительных теста из 4 был отмечен для видов *B. pumilus*, *B. toyonensis* и штамма *B. licheniformis* 6. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Продукция ферментов патогенности исследуемыми штаммами бацилл

№	Штаммы	Ферментативные активности			
		Гемолитическая	Фосфатазная	Лецитиназная	РНК-ная
1	<i>B. pumilus</i> 4	+	+	-	+
2	<i>B. pumilus</i> 7	+	+	-	+
3	<i>B. pumilus</i> 16	+	+	-	+-
4	<i>B. toyonensis</i> 15	+	+	-	+-
5	<i>B. licheniformis</i> 6	+-	+	-	+
6	<i>B. licheniformis</i> 8	+	-	-	+
7	<i>B. mojavensis</i> 9	-	-	-	+-
8	<i>B. subtilis</i> 1/8	+	-	-	+-
9	<i>B. atrophaeus</i> 1	-	+	-	+
10	<i>B. atrophaeus</i> 7	-	-	-	+

Примечание: «+» – положительная реакция, «+-» – слабая реакция, «-» – отрицательная реакция

Литературные данные по ферментам патогенности у микроорганизмов неоднозначны. Считается, что у пробиотических штаммов должна отсутствовать гемолитическая активность [26]. Например, в работе Kim et al. [34], для изолята *B. subtilis* IDCC1101, рекомендуемого для индустриального применения, чашечным методом не был зафиксирован гемолиз, но при этом в ходе секвенирования был обнаружен ген, кодирующий предполагаемую мембранную гидролазу (hlyIII). Также известно, что биосурфактанты бацилл, обладающие антимикробными, инсектицидными, эмульгирующими и низкотоксичными свойствами, способны вызывать лизис кровяного агара [22]. В нашем же исследовании гемолиз не вызвали только 3 штамма из 10 изученных, однако выявление механизма реализации данной активности требует дополнительных исследований.

Нуклеазная активность является одним из важных факторов патогенности и генотоксичности микоплазм и энтеробактерий. При этом РНК-азы бацилл относят к неиммунотоксичным. Кроме того, в последние годы активно изучается их противоопухолевая и антивирусная активность [6; 4; 11]. В рамках данного исследования для всех изучаемых штаммов *Bacillus* spp. была зафиксирована рибонуклеазная активность. Самые большие зоны деполимеризации РНК были выявлены для штаммов *B. licheniformis* 6 и *B. atrophaeus* 1 (размер области деструкции РНК превышал зону микробного роста в 10 и 8 раз соответственно).

Активность фосфатаз также относится к многочисленным механизмам бактериальной вирулентности. Данные ферменты участвуют в развитии инфекционного процесса, вызываемого *Staphylococcus aureus*, *Mycobacterium tuberculosis*, *Pseudomonas aeruginosa* и др. При этом щелочные фосфатазы являются одними из ключевых внеклеточных энзимов бактерий, которые используются во многих реакциях, сопряженных с фосфорилированием, поэтому данные ферменты широко распространены в природе [15; 27]. Например, в работе Сульдиной с соавторами [2] ген, кодирующий фосфатазу, был детектирован у всех исследуемых штаммов *B. subtilis*. В нашем исследовании фосфатазная активность была подтверждена у 6 из 10 изученных штаммов бацилл.

Лецитиназа (фосфолипаза) может участвовать в разрушении клеточных мембран, поэтому присутствие данного фермента в пищевых продуктах может расцениваться как индикатор их токсичности. В качестве продуцентов данного энзима рассматриваются виды *B. cereus*, *B. mycoides* и *B. thuringiensis* [35]. При этом имеются литературные данные, свидетельствующие, что по лецитиназному тесту можно достоверно отличить *B. subtilis* от *B. cereus* [5]. Однако известны и противоречивые факты. Например, в работе Phelps et al. [31] ряд штаммов *B. subtilis* обладали положительной реакцией на лецитиназу. В нашем исследовании для всех штаммов бацилл установили отрицательную лецитиназную активность, даже для штамма *B. toyonensis* 15 из группы *B. cereus*. Хотя по литературным данным известны изоляты этого вида, которые продуцируют лецитиназу [32].

Выявление способности к синтезу токсинов у изучаемых штаммов Bacillus spp. В соответствии с полученными данными ПЦР–РВ для всех десяти исследуемых штаммов по пяти генам токсинов (цитотоксин К, негемолитический энтеротоксин А, гемолизин BL, энтеротоксин FM и цереулид) был получен отрицательный результат. Так как не были детектированы ни соответствующие гены в ДНК изучаемых штаммов бацилл, ни экспрессия генов на втором этапе анализа. Поэтому положительная гемолитическая активность 7 из 10 штаммов рода *Bacillus* не может быть обусловлена синтезом гемолизина BL.

Для контрольных штаммов *B. cereus* Gnz1 B-8163 и *B. cereus* JL452 B-11257 было выявлено наличие генов (cyt K, hblC, entFM, nheA и ces) и способность к продукции энтеротоксинов и цереулида соответственно. Что подтверждает работоспособность разработанного прототипа ПЦР-тест-системы и отсутствие токсического потенциала у исследуемых штаммов *Bacillus spp.* Однако, согласно литературным данным, в геноме

бацилл могут содержаться ген/гены токсинообразования, но их экспрессия при этом может не происходить [24; 31]. Поэтому для правомерного заключения о нетоксичности изучаемых культур необходимы исследования *in vivo*.

Оценка токсичности изучаемых штаммов бацилл на мышинной модели. В результате экспериментов установлено, что острый токсический эффект у подопытных мышей от действия супернатантов всех исследуемых штаммов *Bacillus* spp. отсутствует, поскольку все животные остались живы, как и в группе отрицательного контроля. Значимых изменений в поведении животных, а также при проведении визуального патоморфологического исследования зафиксировать не удалось. Только лёгкий отёк в месте введения.

При этом штамм *B. cereus* Gnz1 B-8163, продуцирующий все проверенные токсины, в концентрации 1×10^4 спор на 1 мл среды вызвал абсолютную летальность экспериментальных мышей в группе положительного контроля. Гибель животных в одиннадцатой группе произошла в первые сутки наблюдения. Среди характерных признаков наблюдались судороги задних конечностей в первый час после заражения, угасание двигательной активности. Патолого-морфологических изменений органов после вскрытия животных не наблюдалось.

В соответствии с литературными данными, отсутствие токсического эффекта может быть зафиксировано как для представителей группы *B. subtilis*, так и комплекса *B. cereus*. Например, в работе Файрушина с соавторами [12] доказано, что штамм *B. subtilis* 11В не проявляет токсичности и токсигенности в экспериментах на белых мышах. Шеина и др. [9] установили, что штамм *B. thuringiensis* ssp. *toumanoffi* 25 не обладает общим токсическим действием на крыс.

Заключение

При оценке биобезопасности микроорганизмов необходимо проводить исследования, опирающиеся не на один детерминант патогенности. Все изученные штаммы *Bacillus* spp. не являются этиологическими агентами пищевых токсикоинфекций у человека и животных, так как не синтезируют токсины CytK, NHE, HBL, EntFM и Cer. Кроме того, в исследованиях *in vivo* подтверждено отсутствие острой токсичности исследуемых бацилл на мышинной модели. Однако для установления механизмов гемолитической и фосфатазной активностей культур необходимы дополнительные исследования.

Список литературы

1. Бороздина, И.Б. (2011). Сравнительная характеристика бактерий рода *Bacillus* семейства Берёзовые (*Betulaceae*) при культивировании на искусственных питательных средах. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2, 43-48. EDN: <https://elibrary.ru/ncxvtr>
2. Сульдина, Е.В., Феоктистова, Н.А., Богданов, И.И. & Молофеева, Н.И. (2021). Выявление генов ферментов у бактерий вида *Bacillus subtilis* методом REALTIME PCR. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, 4(56), 61-65. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-4-61-65> EDN: <https://elibrary.ru/rzcvqv>
3. ГОСТ 33216-2014. Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами. М.: Стандартинформ, 2016. 17 с.
4. Журавлёв, П.В., Алешня, В.В. & Панасовец, О.П. (2018). Ферменты патогенности у бактерий, выделенных из воды открытых водоёмов. *Здоровье населения и среда обитания*, 1(298), 11-14. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2018-298-1-11-14> EDN: <https://elibrary.ru/ytzsrtr>
5. Иванова, А.Ю., Полосенко, О.В. & Шепелин, А.П. (2022). Разработка и оценка качества отечественной питательной среды для идентификации *Bacillus cereus* и *Bacillus subtilis*. *Бактериология*, 7(1), 18-24. <https://doi.org/10.20953/2500-1027-2022-1-18-24> EDN: <https://elibrary.ru/sxlbdr>
6. Хайруллин, Р.М., Бурханова, Г.Ф., Сорокань, А.В., Сарварова, Е.Р., Веселова, С.В., Черепанова, Е.А., Вологин, С.Г., Замалиева, Ф.Ф. & Максимов, И.В. (2019). К механизмам противовирусной активности бактерий рода *Bacillus subtilis* на растениях картофеля. *Теоретическая и прикладная экология*, 4, 130-135. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-4-130-135> EDN: <https://elibrary.ru/bmhxvq>
7. Маринин, Л.И., Дятлов, И.А. & Мокриевич, А.Н. (2021). *Методы изучения биологических и молекулярно-генетических свойств возбудителя сибирской язвы*. М.: Издательство «Династия», 240 с. ISBN: 978-5-98125-122-1 EDN: <https://elibrary.ru/lbrswq>
8. Набор олигонуклеотидных праймеров и флуоресцентно-меченых зондов для индикации цереулида и диарейных энтеротоксинов *Bacillus cereus* complex с помощью ПЦР-РВ. Патентная заявка № 2024121115.
9. Шеина, Н.И., Буданова, Е.В., Мялина, Л.И., Сазонова, Л.П. & Колесникова, В.В. (2018). Новые сведения о токсичности и опасности химических и биологических веществ. Микроорганизм *Bacillus thuringiensis* ssp. *toumanoffi* 25. *Токсикологический вестник*, 1, 135-137. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2018-1-35-37> EDN: <https://elibrary.ru/yrshqg>

10. Байдалинов, А.И., Шемшура, О.Н., Исмаилова, Э.Т., Джакибаева, Г.Т., Тлеубекова, Д.А., Баймаханова, Г.Б. & Кенжеев, Ш.Т. (2022). Оценка биобезопасности штамма *Bacillus amyloliquefaciens* MB40, перспективного в качестве основы биопрепарата против бактериального ожога плодовых культур. *Микробиология және вирусология*, 4(35), 38-47. <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2021.04.03> EDN: <https://elibrary.ru/xdjpms>
11. Ильинская, О.Н., Сокурено, Ю.В., Ульянова, В.В., Вершинина, В.И., Зеленихин, П.В., Колпаков, А.И., Медведева, Е.С., Баранова, Н.Б., Давыдова, М.Н., Музыкантов, А.А. & Чернова, О.А., Чернов, В.М. (2014). Рибонуклеолитическая активность микоплазм. *Микробиология*, 83(3), 320-327. <https://doi.org/10.7868/S0026365614030070> EDN: <https://elibrary.ru/sbvwwf>
12. Файрушин, Р.Н., Ганиева, Р.Ф. & Шарипов, А.Р. (2022). Оценка общей токсичности пробиотика Витафорт на лабораторных животных и его иммунного действия на организм телят. В: *Сборник научных трудов двенадцатой международной межвузовской конференции по клинической ветеринарии в формате partners*. Москва, 463-468. EDN: <https://elibrary.ru/htfayl>
13. Феоктистова, Н.А., Васильев, Д.А. & Климушкин, Е.И. (2015). Подбор перспективного производственного штамма *Bacillus anthracis* для конструирования фагового биопрепарата. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, 3(31), 69-75. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2015-3-69-75> EDN: <https://elibrary.ru/umibbh>
14. Шеина, Н.И. (2012). Критерии оценки биобезопасности микроорганизмов, используемых в биотехнологической промышленности. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 6(142), 165-169. EDN: <https://elibrary.ru/pdqwfn>
15. Балабанова, Л.А., Сейткалиева, А.В., Сон, О.М. & Текутьева, Л.А. (2023). Щелочные фосфатазы: распространение в природе и биологические функции. Чебоксары: Среда, 144 с. <https://doi.org/10.31483/a-10570> ISBN: 978-5-907688-94-0 EDN: <https://elibrary.ru/cwswcz>
16. Abdulateef, S.A., Owaiif, H.A.A. & Hussein, M.H. (2023). Importance of Virulence Factors in Bacterial Pathogenicity: A Review. *International Journal of Medical Science and Clinical Research Studies*, 3, 765-769. <https://doi.org/10.47191/ijmscrs/v3-i4-35> EDN: <https://elibrary.ru/anbklb>
17. Yoo, J.G., Chang, J.-H., Kim, S., Ji, J.-Y., Hong, S.-W. & Park, B.-Y., Oh, M.-H. (2014). Analysis of emetic toxin production by *Bacillus* species using cellular cytotoxicity, molecular, and chromatographic assays. *Biotechnology and Bio-process Engineering*, 19, 978-983. <https://doi.org/10.1007/s12257-014-0574-7> EDN: <https://elibrary.ru/xbjteb>

18. Animals in science. EU actions for the protection of animals used for scientific purposes. [Электронный ресурс]. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/chemicals/animals-science_en
19. Tuipulotu, D.E., Mathur, A., Ngo, C. & Man, S.M. (2021). *Bacillus cereus*: Epidemiology, Virulence Factors, and Host-Pathogen Interactions. *Trends in Microbiology*, 29, 458-471. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.09.003> EDN: <https://elibrary.ru/azuevz>
20. Baindara, P. & Aslam, B. (2023). Editorial: *Bacillus spp.* - Transmission, pathogenesis, host-pathogen interaction, prevention and treatment. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1307723> EDN: <https://elibrary.ru/oxhdcx>
21. Sheina, N.I., Budanova, E.V., Pivovarov, Y. & Sazonova, L. (2017). Biosafety Assessment of Microbial Strains Used in Biotechnology According to Their Taxonomy. *International Journal of Biomedicine*, 7, 51-56. [https://doi.org/10.21103/Article7\(1\)_OA6](https://doi.org/10.21103/Article7(1)_OA6) EDN: <https://elibrary.ru/yginip>
22. Liu, J., Fang, C., Jiang, Y. & Yan, R. (2009). Characterization of a Hemolysin Gene *ytjA* from *Bacillus subtilis*. *Current Microbiology*, 58(6), 642-647. <https://doi.org/10.1007/s00284-009-9383-1> EDN: <https://elibrary.ru/xwzkzn>
23. Ehling-Schulz, M., Lereclus, D. & Koehler, T.M. (2019). The *Bacillus cereus* group: *Bacillus* species with pathogenic potential. *Microbiology Spectrum*, 7(3). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.gpp3-0032-2018> EDN: <https://elibrary.ru/kvmmgq>
24. Abdulmawjood, A., Herrmann, J., Riede, S., Jimenez, G., Becker, A. & Breves, G. (2019). Evaluation of enterotoxin gene expression and enterotoxin production capacity of the probiotic strain *Bacillus toyonensis* BCT-7112T. *PLoS One*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214536>
25. Bamba, T., Aoki, R., Hori, Y., Ishikawa, S., Yoshida, K.I., Taoka, N., Kobayashi, S., Yasueda, H., Kondo, A. & Hasunuma, T. (2024). High-throughput evaluation of hemolytic activity through precise measurement of colony and hemolytic zone sizes of engineered *Bacillus subtilis* on blood agar. *Biology Methods and Protocols*, 9. <https://doi.org/10.1093/biomed/bpae044> EDN: <https://elibrary.ru/wudxjv>
26. Halder, D., Mandal, M., Chatterjee, S.S., Pal, N.K. & Mandal, S. (2017). Indigenous Probiotic *Lactobacillus* Isolates Presenting Antibiotic like Activity against Human Pathogenic Bacteria. *Biomedicines*, 5. <https://doi.org/10.3390/biomedicines5020031>
27. Kuban-Jankowska, A., Kostrzewa, T. & Gorska-Ponikowska, M. (2022). Bacterial Protein Tyrosine Phosphatases as Possible Targets for Antimicrobial Thera-

- pies in Response to Antibiotic Resistance. *Antioxidants (Basel)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/antiox11122397> EDN: <https://elibrary.ru/pliksr>
28. Rolny, I.S., Ivanna, S.R., Minnaard, J., Racedo, S.M. & Perez, P.F. (2014). Mouse model of gastrointestinal *Bacillus cereus* infection. *Journal of Medical Microbiology*, 63, 1741-1749. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.079939-0>
29. Microbiological agents as notified to EFSA. [Электронный ресурс]. URL: <https://zenodo.org/records/12793271>
30. Caulier, S., Nannan, C., Gillis, A., Licciardi, F., Bragard, F. & Mahillon, J. (2019). Overview of the Antimicrobial Compounds Produced by Members of the *Bacillus subtilis* Group. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00302> EDN: <https://elibrary.ru/zyggwt>
31. Phelps, R.J. & McKillip, J.L. (2002). Enterotoxin Production in Natural Isolates of Bacillaceae outside the *Bacillus cereus* Group. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(6), 3147-3151. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.6.3147-3151.2002>
32. Roca, A., Cabeo, M., Enguidanos, C., Martínez-Checa, F., Sampedro, I. & Llamas, I. (2024). Potential of the quorum-quenching and plant-growth promoting halotolerant *Bacillus toyonensis* AA1EC1 as biocontrol agent. *Microbial Biotechnology*, 17. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14420> EDN: <https://elibrary.ru/nibfbm>
33. Qualified presumption of safety (QPS). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/qualified-presumption-safety-qps>
34. Kim, S.-H., Yehuala, G.A., Bang, W.Y., Yang, J., Jung, Y.H. & Park, M.-K. (2022). Safety Evaluation of *Bacillus subtilis* IDCC1101, Newly Isolated from Cheonggukjang, for Industrial Applications. *Microorganisms*, 10. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122494> EDN: <https://elibrary.ru/fsdvwb>
35. Sharaf, E.F., El-Sayed, W.S. & Abosaif, R.M. (2018). Lecithinase-producing bacteria in commercial and home-made foods: Evaluation of toxic properties and identification of potent producers. *Journal of Taibah University for Science*, 8, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.jtusc.2014.03.006>
36. Soni, J., Sinha, S. & Pandey, R. (2024). Understanding bacterial pathogenicity: a closer look at the journey of harmful microbes. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1370818> EDN: <https://elibrary.ru/rqmuxt>
37. Jeżewska-Frąckowiak, J., Seroczyńska, K., Banaszczyk, J., Jedrzejczak, G., Żylicz-Stachula, A. & Skowron, P.M. (2018). The promises and risks of probiotic *Bacillus* species. *Acta biochimica Polonica*, 65, 509-519. https://doi.org/10.18388/abp.2018_2652 EDN: <https://elibrary.ru/upxvcn>

References

1. Borozdina, I. B. (2011). Comparative characteristics of *Bacillus* bacteria of the *Betulaceae* family when cultured on artificial nutrient media. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2, 43-48. EDN: <https://elibrary.ru/ncxvir>
2. Suldina, E. V., Feoktistova, N. A., Bogdanov, I. I., & Molofeeva, N. I. (2021). Detection of enzyme genes in *Bacillus subtilis* bacteria using REALTIME PCR. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 4(56), 61-65. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-4-61-65> EDN: <https://elibrary.ru/rzcvqv>
3. *GOST 33216-2014. Guidelines for the maintenance and care of laboratory animals. Rules for the maintenance and care of laboratory rodents and rabbits.* Moscow: Standartinform, 2016, 17 p.
4. Zhuravlev, P. V., Aleshnya, V. V., & Panasovets, O. P. (2018). Pathogenic enzymes in bacteria isolated from open water bodies. *Public Health and Habitat*, 1(298), 11-14. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2018-298-1-11-14> EDN: <https://elibrary.ru/ytzsrt>
5. Ivanova, A. Yu., Polosenko, O. V., & Shepelin, A. P. (2022). Development and quality assessment of domestic nutrient medium for identification of *Bacillus cereus* and *Bacillus subtilis*. *Bacteriology*, 7(1), 18-24. <https://doi.org/10.20953/2500-1027-2022-1-18-24> EDN: <https://elibrary.ru/sxlbdp>
6. Khairullin, R. M., Burkhanova, G. F., Sorokan, A. V., Sarvarova, E. R., Veselova, S. V., Cherepanova, E. A., Vologin, S. G., Zamalieva, F. F., & Maksimov, I. V. (2019). On the mechanisms of antiviral activity of *Bacillus subtilis* bacteria in potato plants. *Theoretical and Applied Ecology*, 4, 130-135. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-4-130-135> EDN: <https://elibrary.ru/bmhxvq>
7. Marinin, L. I., Dyatlov, I. A., & Mokrievich, A. N. (2021). *Methods for studying biological and molecular genetic properties of anthrax pathogen.* Moscow: Dynasty Publishing House, 240 p. ISBN: 978-5-98125-122-1 EDN: <https://elibrary.ru/lbrswq>
8. Set of oligodeoxyribonucleotide primers and fluorescently labeled probes for detection of cereulide and diarrheal enterotoxins of *Bacillus cereus* complex using RT-PCR. Patent application № 2024121115.
9. Sheina, N. I., Budanova, E. V., Mialina, L. I., Sazonova, L. P., & Kolesnikova, V. V. (2018). New information on toxicity and hazard of chemical and biological substances. Microorganism *Bacillus thuringiensis* ssp. *toumanoffi* 25. *Toxicological Bulletin*, 1, 135-137. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2018-1-35-37> EDN: <https://elibrary.ru/yrshqg>
10. Baidalinov, A. I., Shemshura, O. N., Ismailova, E. T., Dzhakibaeva, G. T., Tleubekova, D. A., Baimakhanova, G. B., & Kenzheev, Sh. T. (2022). Assessment

- of biosafety of *Bacillus amyloliquefaciens* MB40 strain, promising as a basis for biopreparation against bacterial burn of fruit crops. *Microbiology and Virology*, 4(35), 38-47. <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2021.04.03> EDN: <https://elibrary.ru/xdjpm>
11. Ilinskaya, O. N., Sokurenko, Yu. V., Ulyanova, V. V., Vershinina, V. I., Zelenikhin, P. V., Kolpakov, A. I., Medvedeva, E. S., Baranova, N. B., Davydova, M. N., Muzykantov, A. A., Chernova, O. A., & Chernov, V. M. (2014). Ribonucleolytic activity of mycoplasmas. *Microbiology*, 83(3), 320-327. <https://doi.org/10.7868/S0026365614030070> EDN: <https://elibrary.ru/sbvwwf>
 12. Fairushin, R. N., Ganieva, R. F., & Sharipov, A. R. (2022). Assessment of general toxicity of Vitafort probiotic on laboratory animals and its immune effect on calves' organism. In: *Collection of scientific works of the Twelfth International Interuniversity Conference on Clinical Veterinary Medicine in partners format*. Moscow, 463-468. EDN: <https://elibrary.ru/htfayl>
 13. Feoktistova, N. A., Vasiliev, D. A., & Klimushkin, E. I. (2015). Selection of promising industrial strain of *Bacillus anthracis* for designing phage biopreparation. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 3(31), 69-75. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2015-3-69-75> EDN: <https://elibrary.ru/umibbh>
 14. Sheina, N. I. (2012). Criteria for assessing biosafety of microorganisms used in biotechnological industry. *Bulletin of Orenburg State University*, 6(142), 165-169. EDN: <https://elibrary.ru/pdqwfn>
 15. Balabanova, L. A., Seitkalieva, A. V., Son, O. M., & Tekutieva, L. A. (2023). *Alkaline phosphatases: distribution in nature and biological functions*. Cheboksary: Sreda, 144 p. <https://doi.org/10.31483/a-10570> ISBN: 978-5-907688-94-0 EDN: <https://elibrary.ru/cwswcz>
 16. Abdulateef, S.A., Owaif, H.A.A. & Hussein, M.H. (2023). Importance of Virulence Factors in Bacterial Pathogenicity: A Review. *International Journal of Medical Science and Clinical Research Studies*, 3, 765-769. <https://doi.org/10.47191/ijmscrs/v3-i4-35> EDN: <https://elibrary.ru/anbklb>
 17. Yoo, J.G., Chang, J.-H., Kim, S., Ji, J.-Y., Hong, S.-W. & Park, B.-Y., Oh, M.-H. (2014). Analysis of emetic toxin production by *Bacillus* species using cellular cytotoxicity, molecular, and chromatographic assays. *Biotechnology and Bio-process Engineering*, 19, 978-983. <https://doi.org/10.1007/s12257-014-0574-7> EDN: <https://elibrary.ru/xbjteb>
 18. Animals in science. EU actions for the protection of animals used for scientific purposes. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/chemicals/animals-science_en
 19. Tuipulotu, D.E., Mathur, A., Ngo, C. & Man, S.M. (2021). *Bacillus cereus*: Epidemiology, Virulence Factors, and Host-Pathogen Interactions. *Trends in Micro-*

- biology*, 29, 458-471. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.09.003> EDN: <https://elibrary.ru/azuevz>
20. Baindara, P. & Aslam, B. (2023). Editorial: *Bacillus spp.* - Transmission, pathogenesis, host-pathogen interaction, prevention and treatment. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1307723> EDN: <https://elibrary.ru/oxhdcx>
21. Sheina, N.I., Budanova, E.V., Pivovarov, Y. & Sazonova, L. (2017). Bio-safety Assessment of Microbial Strains Used in Biotechnology According to Their Taxonomy. *International Journal of Biomedicine*, 7, 51-56. [https://doi.org/10.21103/Article7\(1\)_OA6](https://doi.org/10.21103/Article7(1)_OA6) EDN: <https://elibrary.ru/yginip>
22. Liu, J., Fang, C., Jiang, Y. & Yan, R. (2009). Characterization of a Hemolysin Gene *ytjA* from *Bacillus subtilis*. *Current Microbiology*, 58(6), 642-647. <https://doi.org/10.1007/s00284-009-9383-1> EDN: <https://elibrary.ru/xwzkzn>
23. Ehling-Schulz, M., Lereclus, D. & Koehler, T.M. (2019). The *Bacillus cereus* group: *Bacillus* species with pathogenic potential. *Microbiology Spectrum*, 7(3). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.gpp3-0032-2018> EDN: <https://elibrary.ru/kvmmgq>
24. Abdulmawjood, A., Herrmann, J., Riede, S., Jimenez, G., Becker, A. & Breves, G. (2019). Evaluation of enterotoxin gene expression and enterotoxin production capacity of the probiotic strain *Bacillus toyonensis* BCT-7112T. *PLoS One*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214536>
25. Bamba, T., Aoki, R., Hori, Y., Ishikawa, S., Yoshida, K.I., Taoka, N., Kobayashi, S., Yasueda, H., Kondo, A. & Hasunuma, T. (2024). High-throughput evaluation of hemolytic activity through precise measurement of colony and hemolytic zone sizes of engineered *Bacillus subtilis* on blood agar. *Biology Methods and Protocols*, 9. <https://doi.org/10.1093/biomed/bpae044> EDN: <https://elibrary.ru/wudxjv>
26. Halder, D., Mandal, M., Chatterjee, S.S., Pal, N.K. & Mandal, S. (2017). Indigenous Probiotic *Lactobacillus* Isolates Presenting Antibiotic like Activity against Human Pathogenic Bacteria. *Biomedicines*, 5. <https://doi.org/10.3390/biomedicines5020031>
27. Kuban-Jankowska, A., Kostrzewa, T. & Gorska-Ponikowska, M. (2022). Bacterial Protein Tyrosine Phosphatases as Possible Targets for Antimicrobial Therapies in Response to Antibiotic Resistance. *Antioxidants (Basel)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/antiox11122397> EDN: <https://elibrary.ru/pliksr>
28. Rolny, I.S., Ivanna, S.R., Minnaard, J., Racedo, S.M. & Perez, P.F. (2014). Mouse model of gastrointestinal *Bacillus cereus* infection. *Journal of Medical Microbiology*, 63, 1741-1749. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.079939-0>

29. Microbiological agents as notified to EFSA. URL: <https://zenodo.org/records/12793271>
30. Caulier, S., Nannan, C., Gillis, A., Licciardi, F., Bragard, F. & Mahillon, J. (2019). Overview of the Antimicrobial Compounds Produced by Members of the *Bacillus subtilis* Group. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00302> EDN: <https://elibrary.ru/zyggwt>
31. Phelps, R.J. & McKillip, J.L. (2002). Enterotoxin Production in Natural Isolates of Bacillaceae outside the *Bacillus cereus* Group. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(6), 3147-3151. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.6.3147-3151.2002>
32. Roca, A., Cabeo, M., Enguidanos, C., Martínez-Checa, F., Sampedro, I. & Llamas, I. (2024). Potential of the quorum-quenching and plant-growth promoting halotolerant *Bacillus toyonensis* AA1EC1 as biocontrol agent. *Microbial Biotechnology*, 17. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14420> EDN: <https://elibrary.ru/nibfbm>
33. Qualified presumption of safety (QPS). URL: <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/qualified-presumption-safety-qps>
34. Kim, S.-H., Yehuala, G.A., Bang, W.Y., Yang, J., Jung, Y.H. & Park, M.-K. (2022). Safety Evaluation of *Bacillus subtilis* IDCC1101, Newly Isolated from Cheonggukjang, for Industrial Applications. *Microorganisms*, 10. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122494> EDN: <https://elibrary.ru/fsdvwb>
35. Sharaf, E.F., El-Sayed, W.S. & Abosaif, R.M. (2018). Lecithinase-producing bacteria in commercial and home-made foods: Evaluation of toxic properties and identification of potent producers. *Journal of Taibah University for Science*, 8, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.03.006>
36. Soni, J., Sinha, S. & Pandey, R. (2024). Understanding bacterial pathogenicity: a closer look at the journey of harmful microbes. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1370818> EDN: <https://elibrary.ru/rqmuxt>
37. Jeżewska-Frąckowiak, J., Seroczyńska, K., Banaszczyk, J., Jedrzejczak, G., Żylicz-Stachula, A. & Skowron, P.M. (2018). The promises and risks of probiotic *Bacillus* species. *Acta biochimica Polonica*, 65, 509-519. https://doi.org/10.18388/abp.2018_2652 EDN: <https://elibrary.ru/upxvcn>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ирктова Алёна Николаевна, к.б.н., доцент, директор ИЦ «Промбиотех»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет»
проспект Ленина, 61, г. Барнаул, 656049, Алтайский край
elen171987@mail.ru

Дудник Дина Евгеньевна, младший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет»

*проспект Ленина, 61, г. Барнаул, 656049, Алтайский край
dudnik-dina@mail.ru*

Малкова Ангелина Владимировна, к.б.н, научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет»

*проспект Ленина, 61, г. Барнаул, 656049, Алтайский край
gelishka96@mail.ru*

Хлопова Ксения Вальерьевна, младший научный сотрудник

*Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии»
Территория «Квартал А», 24, п. Оболенск, г. Серпухов, 142279, Московская область*

xlopova.12@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alena N. Irkitova, Cand. of Bio. Sc., Asc. Prof., Director Engineering Center “Prombiotech”

Altai State University

*61, pr. Lenina, Barnaul, Altai Territory, 656049, Russian Federation
elen171987@mail.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2664-1995>

Dina E. Dudnik, Junior Researcher

Altai State University

*61, pr. Lenina, Barnaul, Altai Territory, 656049, Russian Federation
dudnik-dina@mail.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2086-8144>

Angelina V. Malkova, Cand. of Bio. Sc., Researcher

Altai State University

61, pr. Lenina, Barnaul, Altai Territory, 656049, Russian Federation

gelishka96@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4053-036X>

Kseniya V. Khlopova, Junior Researcher

State Research Center for Applied Microbiology and Biotechnology

24, Territory "Kvartal A", Obolensk, Serpukhov, 142279, Moscow region, Russian Federation

xlopova.12@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7611-3608>

Поступила 08.11.2024

После рецензирования 05.12.2024

Принята 14.12.2024

Received 08.11.2024

Revised 05.12.2024

Accepted 14.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1177

EDN: GIKGAX

UDC 636.2:619:618.3:577.1



Original article

FETAL GROWTH RESTRICTION IN COWS IS ASSOCIATED WITH INTRAUTERINE DISELEMENTOSIS

V.A. Safonov, T.S. Ermilova, A.E. Chernitskiy

Abstract

Fetal growth restriction (FGR) is prevalent in highly productive dairy herds and presents a considerable challenge for animal husbandry. One contributing factor to FGR is the deficiency of essential trace elements and impaired placental transport functions in pregnant cows. In this study, we performed a comparative analysis of 12 trace elements and their ratios in the hair of newborn calves with a history of FGR (Group I, $n = 18$) and those born to cows with a normal pregnancy (Group II, $n = 24$). FGR was diagnosed based on ultrasound examinations of the pregnant cows performed at 38–45, 60–65, and 110–115 days of gestation using an Easi-Scan-3 scanner with a 4.5–8.5 MHz linear sensor (BCF Technology Ltd., Great Britain) following a previously established and published protocol. Hair samples from the calves were collected from the tail switch immediately before their first colostrum feeding. The concentrations of arsenic, cadmium, cobalt, copper, iron, mercury, manganese, molybdenum, nickel, lead, selenium, and zinc in the hair were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (Nexion 300D, Perkin Elmer, USA). To evaluate intrauterine diselementosis based on the trace element levels in the hair, various ratios were calculated: arsenic/selenium, mercury/selenium, lead/selenium, lead/zinc, cadmium/selenium, nickel/zinc, and iron/copper. Calves in Group I had significantly higher levels of cadmium in their hair (increased by 66.7%, $P < 0.05$) and mercury (increased by 15.0 times, $P < 0.05$) along with lower levels of copper (decreased by 30.7%, $P < 0.05$), selenium (decreased by 28.8%, $P < 0.05$), and zinc (decreased by 26.4%, $P < 0.05$) compared to calves in Group II. The concentrations of other trace elements in the hair did not differ significantly between the groups. These findings indicate that fetal development in calves during the last trimester of pregnancy occurs under conditions of an imbalance of essential and toxic trace elements. The mercury/selenium ratio in the hair of Group I calves

was increased by 45.3 times ($P < 0.05$) compared to Group II calves, while the lead/selenium ratio was 2.81 times higher ($P < 0.05$), the cadmium/selenium ratio was 6.63 times higher ($P < 0.05$), the nickel/zinc ratio was 2.91 times higher ($P < 0.05$), and the iron/copper ratio was 2.64 times higher ($P < 0.05$). In this study, we also examined the potential causes and mechanisms underlying these imbalances.

Keywords: Fetal growth restriction; Cattle; Hair analysis; Trace elements

For citation. Safonov, V.A., Ermilova, T.S. & Chernitskiy, A.E. (2025). Fetal growth restriction in cows is associated with intrauterine diselementosis. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 208-232. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1177>

Научная статья

ЗАДЕРЖКА РОСТА ПЛОДА У КОРОВ АССОЦИИРОВАНА С ВНУТРИУТРОБНЫМ ДИСЭЛЕМЕНТОЗОМ

В.А. Сафонов, Т.С. Ермилова, А.Е. Черницкий

Аннотация

Задержка роста плода (ЗРП) у коров широко распространена в высокопродуктивных молочных стадах и представляет серьезную проблему для животноводства. Одним из факторов, предрасполагающих к ЗРП, является дефицит эссенциальных микроэлементов и нарушения транспортной функции плаценты у беременных. В настоящей работе проведен сравнительный анализ содержания 12 микроэлементов и их соотношения в волосах у новорожденных телят с ЗРП в анамнезе (Группа I, $n = 18$) и особей с физиологическим течением беременности у их матерей (Группа II, $n = 24$). ЗРП диагностировали по результатам ультразвукового исследования матерей на 38-45, 60-65 и 110-115 дни гестации с помощью сканера «Easi-Scan-3» с линейным датчиком 4,5-8,5 МГц (BCF Technology Ltd., Великобритания) по ранее разработанному и опубликованному протоколу. Образцы волос у телят получали из кисти хвоста непосредственно перед 1-м кормлением молозивом. Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Nexion 300D, Perkin Elmer, США) в образцах волос исследовали содержание мышьяка, кадмия, кобальта, меди, железа, ртути, марганца, молибдена, никеля, свинца, селена и цинка. Для оценки внутриутробного дисэлементоза по измеренному содержанию микроэлементов в волосах рассчитывали их соотношения: мышьяк/селен, ртуть/селен,

свинец/селен, свинец/цинк, кадмий/селен, никель/цинк и железо/медь. У телят Группы I установлено повышенное содержание в волосах кадмия (на 66,7%, $P < 0,05$) и ртути (в 15,0 раз, $P < 0,05$) и пониженное – меди (на 30,7%, $P < 0,05$), селена (на 28,8%, $P < 0,05$) и цинка (на 26,4%, $P < 0,05$) по сравнению с животными Группы II. Содержание в крови других исследованных микроэлементов в волосах достоверно не различалось между группами. Результаты исследования показывают, что развитие плода у ЗРП-коров в последнем триместре беременности происходит в условиях дисбаланса эссенциальных и токсичных микроэлементов. Так, соотношение ртуть/селен в волосах у телят Группы I по сравнению с новорожденными Группы II было повышено в 45,3 раза ($P < 0,05$), свинец/селен – в 2,81 раза ($P < 0,05$), кадмий/селен – в 6,63 раза ($P < 0,05$), никель/цинк – в 2,91 раза ($P < 0,05$), железо/медь – в 2,64 раза ($P < 0,05$). Анализируются возможные причины и механизмы, лежащие в основе этих нарушений.

Ключевые слова: задержка роста плода; крупный рогатый скот; анализ волос; микроэлементы

Для цитирования. Сафонов, В.А., Ермилова, Т.С. & Черницкий, А.Е. (2025). Задержка роста плода у коров ассоциирована с внутриутробным дисэлементозом. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 208-232. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1177>

Introduction

Fetal growth restriction (FGR), formerly called intrauterine growth retardation [18; 58], is a disorder in which the embryo/fetus does not achieve its full development potential during gestation [1; 12; 18; 32]. This pathology is common among dairy cattle, affecting approximately one in four to even one in two pregnant cows [1; 42; 58]. The cause of its occurrence is placental insufficiency, which occurs when the mother is exposed to negative factors during the formation of the placenta or other factors that cause nutritional deficiency in the fetus [9; 42; 48; 55]. The main symptom of FGR during intrauterine diagnosis is the small size and disproportionate growth of fetal organs that occur under nutrient deficiency [1; 18; 43; 58]. In this case, the metabolism of the fetus is rearranged in such a way as to ensure the development of the brain to the detriment of other organs and tissues such as muscles, liver, and kidneys [11; 21; 33; 58].

Several factors influence the complex polycasual interaction between the fetus and the placenta, ultimately resulting in the development of FGR [42, 58]. These include endogenous (e.g., genetic abnormalities, endocrine and immune diseases) and exogenous (e.g., environmental stressors such as heat, bacterial and viral in-

fections, intoxication, unbalanced or inadequate nutrition) factors [13; 25; 26; 42]. Recent research indicates that impaired mineral nutrition may be one of the most common causes of FGR in highly productive cows [13; 52; 53; 56], particularly in natural and man-made biogeochemical provinces [27; 49; 46; 51]. Selenium, copper, zinc, and cobalt are essential minerals for the normal development of the embryo and fetus in cattle [9; 24; 35; 45]. In the “mother–placenta–fetus” system, these minerals play crucial roles [8; 28; 30; 41]. Selenium has antioxidant and immunomodulatory functions, promotes detoxification of the body, influences the metabolism of zinc and iodine, and participates in the metabolism of vitamins [16; 20; 36; 51]. It promotes the oxidation of substances with the formation of oxides and peroxides, followed by the binding and excretion of active metabolites, protecting the body from excess cadmium, lead, and thallium [3; 7; 23; 36]. Selenium participates in various metabolic processes, is part of glutathione peroxidase, and influences the metabolism of thyroid hormones and sulfur-containing amino acids [36; 41; 44; 51]. Selenium deficiency in animals lowers immunity, results in the accumulation of degenerative changes in muscle tissue, and causes metabolic disorders, affecting the metabolism of proteins, lipids, and minerals [35; 36; 41; 47]. Selenium deficiency can develop into toxic liver dystrophy, cows will show reproductive function disorders, and newborn calves will experience slowed growth and increased respiratory diseases [28; 29; 44; 51]. Copper is part of many vitamins, hormones, and enzymes; it affects the elasticity of blood vessels, skin, cartilage, and bones by participating in the synthesis of elastin and collagen; it is part of the myelin sheath of nerves; and it binds microbial toxins [7; 9; 11]. Copper exhibits antioxidant properties and is important in synthesizing hemoglobin and sex hormones [7; 11]. Copper deficiency leads to the suppression of the expression of metallothionein 1A and a decrease in the activity of superoxide dismutase and cytochrome-C oxidase [7; 9]. Copper deficiency negatively affects the functional state of the brain, lungs, heart, and fetal skeleton [9; 11; 34]. Furthermore, copper deficiency can manifest in a decrease in reproductive function, including ovarian dysfunction and embryonic mortality, the appearance of microcytic hypochromic anemia, and the development of distress syndrome in the first months of life [10; 24; 28; 40]. Symptoms of insufficient copper intake in an animal’s body can include weakness, bone fragility, lameness, joint enlargement and nodularity, thyroid gland enlargement, and increased respiratory diseases in neonatal calves [9; 11; 29; 49]. Zinc deficiency exacerbates these effects, affecting the work of ZIC genes necessary for the normal formation of the cerebellum, altering the distribution of natural killer cells-1 and connexin 43 in the myocardium, and reducing the activity of several antioxidant enzymes [7; 9;

11]. As a trace element associated with the metabolism of copper, molybdenum, cobalt, and iodine, zinc is part of enzymes, promotes cell division and differentiation, is part of proteins, and contributes to the formation of T-cell immunity [7; 9; 13]. Zinc deficiency manifests as a lack of appetite, diarrhea, weight loss, growth retardation, increased frequency of colds, hair loss, and dermatitis, and in adult animals, it leads to a disruption of sexual function [7; 13; 19; 40]. Cobalt is important for the body because it participates in enzymatic processes and affects hematopoiesis along with iron and copper; low levels of cobalt in the body lead to impaired cardiovascular function, anemia, delayed offspring development, distorted appetite, and deterioration in the quality of hair and skin [7; 14; 24; 33]. Cobalt deficiency negatively affects hematopoiesis, muscle protein and nucleic acid synthesis, and the state of energy metabolism [7], resulting in fetal development disorders [9; 49; 52]. On the other hand, there are reports of the negative impact on fetal development of increased concentrations of arsenic, iron, nickel, and lead [9; 27; 46; 54]. It is worth noting that when symptoms of deficiency of one or more trace elements appear, various combinations of characteristic signs are usually observed in one animal [3; 19; 49].

One method for retrospectively evaluating the trace element nutrition of the fetus in cows is through chemical elemental analysis of hair samples collected from calves shortly after birth [6; 50; 52]. This approach not only assesses the intake levels of individual trace elements through the placental barrier but also evaluates their ratios in the developing fetus [5; 6].

The *aim* of this study was to perform a comparative analysis of the concentrations of trace elements (arsenic, cadmium, cobalt, copper, iron, mercury, manganese, molybdenum, nickel, lead, selenium, and zinc) and their ratios in the hair of newborn calves with a history of FGR versus those with a normal pregnancy in their mothers.

Materials and methods

This study was performed in the Ikryaninsky District of the Astrakhan Oblast (Lower Volga Region, Russia). To identify FGR, clinical ultrasound examinations were performed on Simmental breed cows at 38–45, 60–65, and 110–115 days after fertilization using an Easi-Scan-3 ultrasound scanner (BCF Technology Ltd., UK) equipped with a 4.5–8.5 MHz linear sensor following a previously established and published protocol [1]. Based on the evaluation, 18 cows with delayed embryo/fetal growth (indicative of FGR) and 24 cows with a normal pregnancy (healthy cows) were included in the study. Samples of unpigmented hair were collected from the tail switch of the newborn calves

immediately before their first colostrum feeding using stainless steel scissors sterilized with ethanol [50].

All hair samples obtained after preparation [38] were sent for analysis to an accredited laboratory (Micronutrients LLC, Moscow, Russia), which is an associated company of the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The laboratory performed the quantitative determination of trace elements (arsenic, cadmium, cobalt, copper, iron, mercury, manganese, molybdenum, nickel, lead, selenium, and zinc) using inductively coupled plasma mass spectrometry with a Nexion 300D device (Perkin Elmer, USA). To evaluate intrauterine diselementosis, the ratios of trace elements in the hair were calculated: arsenic/selenium, mercury/selenium, lead/selenium, lead/zinc, cadmium/selenium, nickel/zinc, and iron/copper [5].

Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corporation, USA). The results were presented as median, interquartile range (IQR, Q1–Q3), and minimum (Min) and maximum (Max) values. The significance of differences between samples was assessed using the Mann–Whitney U test for independent samples.

Results

The results of the clinical ultrasound examination of the embryo/fetus in cows at 38–45, 60–65, and 110–115 days of gestation are shown in Table 1.

Table 1.

Morphometric parameters of embryos and fetuses in FGR cases compared to those in normal pregnancies in cows

Parameter	FGR cows (n = 18)		Healthy cows (n = 24)	
	Min–Max	Median	Min–Max	Median
38–45 gestation days				
Coccygeal–parietal size, mm	13–16	14.0	17–25	19.6
Body diameter, mm	6–9	7.6	10–13	10.8
60–65 days of gestation				
Coccygeal–parietal size, mm	26–47	39.3	52–78	68.4
Body diameter, mm	13–16	14.8	17–24	19.2
110–115 gestation days				
Uterine horn diameter, cm	10–16	13.9	18–25	19.4
Placental size, mm	11–18	14.3	19–34	26.2
Vibration intensity of the middle uterine artery, %	38–50	44.4	80–95	85.7

Table 1 shows that in cows with FGR, the morphometric characteristics of the embryo/fetus, including the uterine horn diameter, placental size, and vibration intensity of the middle uterine artery, were considerably reduced compared to values observed in healthy cows at the same gestational stage.

Table 2 shows the content of trace elements in hair samples from the tail switch of newborn calves.

Table 2.

Hair trace element content in newborn calves, µg/g

Trace element	FGR calves (n = 18)	Healthy calves (n = 24)	Physiological interval [50]
Arsenic	0.095 (0.052–0.175)	0.114 (0.089–0.222)	0.020–0.107
Cadmium	0.010* (0.010–0.020)	0.006 (0.001–0.010)	0.006–0.012
Cobalt	0.027 (0.010–0.066)	0.050 (0.030–0.074)	0.040–0.090
Copper	5.00* (3.00–7.35)	7.22 (6.00–8.20)	5.50–8.68
Iron	50.4 (35.3–97.5)	34.5 (25.4–57.9)	30.3–57.2
Mercury	0.030* (0.020–0.030)	0.002 (0.002–0.005)	0.020–0.030
Manganese	9.64 (8.56–12.2)	8.90 (7.03–12.4)	8.20–9.54
Molybdenum	0.037 (0.019–0.070)	0.021 (0.017–0.045)	0.017–0.067
Nickel	1.40 (0.455–3.29)	1.19 (0.390–1.97)	0.215–1.17
Lead	1.53 (1.20–2.78)	1.13 (0.525–1.38)	0.060–1.00
Selenium	0.289* (0.166–0.359)	0.406 (0.270–0.458)	0.180–0.400
Zinc	88.0* (34.0–121.7)	119.5 (94.0–126.9)	92.4–131.7

The data are presented as median and interquartile range (Q1–Q3).

* Differences with the group of healthy calves are significant at $P < 0.05$.

Compared to healthy newborns, FGR calves exhibited significantly higher levels of cadmium in their hair (increased by 66.7%, $P < 0.05$) and mercury (increased by 15.0 times, $P < 0.05$) along with lower levels of copper (decreased by 30.7%, $P < 0.05$), selenium (decreased by 28.8%, $P < 0.05$), and zinc (decreased by 26.4%, $P < 0.05$). The concentrations of other trace elements in the hair of newborns did not show significant differences between the groups.

Compared to the physiological range [50], 55.6% of FGR calves had reduced concentrations of cobalt in their hair, 61.1% had reduced copper, 22.2% had reduced selenium, and 55.6% had reduced zinc. Conversely, the levels of iron and manganese in the hair of FGR calves were elevated beyond the physiological range [50] in 38.9% and 50.0% of cases, respectively. In healthy newborn calves, reduced levels of cobalt, copper, selenium, and zinc in hair were observed 1.8–4.9 times less frequently. Both groups

of calves exhibited excessive accumulation of arsenic, nickel, and lead in the hair during the final months of intrauterine development, with these accumulations being more pronounced in FGR cases. The mercury content in the hair of healthy calves was reduced, whereas in FGR calves, it was at the upper limit of the physiological range [50]. Thus, FGR and healthy calves exhibited significantly different trace element concentrations in their hair (Table 3). Specifically, the mercury/selenium ratio in the hair of FGR calves was 45.3 times higher ($P < 0.05$), the lead/selenium ratio was 2.81 times higher ($P < 0.05$), the cadmium/selenium ratio was 6.63 times higher ($P < 0.05$), the nickel/zinc ratio was 2.91 times higher ($P < 0.05$), and the iron/copper ratio was 2.64 times higher ($P < 0.05$), compared to those in calves with normal intrauterine development.

Table 3.

Ratios of trace element concentrations in the hair of newborn calves

Ratio	FGR calves (n = 18)	Healthy calves (n = 24)
Arsenic/selenium	0.235 (0.154–0.657)	0.306 (0.192–0.541)
Mercury/selenium	0.136* (0.098–0.182)	0.003 (0.002–0.006)
Lead/selenium	2.78* (2.14–5.00)	0.99 (0.83–1.46)
Lead/zinc	0.061 (0.029–0.112)	0.028 (0.011–0.059)
Cadmium/selenium	0.053* (0.046–0.080)	0.008 (0.001–0.017)
Nickel/zinc	0.032* (0.013–0.046)	0.011 (0.007–0.019)
Iron/copper	12.3* (7.74–18.0)	4.67 (3.10–11.5)

The data are presented as median and interquartile range (Q1–Q3).

* Differences with the group of healthy calves are significant at $P < 0.05$.

Discussion

The Lower Volga Region is a natural biogeochemical province characterized by low levels of selenium, copper, and cobalt in soils and pasture plants [2; 4; 57]. This poses a specific challenge for local cattle breeding because animals in this region receive these essential trace elements in lower concentrations compared to cattle in areas with more adequate soil levels [2; 17; 19]. Despite seasonal variations in trace element concentrations, the amounts available do not fully meet the animals' needs [2; 57], leading to a disruption in elemental homeostasis, a condition referred to in modern literature as “diselementosis” [29; 53]. Previous studies [2] have identified reduced concentrations of selenium and cobalt in lactating Simmental cows bred in the biogeochemical conditions of the Lower Volga Region despite adequate copper supply.

In this study, we evaluated the trace element supply to the fetus during the last trimester of pregnancy in Simmental cows from the Astrakhan region. One method for assessing fetal trace element nutrition is analyzing the elemental composition of tail switch hair collected from calves shortly after birth [6; 50; 52]. This analysis provides a retrospective view of not only the levels of specific trace elements transferred through the placental barrier but also their ratios in the developing fetus during the final trimester of pregnancy [6; 50]. Of the 42 calves examined, 18 (42.9%) had reduced levels of cobalt compared to the previously established physiological range [50], 14 (33.3%) had reduced levels of copper, 7 (16.6%) had reduced levels of selenium, and 15 (35.7%) had reduced levels of zinc. Concurrently, an increased content of arsenic, nickel, iron, and manganese was observed in the hair of most newborns (Table 2).

It is generally accepted that the intrauterine supply of trace elements crucial for the normal formation and development of the fetus in cattle is entirely dependent on the maternal intake and availability of these elements [6; 8; 34; 53]. Our data indicate that when pregnant cows have low levels of cobalt, copper, and selenium, their fetuses also suffer from deficiencies in these trace elements. Furthermore, inadequate maternal intake of these essential elements can result in the fetus accumulating excessive amounts of potentially toxic elements [3; 6; 9; 15]. Selenium is known as an antagonist of mercury and arsenic, and it helps protect the body from the excessive accumulation of lead and cadmium [7]. When zinc levels are low, the body tends to accumulate higher levels of cadmium, lead, and nickel [3; 7; 39]. Additionally, a deficiency in vitamin C, which is frequently observed in cows in the Lower Volga Region [57], can exacerbate the accumulation of nickel in the body [7].

It is well-established that inadequate micronutrient nutrition during critical fetal development periods adversely affects the formation of muscle and adipose tissue, endocrine regulation, and postnatal survival [9; 11; 21; 22; 41].

In this study, we assessed the morphometric characteristics of the embryo/fetus and placenta in experimental cows using an ultrasound scanner at 38–45, 60–65, and 110–115 days of pregnancy (Table 1). FGR was diagnosed in 18 out of 42 (42.9%) animals. Our findings indicate that the concentrations of essential and toxic elements in the hair of FGR calves significantly differ from those in calves without this condition (Table 2). Specifically, FGR calves showed a significant increase in cadmium and mercury levels in their hair, along with a tendency for excessive accumulation of iron, lead, and nickel, while also exhibiting deficiencies in copper, selenium, and zinc.

A previous study on red-mottled calves in the Chernozem Region (Voronezh Oblast, Russia), where trace element levels in soils and pasture plants are considered optimal [52], found that FGR calves had lower concentrations of cobalt, copper, manganese, selenium, and zinc in their hair compared to newborn calves with normal physiological development. In our study, statistically significant differences were observed between calf groups in the levels of copper, selenium, zinc, cadmium, and mercury but not in cobalt and manganese (Table 2). This could be attributed to the specific biogeochemical conditions of the Lower Volga Region and the unique trace element exchange dynamics in the “mother–placenta–fetus” system of Simmental cattle. Comparison with the physiological reference values [50] revealed that 55.6% of FGR calves had low cobalt levels in their hair, 61.1% had low copper, 22.2% had low selenium, and 55.6% had low zinc. In cases of normal fetal development, deficiencies of these trace elements were observed 1.8–4.9 times less frequently.

The results indicate that fetal development in FGR cows during the last trimester of pregnancy occurs amidst an imbalance of essential and toxic trace elements. Intrauterine diselementosis in FGR calves is confirmed by significant changes in the ratios of trace elements in their hair (Table 3). Specifically, the mercury/selenium ratio in the hair of FGR newborn calves was 45.3 times higher ($P < 0.05$), the lead/selenium ratio was 2.81 times higher ($P < 0.05$), the cadmium/selenium ratio was 6.63 times higher ($P < 0.05$), the nickel/zinc ratio was 2.91 times higher ($P < 0.05$), and the iron/copper ratio was 2.64 times higher ($P < 0.05$) compared to those in calves with normal intrauterine development.

Our data reveal considerable disruptions in trace element metabolism in FGR calves during the final months of intrauterine development. It is likely that inadequate levels of essential trace elements, coupled with endocrine and metabolic disorders associated with FGR [31; 37; 43], create conditions where the fetus cannot fully neutralize the increased intake of heavy metals from the mother’s blood. This observed imbalance between essential and toxic trace elements negatively impacts the formation of muscle and adipose tissue, metabolism, endocrine regulation, and hematopoiesis in the fetal body [9; 11; 22; 41].

In FGR calves, common postnatal symptoms include anemia, hypoinmunoglobulinemia, dyslipidemia, hypoglycemia, lactic acidosis, and deficiencies in the antioxidant system, all stemming from intrauterine diselementosis [29; 37; 52; 58]. Our findings highlight severe disruptions in trace element metabolism in FGR calves during the final months of intrauterine development. Future studies should investigate the underlying causes and potential mechanisms of these disruptions.

Conclusion

The trace element profile of hair in FGR calves from the Lower Volga Region distinctly differs from that of newborn calves with normal physiological development. The findings suggest that an intrauterine imbalance of essential and toxic trace elements—such as deficiencies in copper, selenium, and zinc, along with excess levels of mercury, lead, cadmium, and nickel—may play a role in the development of FGR in cattle.

Ethics approval. The study adhered to all relevant international and national guidelines for animal care and use. The experimental design, including housing, feeding conditions, and all animal procedures (clinical assessments, ultrasound, and hair sampling for analysis), was approved by the Bioethics Commission of the All-Russian Scientific Research Veterinary Institute of Pathology, Pharmacology, and Therapy in Voronezh, Russia (Protocol No. 2-03/23 dated March 1, 2023).

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Sponsorship information. The research was performed with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-26-00136).

References

1. Butko, V. A., Lozovaya, E. G., & Mikhalev, V. I. (2020). Clinical and echographic markers for diagnosing early embryogenesis disorders in cows. *Veterinary Pharmacological Bulletin*, 2(11), 177-190. <https://doi.org/10.17238/issn2541-8203.2020.2.177> EDN: <https://elibrary.ru/pxusjv>
2. Vorobyev, V. I., & Vorobyev, D. V. (2014). Physiological aspects of mineral metabolism in Simmental cows bred under environmental conditions of low Se, I, and Co levels in the environment and feed of the Lower Volga region. *Fundamental Research*, 8-4, 864-870. EDN: <https://elibrary.ru/sjmnij>
3. Gurkina, L. V., Naumova, I. K., & Lebedeva, M. B. (2016). Mutual action of biogenic trace elements and heavy metals in animal organisms. *Agricultural Bulletin of the Upper Volga Region*, 1, 32-37. EDN: <https://elibrary.ru/tpzsjj>
4. Kovalsky, V. V. (1974). *Geochemical ecology*. Moscow: Nauka, 300 p.
5. Miroshnikov, S. A., Zavyalov, O. A., Frolov, A. N., Kharlamov, A. V., Duskaev, G. K., & Kurilkina, M. Ya. (2016). Elemental composition of wool as a model for studying interelement interactions. *Beef Cattle Breeding Bulletin*, 4(96), 9-14. EDN: <https://elibrary.ru/xilxpt>

6. Safonov, V. A., Ermilova, T. S., Chernitsky, A. E., & Salimzade, E. A. O. (2024). Predicting the level of trace element nutrition in fetuses of deeply pregnant cows. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3). <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-860> EDN: <https://elibrary.ru/hxxvkl>
7. Skalny, A. V., & Rudakov, I. A. (2004). *Bioelements in medicine*. Moscow: Mir, 272 p. ISBN: 5-03-003645-8 EDN: <https://elibrary.ru/wqrzft>
8. Abdelrahman, M.M. & Kincaid, R.L. (1993). Deposition of copper, manganese, zinc, and selenium in bovine fetal tissue at different stages of gestation. *Journal of Dairy Science*, 76(11), 3588-3593. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(93\)77698-5](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(93)77698-5)
9. Anas, M., Diniz, W.J.S., Menezes, A.C.B., Reynolds, L.P., Caton, J.S., Dahlen, C.R. & Ward, A.K. (2023). Maternal mineral nutrition regulates fetal genomic programming in cattle: a review. *Metabolites*, 13(5), 593. <https://doi.org/10.3390/metabo13050593> EDN: <https://elibrary.ru/cnnbmg>
10. Azzam, S.M., Kinder, J.E., Nielsen, M.K., Werth, L.A., Gregory, K.E., Cundiff, L.V. & Koch, R.M. (1993). Environmental effects on neonatal mortality of beef calves. *Journal of Animal Science*, 71(2), 282-290. <https://doi.org/10.2527/1993.712282x>
11. Menezes, A.C.B., McCarthy, K.L., Kassetas, C.J., Baumgaertner, F., Kirsch, J.D., Dorsam, S.T., Neville, T.L., Ward, A.K., Borowicz, P.P., Reynolds, L.P., Sedivec, K.K., Forcherio, J.C., Scott, R. & Caton, J.S. (2022). Vitamin and mineral supplementation and rate of gain in beef heifers I: Effects on dam hormonal and metabolic status, fetal tissue and organ mass, and concentration of glucose and fructose in fetal fluids at d 83 of gestation. *Animals*, 12(14), 1757. <https://doi.org/10.3390/ani12141757> EDN: <https://elibrary.ru/owyxrp>
12. Buczinski, S.M., Fecteau, G., Lefebvre, R.C. & Smith, L.C. (2007). Fetal well-being assessment in bovine near-term gestations: Current knowledge and future perspectives arising from comparative medicine. *The Canadian Veterinary Journal*, 48(2), 178-183.
13. Chen, Y.H., Zhao, M., Chen, X., Zhang, Y., Wang, H., Huang, Y.Y., Wang, Z., Zhang, Z.H., Zhang, C. & Xu, D.X. (2012). Zinc supplementation during pregnancy protects against lipopolysaccharide-induced fetal growth restriction and demise through its anti-inflammatory effect. *The Journal of Immunology*, 183(1), 454-463. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1103579>
14. Chernitskiy, A. & Safonov, V. (2019). The effects of the vitamin-mineral drug “Antimiopatik” use in cows during the dry period on postnatal growth and health of the offspring. *Reproduction in Domestic Animals*, 54(S3), 131-132. <https://doi.org/10.1111/rda.13528> EDN: <https://elibrary.ru/scexqz>

15. Cygan-Szczegielniak, D., Stanek, M., Giernatowska, E. & Janicki, B. (2014). Impact of breeding region and season on the content of some trace elements and heavy metals in the hair of cows. *Folia Biologica*, 62(3), 163-169. https://doi.org/10.3409/FB62_3.163
16. Dahlen, C.R., Reynolds, L.P. & Caton, J.S. (2022). Selenium supplementation and pregnancy outcomes. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1011850. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1011850> EDN: <https://elibrary.ru/jacotg>
17. Eby, G.N. (2016). *Principles of Environmental Geochemistry*. Long Grove: Waveland Press, 514 p.
18. Fitzgerald, A.M., Ryan, D.P. & Berry, D.P. (2015). Factors associated with the differential in actual gestational age and gestational age predicted from transrectal ultrasonography in pregnant dairy cows. *Theriogenology*, 84(3), 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.03.023>
19. Georgievskii, V.I., Annenkov, B.N. & Samokhin, V.T. (1982). *Mineral Nutrition of Animals*. London: Butterworths, 475 p. ISBN: 0-408-10770-7 EDN: <https://elibrary.ru/rtxvft>
20. Goff, J.P. (2018). Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid-base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 2763-2813. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13112> EDN: <https://elibrary.ru/vemohd>
21. Greenwood, P.L. & Bell, A.W. (2019). Developmental programming and growth of livestock tissues for meat production. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(2), 303-319. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.02.008>
22. Greenwood, P.L. & Café, L.M. (2007). Prenatal and pre-weaning growth and nutrition of cattle: long-term consequences for beef production. *Animal*, 1(9), 1283-1296. <https://doi.org/10.1017/S175173110700050X>
23. Grzeszczak, K., Kwiatkowski, S. & Kosik-Bogacka, D. (2020). The role of Fe, Zn, and Cu in pregnancy. *Biomolecules*, 10(8), 1176. <https://doi.org/10.3390/biom10081176> EDN: <https://elibrary.ru/igeamy>
24. Harvey, K.M., Cooke, R.F., Colombo, E.A., Rett, B., de Sousa, O.A., Harvey, L.M., Russell, J.R., Pohler, K.G. & Brandão, A.P. (2021). Supplementing organic-complexed or inorganic Co, Cu, Mn, and Zn to beef cows during gestation: physiological and productive response of cows and their offspring until weaning. *Journal of Animal Science*, 99(5), skab095. <https://doi.org/10.1093/jas/skab095> EDN: <https://elibrary.ru/atclci>
25. Hicks, Z.M. & Yates, D.T. (2021). Going up inflame: Reviewing the under-explored role of inflammatory programming in stress-induced intrauterine

- growth restricted livestock. *Frontiers in Animal Science*, 2, 761421. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.761421> EDN: <https://elibrary.ru/tgidow>
26. Hracsko, Z., Orvos, H., Novak, Z., Pal, A. & Varga, I.S. (2008). Evaluation of oxidative stress markers in neonates with intra-uterine growth retardation. *Redox Report*, 13(1), 11-16. <https://doi.org/10.1179/135100008X259097>
27. Issah, I., Duah, M.S., Arko-Mensah, J., Bawua, S.A., Agyekum, T.P. & Fobil, J.N. (2024). Exposure to metal mixtures and adverse pregnancy and birth outcomes: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 908, 168380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168380>
28. Joksimović-Todorović, M., Davidović, V. & Bojanić-Rašović, M. (2016). The effects of some microelements supplementation: Selenium, zinc and copper into dairy cows feeds on their health and reproductive performances. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 32(2), 101-110. <https://doi.org/10.2298/BAH1602101J>
29. Kalaeva, E., Kalaev, V., Chernitskiy, A., Alhamed, M. & Safonov, V. (2020). Incidence risk of bronchopneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis. *Veterinary World*, 13(5), 987-995. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.987-995> EDN: <https://elibrary.ru/vnsrtq>
30. Lewicka, I., Kocyłowski, R., Grzesiak, M., Gaj, Z., Oszukowski, P. & Suliburska, J. (2017). Selected trace elements concentrations in pregnancy and their possible role - Literature review. *Ginekologia Polska*, 88(9), 509-514. <https://doi.org/10.5603/gp.a2017.0093>
31. Loneragan, P., Forde, N. & Spencer, T. (2016). Role of progesterone in embryo development in cattle. *Reproduction, Fertility and Development*, 28(1-2), 66-74. <https://doi.org/10.1071/rd15326>
32. Mao, W.H., Albrecht, E., Teuscher, F., Yang, Q., Zhao, R.Q. & Wegner, J. (2008). Growth and breed-related changes of fetal development in cattle. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 21(5), 640-647. <https://doi.org/10.5713/ajas.2008.70293>
33. Marques, R.S., Cooke, R.F., Rodrigues, M.C., Cappellozza, B.I., Mills, R.R., Larson, C.K., Moriel, P. & Bohnert, D.W. (2016). Effects of organic or inorganic cobalt, copper, manganese, and zinc supplementation to late-gestating beef cows on productive and physiological responses of the offspring. *Journal of Animal Science*, 94(3), 1215-1226. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-0036>
34. McCarthy, K.L., Menezes, A.C., Kassetas, C.J., Baumgaertner, F., Kirsch, J.D., Dorsam, S.T., Neville, T.L., Ward, A.K., Borowicz, P.P., Reynolds, L.P., Sedivec, K.K., Forcherio, J.C., Scott, R., Caton, J.S. & Dahlen, C.R. (2022). Vitamin and mineral supplementation and rate of gain in beef heifers II: effects on concentration of trace minerals in maternal liver and fetal liver, muscle, allantoic,

- and amniotic fluids at day 83 of gestation. *Animals*, 12(15), 1925. <https://doi.org/10.3390/ani12151925> EDN: <https://elibrary.ru/jwjlpce>
35. McKeating, D.R., Fisher, J.J. & Perkins, A.V. (2019). Elemental metabolomics and pregnancy outcomes. *Nutrients*, 11(1), 73. <https://doi.org/10.3390/nu11010073> EDN: <https://elibrary.ru/chgslm>
36. Mehdi, Y. & Dufrasne, I. (2016). Selenium in cattle: a review. *Molecules*, 21(4), 545. <https://doi.org/10.3390/molecules21040545> EDN: <https://elibrary.ru/wuigrb>
37. Mikhalev, V., Shabunin, S., Safonov, V. & Chernitskiy, A. (2018). Metabolic status of newborn calves with intrauterine growth retardation. *Reproduction in Domestic Animals*, 53(S2), 168-168. <https://doi.org/10.1111/rda.13272> EDN: <https://elibrary.ru/uyvpyp>
38. Miroshnikov, S.A., Zavyalov, O.A., Frolov, A.N., Bolodurina, I.P., Kalashnikov, V.V., Grabeklis, A.R., Tinkov, A.A. & Skalny, A.V. (2017). The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos taurus*). *Biological Trace Element Research*, 180(1), 56-62. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0991-5> EDN: <https://elibrary.ru/xnceki>
39. Miroshnikov, S., Zavyalov, O., Frolov, A., Sleptsov, I., Sirazetdinov, F. & Poberukhin, M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(18), 18554-18564. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05163-5> EDN: <https://elibrary.ru/itdenp>
40. Mion, B., Madureira, G., Spricigo, J.F.W., King, K., Van Winters, B., LaMarre, J., LeBlanc, S.J., Steele, M.A. & Ribeiro, E.S. (2023). Effects of source of supplementary trace minerals in pre- and postpartum diets on reproductive biology and performance in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 106(7), 5074-5095. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22784> EDN: <https://elibrary.ru/irlmkn>
41. Neve, J. (1992). Clinical implications of trace elements in endocrinology. *Biological Trace Element Research*, 32(1), 173-185. <https://doi.org/10.1007/BF02784602> EDN: <https://elibrary.ru/rxzwum>
42. Nezhdanov, A., Shabunin, S., Mikhalev, V., Klimov, N. & Chernitskiy, A. (2014). Endocrine and metabolic mechanisms of embryo and fetal intrauterine growth retardation in dairy cows. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 38(6), 675-680. <https://doi.org/10.3906/vet-1405-12> EDN: <https://elibrary.ru/ssgdbn>
43. Nezhdanov, A.G., Mikhalev, V.I., Chusova, G.G., Papin, N.E., Chernitskiy, A.E. & Lozovaya, E.G. (2016). Metabolic status of the cows under intrauterine growth retardation of embryo and fetus. *Agricultural Biology*, 51(2), 230-237. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.2.230eng> EDN: <https://elibrary.ru/vvhkih>

44. Ojeda, M.L., Nogales, F., Romero-Herrera, I. & Carreras, O. (2021). Fetal programming is deeply related to maternal selenium status and oxidative balance; experimental offspring health repercussions. *Nutrients*, 13(6), 2085. <https://doi.org/10.3390/nu13062085> EDN: <https://elibrary.ru/htkrwl>
45. Omur, A., Kirbas, A., Aksu, E., Kandemir, F., Dorman, E., Kaynar, O. & Ucar, O. (2016). Effects of antioxidant vitamins (A, D, E) and trace elements (Cu, Mn, Se, Zn) on some metabolic and reproductive profiles in dairy cows during transition period. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 19(4), 697-706. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0088> EDN: <https://elibrary.ru/yxuqqp>
46. Patra, R.C., Swarup, D., Sharma, M.C. & Naresh, R. (2006). Trace mineral profile in blood and hair from cattle environmentally exposed to lead and cadmium around different industrial units. *Journal of Veterinary Medicine. A, Physiology, Pathology, Clinical Medicine*, 53(10), 511-517. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.2006.00868.x>
47. Plemyashov, K. & Korochkina, E. (2022). Monitoring of vitamin-mineral metabolism' indicators in cows of different period of lactation. *FASEB Journal*, 36(S1), R3113. <https://doi.org/10.1096/fasebj.2022.36.S1.R3113> EDN: <https://elibrary.ru/vhdzqa>
48. Reynolds, L.P., Borowicz, P.P., Caton, J.S., Crouse, M.S., Dahlen, C.R. & Ward, A.K. (2019). Developmental programming of fetal growth and development. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(2), 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.02.006>
49. Safonov, V. & Chernitskiy, A. (2022). Trace elements deficiency in dairy cows in the biogeochemical province of the Republic of Belarus and biological effects of its correction. In: *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences* [H. Chenchouni, H. I. Chaminé, M. F. Khan, et al. (Eds.)]. CAJG 2019. Advances in Science, Technology & Innovation. Cham: Springer, pp. 185-187. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72543-3_41 EDN: <https://elibrary.ru/aaaagpd>
50. Safonov, V., Salimzade, E., Ermilova, T. & Chernitskiy, A. (2022). Retrospective diagnosis of intrauterine diselementosis in newborn calves. *BIO Web of Conferences*, 52, 00033. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200033> EDN: <https://elibrary.ru/wpdjbv>
51. Safonov, V.A. (2018). Biological role of selenium and correction effects of its content in the organism of animals. *Geochemistry International*, 56(10), 1046-1050. <https://doi.org/10.1134/s0016702918100105> EDN: <https://elibrary.ru/yswlbv>
52. Safonov, V.A., Mikhalev, V.I. & Chernitskiy, A.E. (2018). Antioxidant status and functional condition of respiratory system of newborn calves with intra-

- uterine growth retardation. *Agricultural Biology*, 53(4), 831-841. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.831> EDN: <https://elibrary.ru/uzbltk>
53. Shabunin, S., Nezhdanov, A., Mikhalev, V., Lozovaya, E. & Chernitskiy, A. (2017). Diselementosis as a risk factor of embryo loss in lactating cows. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 41(4), 453-459. <https://doi.org/10.3906/vet-1609-76> EDN: <https://elibrary.ru/zcymlp>
54. Suttle, N.F. (2022). *Mineral Nutrition of Livestock*. 5th ed. Boston: CABI, 600 p. <https://doi.org/10.1079/9781789240924.0000>
55. Van Eetvelde, M., Kamal, M.M., Hostens, M., Vandaele, L., Fiems, L.O. & Opsomer, G. (2016). Evidence for placental compensation in cattle. *Animal*, 10(8), 1342-1350. <https://doi.org/10.1017/S1751731116000318>
56. Van Emon, M., Sanford, C. & McCoski, S. (2020). Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health. *Animals*, 10(12), 2404. <https://doi.org/10.3390/ani10122404> EDN: <https://elibrary.ru/ylxmrs>
57. Vorobyov, V., Vorobyov, D., Polkovnichenko, A. & Safonov, V. (2018). The physiological status of acclimatized Simmental cattle of the Austrian selection in the biogeochemical conditions of the Lower Volga Region. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 6(6), 198-207. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20180606.17>
58. Wu, G., Bazer, F.W., Wallace, J.M. & Spencer, T.E. (2006). Board-invited review: intrauterine growth retardation: implications for the animal sciences. *Journal of Animal Science*, 84(9), 2316-2337. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-156>

Список литературы

1. Бутко, В.А., Лозовая, Е.Г. & Михалев, В.И. (2020). Клинико-эхографические маркеры диагностики нарушений раннего эмбриогенеза у коров. *Ветеринарный фармакологический вестник*, 2(11), 177-190. <https://doi.org/10.17238/issn2541-8203.2020.2.177> EDN: <https://elibrary.ru/pxusjv>
2. Воробьев, В.И. & Воробьев, Д.В. (2014). Физиологические аспекты минерального обмена у симментальских коров, разводимых в экологических условиях низкого уровня Se, I и Co в среде и кормах Нижней Волги. *Фундаментальные исследования*, 8-4, 864-870. EDN: <https://elibrary.ru/sjmnij>
3. Гуркина, Л.В., Наумова, И.К. & Лебедева, М.Б. (2016). Взаимное действие биогенных микроэлементов и элементов тяжелых металлов в организме животных. *Аграрный вестник Верхневолжья*, 1, 32-37. EDN: <https://elibrary.ru/tpzsjj>
4. Ковальский, В.В. (1974). *Геохимическая экология*. Москва: Наука, 300 с.

5. Мирошников, С.А., Завьялов, О.А., Фролов, А.Н., Харламов, А.В., Дускаев, Г.К. & Курилкина, М.Я. (2016). Элементный состав шерсти как модель для изучения межэлементных взаимодействий. *Вестник мясного скотоводства*, 4(96), 9-14. EDN: <https://elibrary.ru/xilxpt>
6. Сафонов, В.А., Ермилова, Т.С., Черницкий, А.Е. & Салимзаде, Э.А.О. (2024). Прогнозирование уровня микроэлементного питания плода у глубококостельных коров. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3). <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-860> EDN: <https://elibrary.ru/hxxvllk>
7. Скальный, А.В. & Рудаков, И.А. (2004). *Биоэлементы в медицине*. Москва: Мир, 272 с. ISBN: 5-03-003645-8 EDN: <https://elibrary.ru/wqzrft>
8. Abdelrahman, M.M. & Kincaid, R.L. (1993). Deposition of copper, manganese, zinc, and selenium in bovine fetal tissue at different stages of gestation. *Journal of Dairy Science*, 76(11), 3588-3593. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(93\)77698-5](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(93)77698-5)
9. Anas, M., Diniz, W.J.S., Menezes, A.C.B., Reynolds, L.P., Caton, J.S., Dahlen, C.R. & Ward, A.K. (2023). Maternal mineral nutrition regulates fetal genomic programming in cattle: a review. *Metabolites*, 13(5), 593. <https://doi.org/10.3390/metabo13050593> EDN: <https://elibrary.ru/cnnbmg>
10. Azzam, S.M., Kinder, J.E., Nielsen, M.K., Werth, L.A., Gregory, K.E., Cundiff, L.V. & Koch, R.M. (1993). Environmental effects on neonatal mortality of beef calves. *Journal of Animal Science*, 71(2), 282-290. <https://doi.org/10.2527/1993.712282x>
11. Menezes, A.C.B., McCarthy, K.L., Kassetas, C.J., Baumgaertner, F., Kirsch, J.D., Dorsam, S.T., Neville, T.L., Ward, A.K., Borowicz, P.P., Reynolds, L.P., Sedivec, K.K., Forcherio, J.C., Scott, R. & Caton, J.S. (2022). Vitamin and mineral supplementation and rate of gain in beef heifers I: Effects on dam hormonal and metabolic status, fetal tissue and organ mass, and concentration of glucose and fructose in fetal fluids at d 83 of gestation. *Animals*, 12(14), 1757. <https://doi.org/10.3390/ani12141757> EDN: <https://elibrary.ru/owyxrp>
12. Buczinski, S.M., Fecteau, G., Lefebvre, R.C. & Smith, L.C. (2007). Fetal well-being assessment in bovine near-term gestations: Current knowledge and future perspectives arising from comparative medicine. *The Canadian Veterinary Journal*, 48(2), 178-183.
13. Chen, Y.H., Zhao, M., Chen, X., Zhang, Y., Wang, H., Huang, Y.Y., Wang, Z., Zhang, Z.H., Zhang, C. & Xu, D.X. (2012). Zinc supplementation during pregnancy protects against lipopolysaccharide-induced fetal growth restriction and demise through its anti-inflammatory effect. *The Journal of Immunology*, 183(1), 454-463. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1103579>

14. Chernitskiy, A. & Safonov, V. (2019). The effects of the vitamin-mineral drug “Antimiopatik” use in cows during the dry period on postnatal growth and health of the offspring. *Reproduction in Domestic Animals*, 54(S3), 131-132. <https://doi.org/10.1111/rda.13528> EDN: <https://elibrary.ru/scexqz>
15. Cygan-Szczegielniak, D., Stanek, M., Giernatowska, E. & Janicki, B. (2014). Impact of breeding region and season on the content of some trace elements and heavy metals in the hair of cows. *Folia Biologica*, 62(3), 163-169. https://doi.org/10.3409/FB62_3.163
16. Dahlen, C.R., Reynolds, L.P. & Caton, J.S. (2022). Selenium supplementation and pregnancy outcomes. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1011850. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1011850> EDN: <https://elibrary.ru/jacotg>
17. Eby, G.N. (2016). *Principles of Environmental Geochemistry*. Long Grove: Waveland Press, 514 p.
18. Fitzgerald, A.M., Ryan, D.P. & Berry, D.P. (2015). Factors associated with the differential in actual gestational age and gestational age predicted from transrectal ultrasonography in pregnant dairy cows. *Theriogenology*, 84(3), 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.03.023>
19. Georgievskii, V.I., Annenkov, B.N. & Samokhin, V.T. (1982). *Mineral Nutrition of Animals*. London: Butterworths, 475 p. ISBN: 0-408-10770-7 EDN: <https://elibrary.ru/rtxvft>
20. Goff, J.P. (2018). Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid-base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 2763-2813. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13112> EDN: <https://elibrary.ru/vemohd>
21. Greenwood, P.L. & Bell, A.W. (2019). Developmental programming and growth of livestock tissues for meat production. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(2), 303-319. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.02.008>
22. Greenwood, P.L. & Café, L.M. (2007). Prenatal and pre-weaning growth and nutrition of cattle: long-term consequences for beef production. *Animal*, 1(9), 1283-1296. <https://doi.org/10.1017/S175173110700050X>
23. Grzeszczak, K., Kwiatkowski, S. & Kosik-Bogacka, D. (2020). The role of Fe, Zn, and Cu in pregnancy. *Biomolecules*, 10(8), 1176. <https://doi.org/10.3390/biom10081176> EDN: <https://elibrary.ru/igeamy>
24. Harvey, K.M., Cooke, R.F., Colombo, E.A., Rett, B., de Sousa, O.A., Harvey, L.M., Russell, J.R., Pohler, K.G. & Brandão, A.P. (2021). Supplementing organic-complexed or inorganic Co, Cu, Mn, and Zn to beef cows during gestation: physiological and productive response of cows and their offspring until weaning.

- Journal of Animal Science*, 99(5), skab095. <https://doi.org/10.1093/jas/skab095> EDN: <https://elibrary.ru/atclci>
25. Hicks, Z.M. & Yates, D.T. (2021). Going up inflame: Reviewing the under-explored role of inflammatory programming in stress-induced intrauterine growth restricted livestock. *Frontiers in Animal Science*, 2, 761421. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.761421> EDN: <https://elibrary.ru/tgiodw>
 26. Hracsko, Z., Orvos, H., Novak, Z., Pal, A. & Varga, I.S. (2008). Evaluation of oxidative stress markers in neonates with intra-uterine growth retardation. *Redox Report*, 13(1), 11-16. <https://doi.org/10.1179/135100008X259097>
 27. Issah, I., Duah, M.S., Arko-Mensah, J., Bawua, S.A., Agyekum, T.P. & Fobil, J.N. (2024). Exposure to metal mixtures and adverse pregnancy and birth outcomes: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 908, 168380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168380>
 28. Joksimović-Todorović, M., Davidović, V. & Bojanić-Rašović, M. (2016). The effects of some microelements supplementation: Selenium, zinc and copper into dairy cows feeds on their health and reproductive performances. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 32(2), 101-110. <https://doi.org/10.2298/BAH1602101J>
 29. Kalaeva, E., Kalaev, V., Chernitskiy, A., Alhamed, M. & Safonov, V. (2020). Incidence risk of bronchopneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis. *Veterinary World*, 13(5), 987-995. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.987-995> EDN: <https://elibrary.ru/vnsrtq>
 30. Lewicka, I., Kocyłowski, R., Grzesiak, M., Gaj, Z., Oszukowski, P. & Suliburska, J. (2017). Selected trace elements concentrations in pregnancy and their possible role - Literature review. *Ginekologia Polska*, 88(9), 509-514. <https://doi.org/10.5603/gp.a2017.0093>
 31. Lonergan, P., Forde, N. & Spencer, T. (2016). Role of progesterone in embryo development in cattle. *Reproduction, Fertility and Development*, 28(1-2), 66-74. <https://doi.org/10.1071/rd15326>
 32. Mao, W.H., Albrecht, E., Teuscher, F., Yang, Q., Zhao, R.Q. & Wegner, J. (2008). Growth-and breed-related changes of fetal development in cattle. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 21(5), 640-647. <https://doi.org/10.5713/ajas.2008.70293>
 33. Marques, R.S., Cooke, R.F., Rodrigues, M.C., Cappellozza, B.I., Mills, R.R., Larson, C.K., Moriel, P. & Bohnert, D.W. (2016). Effects of organic or inorganic cobalt, copper, manganese, and zinc supplementation to late-gestating beef cows on productive and physiological responses of the offspring. *Journal of Animal Science*, 94(3), 1215-1226. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-0036>
 34. McCarthy, K.L., Menezes, A.C., Kassetas, C.J., Baumgaertner, F., Kirsch, J.D., Dorsam, S.T., Neville, T.L., Ward, A.K., Borowicz, P.P., Reynolds, L.P., Sedivec,

- K.K., Forcherio, J.C., Scott, R., Caton, J.S. & Dahlen, C.R. (2022). Vitamin and mineral supplementation and rate of gain in beef heifers II: effects on concentration of trace minerals in maternal liver and fetal liver, muscle, allantoic, and amniotic fluids at day 83 of gestation. *Animals*, 12(15), 1925. <https://doi.org/10.3390/ani12151925> EDN: <https://elibrary.ru/jwjlp>
35. McKeating, D.R., Fisher, J.J. & Perkins, A.V. (2019). Elemental metabolomics and pregnancy outcomes. *Nutrients*, 11(1), 73. <https://doi.org/10.3390/nu11010073> EDN: <https://elibrary.ru/chgslm>
36. Mehdi, Y. & Dufrasne, I. (2016). Selenium in cattle: a review. *Molecules*, 21(4), 545. <https://doi.org/10.3390/molecules21040545> EDN: <https://elibrary.ru/wui-grb>
37. Mikhalev, V., Shabunin, S., Safonov, V. & Chernitskiy, A. (2018). Metabolic status of newborn calves with intrauterine growth retardation. *Reproduction in Domestic Animals*, 53(S2), 168-168. <https://doi.org/10.1111/rda.13272> EDN: <https://elibrary.ru/uyvpyt>
38. Miroshnikov, S.A., Zavyalov, O.A., Frolov, A.N., Bolodurina, I.P., Kalashnikov, V.V., Grabeklis, A.R., Tinkov, A.A. & Skalny, A.V. (2017). The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos taurus*). *Biological Trace Element Research*, 180(1), 56-62. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0991-5> EDN: <https://elibrary.ru/xnceki>
39. Miroshnikov, S., Zavyalov, O., Frolov, A., Sleptsov, I., Sirazetdinov, F. & Poberukhin, M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(18), 18554-18564. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05163-5> EDN: <https://elibrary.ru/itdenp>
40. Mion, B., Madureira, G., Spricigo, J.F.W., King, K., Van Winters, B., LaMarre, J., LeBlanc, S.J., Steele, M.A. & Ribeiro, E.S. (2023). Effects of source of supplementary trace minerals in pre- and postpartum diets on reproductive biology and performance in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 106(7), 5074-5095. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22784> EDN: <https://elibrary.ru/irlmkn>
41. Neve, J. (1992). Clinical implications of trace elements in endocrinology. *Biological Trace Element Research*, 32(1), 173-185. <https://doi.org/10.1007/BF02784602> EDN: <https://elibrary.ru/rxzwum>
42. Nezhdanov, A., Shabunin, S., Mikhalev, V., Klimov, N. & Chernitskiy, A. (2014). Endocrine and metabolic mechanisms of embryo and fetal intrauterine growth retardation in dairy cows. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 38(6), 675-680. <https://doi.org/10.3906/vet-1405-12> EDN: <https://elibrary.ru/ssgdbn>

43. Nezhdanov, A.G., Mikhalev, V.I., Chusova, G.G., Papin, N.E., Chernitskiy, A.E. & Lozovaya, E.G. (2016). Metabolic status of the cows under intrauterine growth retardation of embryo and fetus. *Agricultural Biology*, 51(2), 230-237. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.2.230eng> EDN: <https://elibrary.ru/vvhkih>
44. Ojeda, M.L., Nogales, F., Romero-Herrera, I. & Carreras, O. (2021). Fetal programming is deeply related to maternal selenium status and oxidative balance; experimental offspring health repercussions. *Nutrients*, 13(6), 2085. <https://doi.org/10.3390/nu13062085> EDN: <https://elibrary.ru/htkrwl>
45. Omur, A., Kirbas, A., Aksu, E., Kandemir, F., Dorman, E., Kaynar, O. & Ucar, O. (2016). Effects of antioxidant vitamins (A, D, E) and trace elements (Cu, Mn, Se, Zn) on some metabolic and reproductive profiles in dairy cows during transition period. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 19(4), 697-706. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0088> EDN: <https://elibrary.ru/yxuqqp>
46. Patra, R.C., Swarup, D., Sharma, M.C. & Naresh, R. (2006). Trace mineral profile in blood and hair from cattle environmentally exposed to lead and cadmium around different industrial units. *Journal of Veterinary Medicine. A, Physiology, Pathology, Clinical Medicine*, 53(10), 511-517. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.2006.00868.x>
47. Plemyashov, K. & Korochkina, E. (2022). Monitoring of vitamin-mineral metabolism' indicators in cows of different period of lactation. *FASEB Journal*, 36(S1), R3113. <https://doi.org/10.1096/fasebj.2022.36.S1.R3113> EDN: <https://elibrary.ru/vhdzqa>
48. Reynolds, L.P., Borowicz, P.P., Caton, J.S., Crouse, M.S., Dahlen, C.R. & Ward, A.K. (2019). Developmental programming of fetal growth and development. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(2), 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.02.006>
49. Safonov, V. & Chernitskiy, A. (2022). Trace elements deficiency in dairy cows in the biogeochemical province of the Republic of Belarus and biological effects of its correction. In: *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences* [H. Chenchouni, H. I. Chaminé, M. F. Khan, et al. (Eds.)]. CAJG 2019. Advances in Science, Technology & Innovation. Cham: Springer, pp. 185-187. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72543-3_41 EDN: <https://elibrary.ru/aaaagpd>
50. Safonov, V., Salimzade, E., Ermilova, T. & Chernitskiy, A. (2022). Retrospective diagnosis of intrauterine diselementosis in newborn calves. *BIO Web of Conferences*, 52, 00033. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200033> EDN: <https://elibrary.ru/wpdjbv>

51. Safonov, V.A. (2018). Biological role of selenium and correction effects of its content in the organism of animals. *Geochemistry International*, 56(10), 1046-1050. <https://doi.org/10.1134/s0016702918100105> EDN: <https://elibrary.ru/yswlbbs>
52. Safonov, V.A., Mikhalev, V.I. & Chernitskiy, A.E. (2018). Antioxidant status and functional condition of respiratory system of newborn calves with intra-uterine growth retardation. *Agricultural Biology*, 53(4), 831-841. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.831eng> EDN: <https://elibrary.ru/uzbltk>
53. Shabunin, S., Nezhdanov, A., Mikhalev, V., Lozovaya, E. & Chernitskiy, A. (2017). Dilementosis as a risk factor of embryo loss in lactating cows. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 41(4), 453-459. <https://doi.org/10.3906/vet-1609-76> EDN: <https://elibrary.ru/zcymlp>
54. Suttle, N.F. (2022). *Mineral Nutrition of Livestock*. 5th ed. Boston: CABI, 600 p. <https://doi.org/10.1079/9781789240924.0000>
55. Van Eetvelde, M., Kamal, M.M., Hostens, M., Vandaele, L., Fiems, L.O. & Opsomer, G. (2016). Evidence for placental compensation in cattle. *Animal*, 10(8), 1342-1350. <https://doi.org/10.1017/S1751731116000318>
56. Van Emon, M., Sanford, C. & McCoski, S. (2020). Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health. *Animals*, 10(12), 2404. <https://doi.org/10.3390/ani10122404> EDN: <https://elibrary.ru/yxlmrs>
57. Vorobyov, V., Vorobyov, D., Polkovnichenko, A. & Safonov, V. (2018). The physiological status of acclimatized Simmental cattle of the Austrian selection in the biogeochemical conditions of the Lower Volga Region. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 6(6), 198-207. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20180606.17>
58. Wu, G., Bazer, F.W., Wallace, J.M. & Spencer, T.E. (2006). Board-invited review: intrauterine growth retardation: implications for the animal sciences. *Journal of Animal Science*, 84(9), 2316-2337. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-156>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Safonov, Leading Researcher of the Laboratory of Environmental Biogeochemistry, Doctor of Biological Sciences
Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences
19, Kosygin Str., Moscow, 119991, Russian Federation
safvus2003@mail.ru
SPIN-code: 5110-8671

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-6178>

ResearcherID: L-7174-2016

Scopus Author ID: 57198771314

Tatiana S. Ermilova, Researcher of the Laboratory of Environmental Biogeochemistry

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences

19, Kosygin str., Moscow, 119991, Russian Federation

tatianaermilov@yandex.ru

SPIN-code: 6712-6866

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8251-8545>

Scopus Author ID: 57956288700

Anton E. Chernitskiy, Leading Researcher of the Department of Reproductive Biology and Neonatology, Doctor of Biological Sciences

Ural Federal Agrarian Scientific Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

112a, Belinskogo str., Yekaterinburg, 620142, Russian Federation

cherae@mail.ru

SPIN-code: 3776-3502

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-687X>

ResearcherID: C-6746-2013

Scopus Author ID: 56410871400

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Сафонов Владимир Александрович, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды, доктор биологических наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

ул. Косыгина, 19, г. Москва, 119991, Российская Федерация

safrus2003@mail.ru

Ермилова Татьяна Сергеевна, научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

*ул. Косыгина, 19, г. Москва, 119991, Российская Федерация
tatianaermilov@yandex.ru*

Черницкий Антон Евгеньевич, ведущий научный сотрудник отдела репродуктивной биологии и неонатологии, доктор биологических наук

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

*ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620142, Российская Федерация
cherae@mail.ru*

Поступила 28.09.2024

После рецензирования 01.11.2024

Принята 29.11.2024

Received 28.09.2024

Revised 01.11.2024

Accepted 29.11.2024

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

SOIL FERTILITY AND PLANT PROTECTION

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1194

EDN: HDOBXE

УДК 632.952:633.11



Научная статья

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ
БИНАРНЫХ ТРИАЗОЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ
НА ПРОРОСТКАХ МЯГКОЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ**

***Н.Г. Власенко, С.С. Халиков, О.И. Теплякова,
М.С. Халиков, Н.Д. Чкаников***

Аннотация

Обоснование. Комплексная защита растений от болезней, вредителей и сорняков – важнейший элемент агротехнологии. Использование фунгицидов важно не только для повышения урожайности растений, но и для получения урожая высокого качества. Большинство химических средств защиты растений (ХСЗР) включают в себя в качестве действующих веществ (ДВ) молекулы органических соединений, которые плохо растворяются в воде, что предполагает разработку для них препаративных форм, позволяющих равномерно наносить ДВ на растения и эффективно их защищать от болезней и вредителей.

Материалы и методы. Для решения проблем резистентности предложена разработка многокомпонентных и полифункциональных протравителей зерновых культур методами механохимии. Получаемые по этой технологии композиции в виде твердых дисперсий обладали повышенной растворимостью и широким спектром биологической активности. В качестве объектов исследования были изучены производные триазола –тебуконазол и пропиконазол, полисахарид арабиногалактан и регуляторы роста растений.

Результаты. Полученные в работе экспериментальные композиции обладали сильным ретардантным действием на проростках мягкой яровой пшеницы сорта Новосибирская 31. Добавление известного стимулятора роста флороксана и биостимулятора в виде кремнезема не помогло снять этот ре-

тардантный эффект, хотя ранее было показано смягчающее действие флороксана при использовании композиций на основе тебуконазола.

Заключение. Использование методов механохимической модификации ряда производных триазола позволило получить композиции, которые заметно тормозили корнеобразование и укорачивали ростки, вызывали ненормальное прорастание зерновок, что в конечном итоге сказалось на всхожести, а также на накоплении биомассы ростков и проростков. Полученные результаты подтверждают перспективы разработок многокомпонентных препаратов методами механохимии для решения проблем резистентности, растворимости и расширения биологической активности.

Ключевые слова: тебуконазол; пропиконазол; механохимия; протравители; яровая пшеница; ретардантный эффект; биологическая эффективность

Для цитирования. Власенко, Н.Г., Халиков, С.С., Теплякова, О.И., Халиков, М.С. & Чкаников, Н.Д. (2025). Биологическая активность бинарных триазольных препаратов на проростках мягкой яровой пшеницы. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 233-252. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1194>

Original article

BIOLOGICAL ACTIVITY OF BINARY TRIAZOLE PREPARATIONS ON SOFT SPRING WHEAT

N.G. Vlasenko, S.S. Khalikov, O.I. Teplyakova,
M.S. Khalikov, N.D. Chkanikov

Abstract

Background. Integrated plant protection against diseases, pests and weeds is the most important element of agricultural technology. The use of fungicides is important not only to increase plant yields, but also to obtain high-quality crops. Most chemical plant protection products (CPPP) include molecules of organic compounds as active ingredients (AI), which are poorly soluble in water, which requires the development of formulations for them that allow for the uniform application of AI to plants and effectively protect them from diseases and pests.

Materials and methods. To solve the problems of resistance, it is proposed to develop multi-component and polyfunctional seed dressings for grain crops using mechanochemical methods. The compositions obtained using this technology in the form of solid dispersions had increased solubility and a wide range of biological

activity. The objects of study were triazole derivatives - tebuconazole and propiconazole, polysaccharide arabinogalactan and plant growth regulators.

Results. The experimental compositions obtained in the work had a strong retardant effect on sprouts of soft spring wheat of the Novosibirskaya 31 variety. The addition of the known growth stimulator fluroxan and a biostimulant in the form of silica did not help to remove this retardant effect, although the softening effect of fluroxan was previously shown when using compositions based on tebuconazole.

Conclusion. The use of mechanochemical modification methods for a number of triazole derivatives made it possible to obtain compositions that significantly inhibited root formation and shortened sprouts, caused abnormal germination of grains, which ultimately affected germination, as well as the accumulation of biomass in sprouts and seedlings. The obtained results confirm the prospects for the development of multicomponent drugs using mechanochemical methods to solve the problems of resistance, solubility and expansion of biological activity.

Keywords: tebuconazole; propiconazole; mechanochemistry; protectants; spring wheat; retardant effect; biological efficiency

For citation. Vlasenko, N.G., Khalikov, S.S., Teplyakova, O.I., Khalikov, M.S. & Chkanikov, N.D. (2025). Biological activity of binary triazole preparations on soft spring wheat. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 233-252. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1194>

Введение

К важным факторам, влияющим на уровень урожайности и качества зерна пшеницы, относятся технологии возделывания культуры и разработка эффективной системы защиты растений от болезней и вредителей [2]. Контроль фитосанитарной ситуации осуществляется путем применения фунгицидной защиты, что позволяет стабилизировать получение зерна пшеницы хорошего качества [8]. Для борьбы с почвенно-семенными инфекциями изучают возможности использования пестицидов с лучшим проникновением действующего вещества (ДВ) в растительные ткани, пониженных норм расхода, новых модификаций препаративных форм и комплексов с биологическими и химическими индукторами [10; 14; 18].

Как известно, однокомпонентные фунгициды эффективны против одного спектра болезней и в определённые фазы развития. Для решения вопросов комплексной защиты растений от различных болезней издавна применяют баковые смеси [6]. Однако использование баковых смесей предполагает необходимость проверки совместимости продуктов от разных производителей, а также выбора оптимального соотношения компонентов смеси, что вызывает

массу неудобств при работе в полевых условиях. Поэтому актуальным является использования бинарных составов, представляющих собой упаковку с различным количеством канистр и инструкцией для работы с ними.

Листостебельные болезни озимой пшеницы могут снижать урожайность на 50–70%, при этом их возбудители характеризуются высокой агрессивностью и способны в сжатые сроки вызывать массовое поражение этой ценной культуры. Борьбу с комплексом таких болезней сложно вести без использования многокомпонентных фунгицидных протравителей [7], т.к. они обладают следующими преимуществами:

- простота применения и технологичность – вместо того, чтобы комбинировать компоненты баковых смесей и бинарных составов самостоятельно, аграриям гораздо удобнее использовать готовый многокомпонентный препарат с гарантированной совместимостью действующих веществ (ДВ).

- расширяется спектр действия фунгицидов, позволяющий контролировать сразу несколько видов, порой кардинально различающихся между собой возбудителей болезней. Это особенно наглядно можно наблюдать у фунгицидных протравителей, компоненты контактного действия которых работают против возбудителей болезней на поверхности семян, а системные - проникают вглубь семени, успешно справляясь с внутренним инфицированием.

- за счет комбинирования ДВ с различным механизмом действия снижается до минимума риск развития резистентности патогенных микроорганизмов к конкретному однокомпонентному препарату или даже целому классу фунгицидов.

- наблюдается эффект синергизма – когда активность двух или более фунгицидов превышает активности фунгицидов в случае их использования по отдельности.

Как известно, резистентность является наиболее трудно преодолимым последствием неправильного применения фунгицидов [20]. Резистентность приводит к тому, что использование фунгицидов становится малоэффективным и экономически неоправданным [22]. Попытки борьбы с резистентностью к фунгицидным препаратам посредством увеличения дозировок фунгицидов и кратности обработок бесперспективны, так как вызывают распространение все более и более устойчивых популяций этих патогенов [16]. Одним из перспективных подходов в решении проблем резистентности следует рассматривать сочетание фунгицидов из различных классов соединений с отличием механизма их действия [15]. Таким образом, для решения проблемы резистентности фунгицидов рекомендуется [12; 17]:

- обеспечить химическое разнообразие при использовании препаратов, что подавит рост и размножение устойчивых биотипов;

- ограничить количество обработок в сезон и обрабатывать только тогда, когда в этом есть необходимость;

- чередовать фунгициды и сокращать использование препарата, подверженного риску развития резистентности к нему;

- постоянный контроль (мониторинг) за степенью чувствительности патогенов к фунгицидам с момента появления их на рынке.

Авторами [21] изучено влияние двух триазольных фунгицидов – триконазола и триадименола – на рост и развитие пшеницы и было установлено уменьшение длины coleoptily, первого листа и междоузлий, а также негативное влияние на развитие корневой системы. Такой эффект вполне ожидаем ввиду известных ретардантных свойств триазолов.

Принимая во внимание проблемы резистентности, в работе [8] были проведены сравнительные исследования препаратов на основе одно-, двух- и трех-компонентных фунгицидов из различных классов соединений. Ввиду различия механизмов их действия, полученные композиции наиболее эффективно снижали пораженность септориозом из-за содержания пропиконазола (ПТК). Сравнение по биологической эффективности против септориоза и бурой ржавчины одно- (ТБК), двух- (ТБК+ПТК) и трехкомпонентных (ТБК+ПТК+спироксамин) фунгицидов показало, что многокомпонентные препараты более эффективны, чем однокомпонентные, однако существенных различий между двух- и трехкомпонентными препаратами не установлено. Полученные результаты по биологической эффективности подтверждаются данными по урожайности и экономической эффективности. Таким образом, было показано, что применение многокомпонентных препаратов актуально и востребовано.

Продолжая исследования в этом направлении, нами, с использованием механохимической технологии, были приготовлены твердые дисперсии (ТД) на основе тебуконазола и пропиконазола (ППК) с добавлением полисахарида – арабиногалактана, синтетического стимулятора роста – флороксан-а и силикагеля [9]. Добавление силикагеля имело две цели:

1. Сорбирование низкоплавкого компонента –ППК- для создания возможности проведения процесса твердофазной механохимической модификации триазольных компонентов арабиногалактаном;
2. Изучение возможности снижения ретардантного эффекта триазолов за счет биостимулирующих свойств кремневой кислоты, образующейся из силикагеля почвенными микроорганизмами [11].

При этом биологическая эффективность экспериментальных препаратов, использованных для протравливания семян яровой пшеницы Омская

36, против фузариозно-гельминтоспориозной корневой гнили составила 85–87%, что было на уровне эффективности коммерческого препарата Бункер, взятого за эталон. Такой эффект можно было объяснить ростостимулирующими свойствами использованных стимуляторов роста. Кроме того, уменьшалось число больных растений в вариантах с мерами защиты и были получены прибавки урожайности яровой пшеницы 9–14% [9]. Научная новизна наших исследований по разработке многокомпонентных протравителей заключается в том, что, используя технологию твердофазной механохимической модификации фунгицидных субстанций с помощью водорастворимых полимеров, удастся получить композиции в виде твердых дисперсий с повышенной растворимостью фунгицидного компонента и увеличенной мембранной проницаемостью [23].

Эта технология нами была успешно применена при разработке рецептов многокомпонентных фунгицидных протравителей [1; 4; 5; 13; 24]. Механохимическая технология позволила включать в составы протравителей субстанции фунгицидов, которые не имели областей совместной растворимости и могли разлагаться при нагревании, а также реагировать между собой при растворении [19]. Это позволило минимизировать протекание нежелательных химических превращений используемых фунгицидных субстанций. Такие исследования носят инновационный характер и обладают научной новизной и практической значимостью. При этом решаются вопросы не только улучшения растворимости, биодоступности и биологической активности фунгицидных компонентов, но их химической совместимости, а также химической стабильности при получении и хранении полученных препаратов. Такие составы, обладая высокой биологической активностью, представляли интерес для практического внедрения и поэтому такие исследования являются не только инновационными, но и актуальными для решения проблем резистентности.

Поскольку погодные условия в условиях Сибири не стабильны по годам и разнятся в пределах региона, то актуальность изучения возможных побочных эффектов протравителей семян яровой мягкой пшеницы, содержащих тебуконазол, не вызывает сомнения. Что и стало основной целью данной работы, а именно – определить диапазон воздействия ретардантных эффектов двух компонентного протравителя на основе тебуконазола (ТБК) и пропиконазола (ППК), содержащих в своем составе ПАВ и регулятор роста. При этом была изучена биологическую активность ТД на основе ТБК и ППК на новой культуре, а именно, путем протравливания семян мягкой озимой пшеницы сорта Новосибирская 11.

Материалы и методы исследования

Тебуконазол (ТБК) – [(RS)-1p-хлорфенил-4,4-диметил-3-(1H-1,2,4-триазол-1-ил-метил) пентан-3-ил] – системный фунгицид, используемый для обработки семян зерновых культур. Относится к триазолам 3-го поколения, проявляет системное действие, эффективен в борьбе с фитопатогенами, передающимися с семенами.

Пропиконазол (ППК) – [(+/-)-1-[2-(2,4-дихлорфенил)-4-пропил-1,3-диоксолан-2-илметил]-1H-1,2,4-триазол] – защитный и лечащий системный фунгицид из класса триазолов. Обладает широким спектром внутрирастительного действия. Применяется в сельском хозяйстве для борьбы с болезнями зерновых культур.

Флороксан (ФЛ) – гидрохлорид N-метил-4-(1 гидроксикарбометокситрифторэтил) анилина. Регулятор роста ряда растений [3].

Составы изученных в работе композиций приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Составы одно- и двухкомпонентных протравителей

№ обр.	Наименование образца, состав (содержание ДВ)	Содержание ТБК и ППК в 10 мг препарата
1	Препарат №1- ТД с добавлением эмульгатора (10% ТБК: 10% ППК)	ТБК (1,0 мг) ППК (1,0 мг)
2	Препарат №2- ТД с добавлением РРР -флороксана (10% ТБК: 10% ППК)	ТБК (1,0 мг) ППК (1,0 мг)
3	Препарат №3- ТД без добавок (10% ТБК: 10% ППК)	ТБК (1,0 мг) ППК (1,0 мг)
4	Препарат №4- порошок ТБК, 98%	ТБК (9,7 мг)
5	Препарат №5- паста ППК, 95%	ППК (9,5 мг)

Испытание препаратов проводили в лабораторных условиях, заложено 3 эксперимента. В опытах использовали яровую мягкую пшеницу, сорт Новосибирская 31. Все эксперименты включали 5 вариантов (см. табл. 2).

Таблица 2.

Варианты протравителей и их нормы расхода

Шифр варианта	Содержание варианта	Норма расхода на тонну семян
1	Контроль - без обработки семян фунгицидами	–
2	Препарат № 1	500 г
3	Препарат № 2	500 г
4	Препарат № 3	500 г
5	Препарат № 4	500 г

Результаты исследований и их обсуждение

Нашими исследованиями [4; 5] для решения проблем резистентности были изучены процессы приготовления трех-компонентных (металаксил, имазалил и тебуконазол) протравителей и анализа их биологической активности. Эти исследования были продолжены с включением в составы протравителей других фунгицидов (прохлораз, протиоконазол) [1; 24], отличающихся механизмами действия. Такие составы, обладая высокой биологической активностью, представляли интерес для практического внедрения и поэтому такие исследования были не только инновационными, но и актуальными для решения проблем резистентности.

В настоящей работе были приготовлены и изучены ТД на основе ТБК и ППК, полученные методом их твердофазной модификации с помощью полисахарида АГ. Для изучения воздействия экспериментальных препаратов на фитосанитарное состояние семян, рост и развитие проростков яровой мягкой пшеницы, формирующихся из обработанных ими зерновок, зерновки обрабатывались за 6 суток до закладки на субстрат (в рулоны фильтровальной бумаги), проращивание проводилось в течении 14 суток (7 – термостат, $t = +26^{\circ}\text{C}$; 7 – комнатные условия, естественное освещение, $t = 24^{\circ}\text{C}$). В конце эксперимента определено:

- зараженность семян;
- число проростков с пораженными корнями и прикорневой зоны;
- биомасса нормально сформировавшихся проростков (табл.3).

Таблица 3.

Эффективность фунгицид-содержащих препаратов, примененных в качестве протравителей семян яровой мягкой пшеницы, метод изучения: проращивание в рулонах фильтровальной бумаги (7 суток, $t = +26^{\circ}\text{C}$, термостат; 7 суток – комнатные условия, естественное освещение, $t = 24^{\circ}\text{C}$), 2021 г.

Обработка семян		Фитосанитарные показатели							
		зараженность семян, %						у нормально сформировавшихся проростков поражены, %	
		<i>B. sorokiniana</i>	<i>Fusarium</i> spp.	<i>Alternaria</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp.	Бактериоз	всего	прикорневая часть ростков	корни
1	Без обработки	21,00	1,50	67,75	2,75	2,50	95,50	42,4	16,6
2	Препарат №1	0,00	8,75	0,00	0,25	9,00	18,00	2,0	1,7

3	Препарат № 2	0,00	0,25	18,00	0,00	0,75	19,00	0,0	0,0
4	Препарат № 3	3,00	0,00	37,25	0,00	1,75	42,00	12,0	16,6
5	Препарат № 4	0,00	0,00	33,25	0,00	0,00	33,30	3,5	0,0
n = 100 × 4 повторности									
Показатели роста									
		Проросших, %		Непроросших, %	Воздушно-сухая биомасса (мг) нормально сформировавшихся проростков				
		нормально	ненормально		1 ростка	Корней 1 проростка	1 проростка	доля корней в биомассе проростка, %	
1	Без обработки	82,75	1,25	16,00	12,01	8,19	20,19	40,5	
2	Препарат №1	88,75	5,50	5,75	9,40	11,77	21,17	55,6	
3	Препарат № 2	85,50	0,00	14,50	8,76	11,23	19,98	56,2	
4	Препарат № 3	81,75	5,25	13,00	9,42	10,59	20,01	52,9	
5	Препарат № 4	81,50	0,00	18,50	9,48	9,26	18,74	49,4	

В ходе фитозащиты выявлена высокая (21%, ЭПВ = 5%) инфицированность семян основным возбудителем обыкновенной корневой гнили *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker (syn. *Helminthosporium sativum* Pat., King et Bakke, *H. sorokiniana* Sacc.). На фоне такой значительной инфицированности установлена высокая эффективность (100%) протравливания (варианты 1,2,4) комплексами как с добавлением эмульгатора (10% ТБК: 10% ППК), так и РРР флороксана (10% ТБК : 10% ППК). Полученный фитосанитарный результат соответствует таковому (100%) от обработки семян чистым тебуконазолом (ТБК, порошок, 98%). Комплекс (10% ТБК: 10% ППК) без добавок контролировал *B. sorokiniana* на 85,7%. Возбудители обыкновенной корневой гнили – грибы *Fusarium* spp. – в использованном семенном материале встречались реже, их зараженность в контроле составила 1,5%. При использовании состава с добавлением эмульгатора (10% ТБК: 10% ППК) из обработанных зерновок выделено 8,5% фузариев, что выше чем в контрольном варианте в 5,7 раза. По-видимому, эмульгатор выступал как дополнительное питание для роста фу-

зариев на голодном субстрате – увлажненной фильтровальной бумаге. Если использовали состав (10% ТБК : 10% ППК) с флороксаном, то грибы *Fusarium* spp. подавлялись на 98,8%, практически равнозначно эффектам от чистого тебуконазола и препарату без добавок (100%). Аналогичный 100-%-ный контроль альтернариоза обеспечивал только состав с добавлением эмульгатора (10% ТБК: 10% ППК). Комплекс с флороксаном подавлял рост грибов *Alternaria* spp. на 73,4%, что выше эффективности от применения препарата без добавок и чистого ТБК в 1,5 раза. Зараженность семян плесенью хранения (грибы *Penicillium* spp.) оказалась не высокой – 2,75%. Препараты с добавлением эмульгатора (10% ТБК: 10% ППК), флораксана и чистый ТБК высокоэффективно (биологическая эффективность (БЭ) = 100 – 89,8%; контроль = 16,6%) защищали корневую систему. Прикорневая часть проростка не поражалась при обработке семян препаратом № 2, слабо – препаратами №№ 1 и 4 (БЭ = 100, 95,3 и 91,7%).

Количество нормально сформировавшихся проростков повышалось (на 6 и 2,75%; контроль = 82,75%) в вариантах 2 и 3 (препараты 1 и 2). При проращивании в рулонах фильтровальной бумаги в опытных вариантах отмечено угнетение прорастания зерновок. Довольно высокий процент (18,5, контроль = 16,0%) не проросших семян давало протравливание чистым ТБК, незначительно ниже (14,5 и 13,0% не всхожих зерновок) – препаратами без добавок и имеющим в составе флороксан. Ретардантный эффект проявлялся в укорачивании ростков. Их биомасса (контроль = 12,01 мг) снижалась (на 21,0-21,7%) от обработки семян препарат с эмульгатором и без добавок; на 27,0% – с флораксаном. Рост корней не угнетался: их доля в общей массе проростка была выше на 15,1 и 15,7% (состав 10% ТБК: 10% ППК как с добавлением эмульгатора, так и флораксана) и несколько меньше – на 12,4 и 8,9%, если использовали препарат без добавок и порошок ТБК (контроль = 40,5%).

Для выявления рост-стимулирующих свойств препаратов на первых этапах органогенеза пшеницы применили метод влажной камеры. Обработанные семена через 6 суток закладывались на влажное ложе (фильтровальная бумага, 4 слоя, ФБ-субстрат) в пластиковые чашки (n=30), естественное освещение, t = +20...22°C. Определялась динамика энергии прорастания (через 1, 2, 3 суток), всхожесть (через 7 суток). Показатели роста на первых этапах органогенеза фиксировали через 3 и 7 суток. В данном эксперименте выявлено несколько сниженная (на 3,4%; без обработки = 96,7%) энергия прорастания зерновок, обработанных препаратами № 1, 2 и 4 (табл. 4).

Таблица 4.

Влияние препаратов №№ 1-4 на формирование проростков на первых этапах органогенеза пшеницы, субстрат выращивания – увлажненная фильтровальная бумага, 4 слоя, естественное освещение, $t = +20...22^{\circ}\text{C}$, через 3 суток, 2021 г.

Варианты опыта		Энергия прорастания, %	Суммарная длина корней 1 проростка, см	Число корней, шт./проросток	Средняя длина 1 корня, см	Высота роста, см
1	Без обработки	96,7	24,66±0,89	4,52	5,46	8,64±0,34
2	Препарат № 1	93,3	17,17±0,72	4,18	4,11	3,55±0,21
3	Препарат № 2	93,3	19,08±0,65	4,30	4,48	4,94±0,17
4	Препарат № 3	96,7	20,30±0,90	4,18	4,93	5,27±0,24
5	Препарат № 4	93,3	22,85±1,19	4,64	4,92	6,33±0,35

Препараты с добавками эмульгатора, флораксана и без таковых (№ 1, 2, 3) заметно тормозили корнеобразование. Число корней снижалось на 5-8%, их суммарная длина в 1,7, 1,3, 1,2 и 1,07 раза (контроль 4,52 шт./проросток и 24,66 см). Все препараты вызывали укорачивание ростков, особенно имеющий в составе эмульгатор (№ 1 в 2,4 раза). Ретардантный эффект снижался если эмульгатор заменяли на флороксан или использовали протравитель без добавок (№№ 2,3,4 = 1,6, 1,6 и 1,4 раза). У 7 сутокных проростков, выращенных из протравленных зерновок, суммарная длина корней превышала контрольный показатель (27,04 см) в 1,3, 1,4, 1,4 и 1,7 раза, соответственно, препаратам под № 1,2,3,4. Но развитие ростков по-прежнему отставало от контрольных растений (см. табл. 5).

Таблица 5.

Влияние препаратов №№ 1-4 на формирование проростков на первых этапах органогенеза пшеницы, субстрат выращивания – увлажненная фильтровальная бумага, 4 слоя, естественное освещение, $t = +20...22^{\circ}\text{C}$, через 7 суток, 2021 г.

Варианты опыта		Всхожесть, %	Суммарная длина корней 1 проростка, см	Число корней, шт./проросток	Средняя длина 1 корня, см	Высота роста, см
1	Без обработки	96,6	27,04±0,84	4,62	5,85	16,12±0,36
2	Препарат № 1	96,6	33,86±1,48	4,76	7,11	8,39±0,41
3	Препарат № 2	88,9	37,40±1,46	4,56	8,20	11,07±0,36
4	Препарат № 3	96,6	37,30±1,54	4,45	8,38	11,36±0,46
5	Препарат № 4	88,9	47,00±2,20	4,70	10,00	11,60±0,57

Наиболее сильное (практически в 2 раза) ретардантное воздействие оказывал состав (10% ТБК: 10% ППК с добавлением эмульгатора, препарат № 1) (табл.6).

Таблица 6.

Влияние препаратов №№ 1-4 на накопление биомассы проростков пшеницы, субстрат выращивания – увлажненная фильтровальная бумага, 4 слоя, естественное освещение, $t = +20...22^{\circ}\text{C}$, через 7 суток, 2021 г.

		Проросших, %		Воздушно-сухая биомасса (мг) нормально сформировавшихся проростков			
		нормально	ненормально	1 ростка	корней 1 проростка	1 проростка	доля ростков в биомассе проростка, %
1	Без обработки препаратами	96,6	3,4	11,70±0,30	8,30±0,30	20,00	58,5
2	Препарат №1	96,6	3,4	7,93±0,07	9,30±0,35	14,81	53,5
3	Препарат № 2	88,9	11,1	9,67±0,33	9,33±0,67	19,00	50,9
4	Препарат № 3	96,6	3,4	10,67±0,33	9,30±0,35	19,96	53,4
5	Препарат № 4	88,9	11,1	9,19±0,42	9,19±0,92	18,38	50,0

Остальные препараты снижали высоту ростка в 1,5 - 1,4 раза. Препараты № 2 и № 4 вызывали не нормальное проращивание зерновок, что в конечном итоге сказалось на всхожести, снизившейся до 88,9 против 96,6% в контроле.

Сильное ретардантное воздействие препаратов № 1-4 на рост и развитие ростков яровой мягкой пшеницы подтверждено в опыте № 3, где в качестве субстрата выращивания использован чернозем выщелоченный. Условия его проведения: зерновки обрабатывались за 6 суток до закладки на субстрат (почва – чернозем выщелоченный, 500 г / 30 шт. зерновок / пластиковую чашку), естественное освещение, $t = +20...22^{\circ}\text{C}$, контролируемая влажность почвы.

Показатели роста фиксировали через 7 суток. Определялась всхожесть, высота ростка, биомасса проростков. В этом эксперименте препарат с добавлением эмульгатора обеспечивал 100%-ю всхожесть, что выше (на 10%) таковой при протравливании препаратом без добавок (90%); контроль = 96,7%. Интенсивность развития ростков в опытных вариантах уступала (на 33,2- 52,4%) контрольной (16,77 см) (табл. 7).

Таблица 7.

Влияние препаратов №№ 1-4 на развитие ростков пшеницы, субстрат выращивания – чернозем выщелоченный, естественное освещение, $t = +20...22^{\circ}\text{C}$, через 7 суток, 2021 г.

Вариант		про- рос- ших ненор- маль- но, %	не- про- рос- ших, %	Всхо- жесть, %	Высота ростка		Воздушно-сухая биомасса нормально сформировавшего проростка, мг	
					см	сни- же- ние, %	ростка	корней 1 проростка
1	Без обработки препаратами	0,00	3,33	96,7	16,77±0,48	-	12,08±0,51	6,08±0,10
2	Препарат №1	0,00	0,00	100,0	7,99±0,27	52,4	7,33±0,33	7,00±1,15
3	Препарат № 2	3,33	3,33	93,3	9,94±0,40	40,7	8,98±0,08	7,17±0,17
4	Препарат № 3	6,67	3,33	90,0	9,89±0,40	41,0	8,86±0,14	7,71±0,65
5	Препарат № 4	0,00	3,33	96,7	11,20±0,43	33,2	8,96±0,58	8,63±0,32

Биомасса 7-суточных контрольных ростков составила 12,08±0,51 мг. В опытных вариантах наблюдали отставание в ее накоплении, которое интенсивнее проявилось при проращивании семян, обработанных препаратом с добавкой эмульгатора (препарат № 1 - в 1,6 раза) и несколько слабее (в 1,3-1,4 раза) в вариантах №№ 2,3,4. Испытуемые препараты на формирующуюся корневую систему угнетающе, так же, как и опыте №2, не воздействовали, на что указывает более высокий (в 1,15 и 1,17 раза – составы 10% ТБК : 10% ППК с эмульгатором и флораксаном; в 1,26 и 1,42 раза – без их добавки и чистый ТБК; контроль = 6,08 мг) показатель накопленной биомассы корней 1 проростка.

Заключение

Разработка протравителей, содержащих два и более действующих веществ фунгицидов является актуальной задачей, позволяющей получать препараты с широким спектром действия, снижающим риск появления резистентности и другим положительным свойствам. Приготовленные экспериментальные протравители на основе тебуконазола и пропиконазола обладали сильным ретардантным действием, которое не снижалось даже при применении РРР флороксан. Изучено влияние протравителей на фитосанитарное состояние семян, рост и развитие проростков яровой мягкой пшеницы, формирующихся из обработанных ими зерновок. Фитоэкспер-

тизой установлено значительное снижение колоний грибов, в частности, в варианте с препаратами ТБК и ППК, имеющими в составе эмульгатор и флороксан, достигнут 100%-ный эффект по подавлению гельминтоспориозно-фузариозной инфекции. Экспериментальные препараты заметно тормозили корнеобразование и укорачивали ростки, вызывали не нормальное прорастание зерновок, что в конечном итоге сказалось на всхожести, а также на накоплении биомассы ростков и проростков. Полученные результаты подтверждают перспективность использования методов механической химии для получения многокомпонентных протравителей для решения проблем резистентности.

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

Информация о спонсорстве. Часть работ по приготовлению препаратов выполнена в рамках Государственного задания № 075-00277-24-00 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Бурлакова, С.В., Власенко, Н.Г., Чкаников, Н.Д., & Халиков, С.С. (2020). Влияние многокомпонентных протравителей на зараженность фитопатогенами посевного материала и фитоценоз яровой пшеницы. *Агрохимия*, (5), 72-79. <https://doi.org/10.31857/S000218812005004X> EDN: <https://elibrary.ru/fnuavg>
2. Власенко, Н.Г. (2008). К вопросу об агротехнологиях вообще и фитосанитарных технологиях в частности. *Вестник защиты растений*, (2), 3-10. EDN: <https://elibrary.ru/juzdzt>
3. Власенко, Н.Г., Бурлакова, С.В., Халиков, С.С., Федоровский, О.Ю., & Чкаников, Н.Д. (2017). Флороксан - потенциальный компонент комплексных протравителей зерновых культур. *Агрохимия*, (7), 49-54. <https://doi.org/10.7868/S0002188117070079> EDN: <https://elibrary.ru/ytglof>
4. Власенко, Н.Г., Бурлакова, С.В., Федоровский, О.Ю., Чкаников, Н.Д., & Халиков, С.С. (2018). Комплексный фунгицид на основе фениламинов и азолов для защиты семенного материала яровой пшеницы. *Агрохимия*, (10), 40-45. <https://doi.org/10.1134/S0002188118100149> EDN: <https://elibrary.ru/ymfrit>
5. Власенко, Н.Г., Бурлакова, С.В., Чкаников, Н.Д., & Халиков, С.С. (2019). Фунгицидный протравитель на основе азолов для обработки семян зерновых культур. *Агрохимия*, (6), 44-49. <https://doi.org/10.1134/S0002188119020145> EDN: <https://elibrary.ru/kltomc>

6. Ганиев, М.М., & Недорезков, В.Д. (2006). *Химические средства защиты растений*. Москва: КолосС, 248 с.
7. Голубцов, Д.Н., Жижина, Е.Ю., & Мелькумова, Е.А. (2022). Эффективность применения многокомпонентных фунгицидов против вредоносных микозов озимой пшеницы. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 15(3), 79-86. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_79 EDN: <https://elibrary.ru/sshetc>
8. Кекало, А.Ю., Немченко, В.В., Заргарян, Н.Ю., & Филиппов, А.С.
9. Фитосанитарные проблемы пшеничного поля и эффективность средств защиты от болезней. *Агрохимия*, (10), 45-50. <https://doi.org/10.31857/S0002188120100038> EDN: <https://elibrary.ru/vvnajo>
10. Кекало, А.Ю., Халиков, С.С., Ильин, М.М., Чкаников, Н.Д., & Заргарян, Н.Ю. (2023). Комбинированные триазольные протравители и их влияние на рост и развитие проростков яровой пшеницы. *Агрохимия*, (10), 55-62. <https://doi.org/10.31857/S0002188123100071> EDN: <https://elibrary.ru/lfqapw>
11. Малюга, А.А., Чуликова, Н.С., & Халиков, С.С. (2020). Эффективность инновационных препаратов на основе тебуконазола, тирама и карбендазима против болезней картофеля. *Агрохимия*, (7), 57-67. <https://doi.org/10.31857/S000218812007008X> EDN: <https://elibrary.ru/rwrcmh>
12. Матыченков, В.В., Бочарникова, Е.А., & Пироговская, Г.В., Ермолович, И.Е. (2022). Перспективы использования кремневых препаратов в сельском хозяйстве (обзор). *Почвоведение и агрохимия*, 1(68), 219-234. [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-219-234](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-219-234) EDN: <https://elibrary.ru/rmuzpg>
13. Тютерев, С.Л. (2001). Проблемы устойчивости фитопатогенов к новым фунгицидам. *Вестник защиты растений*, (1), 38-53. EDN: <https://elibrary.ru/zisgcp>
14. Халиков, С.С., Теплякова, О.И., & Власенко, Н.Г. (2022). Влияние препаративных форм тебуконазола на фитосанитарное состояние обработанных семян, рост и развитие проростков яровой пшеницы. *Агрохимия*, (2), 45-55. <https://doi.org/10.31857/S0002188122020065> EDN: <https://elibrary.ru/owibsl>
15. El-Sayed, S.A. & Abdel-Monaim, M.F. (2017). Integrated control management of root rot disease in lupine plants by using some bioagents, chemical inducers and fungicides. *Plant. Sci. Agr. Res.*, 1(1:2), 1-8.
16. Campbell, B.C., Chan, K.L. & Kim, J.H. (2012). Chemosensitization as a means to augment commercial antifungal agents. *Frontiers in Microbiology*, 3:79, 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00079> EDN: <https://elibrary.ru/rmslyr>
17. Dzhavakhiya, V., Shcherbakova, L., Semina, Y., Zhemchuzhina, N. & Campbell, B. (2012). Chemosensitization of plant pathogenic fungi to agricultur-

- al fungicides. *Frontiers in Microbiology*, 3:87, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00087> EDN: <https://elibrary.ru/rgbomt>
18. Dzhavakhiya, V.G., Voinova, T.M., Statsyuk, N.V. & Shcherbakova, L.A. (2019). Sensitization of plant pathogenic fungi to the tebuconazole-based commercial fungicide using some analogues of natural amino acids. *AIP Conference Proceedings*, 2063(1):030005, 1-6. <https://doi.org/10.1063/1.5087313> EDN: <https://elibrary.ru/yxkoap>
19. Karakotov, S.D. & Saraev, P.V. (2019). Preparative forms of modern pesticides. *Adaptively-integrated plant protection*. Moscow: Printing city, 65-76.
20. Khalikov, S.S. & Dushkin, A.V. (2020). Strategies for Solubility Enhancement of Anthelmintics (Review). *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 54(5), 504-508. <https://doi.org/10.1007/s11094-020-02229-4> EDN: <https://elibrary.ru/acavrf>
21. Lucas, J.A., Hawkins, N.J. & Fraaije, B.A. (2015). The evolution of fungicide resistance. *Advances in Applied Microbiology*, 90, 29-92. <https://doi.org/10.1016/bbs.aambs.2014.09.001> EDN: <https://elibrary.ru/yeyuvv>
22. Montfort, F., Klepper, B.L. & Smiley, R.W. (1996). Effects of two triazole seed treatments, triticonazole and triadimenol, on growth and development of wheat. *Pest Manag. Sci.*, 46, 299-306. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199604\)46:4<315::AID-PS369>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199604)46:4<315::AID-PS369>3.0.CO;2-R)
23. Oliver, R.P. (2014). A reassessment of the risk of rust fungi developing resistance to fungicides. *Pest. Manag. Sci.*, 70, 1641-1645. <https://doi.org/10.1002/ps.3767>
24. Selyutina, O.Y., Khalikov, S.S. & Polyakov, N.E. (2020). Arabinogalactan and glycyrrhizin based nanopesticides as novel delivery systems for plant protection. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 5864-5872. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07397-9> EDN: <https://elibrary.ru/vziehf>
25. Vlasenko, N.G., Khalikov, S.S. & Burlakova, S.V. (2020). Flexible Technology of Protectants for Grain Seeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 548 082003, 1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082003> EDN: <https://elibrary.ru/udhhri>

References

1. Burlakova, S. V., Vlasenko, N. G., Chkanikov, N. D., & Khalikov, S. S. (2020). Effect of multicomponent seed dressings on infestation of spring wheat seed material with phytopathogens and phytocenosis. *Agrochemistry*, (5), 72-79. <https://doi.org/10.31857/S000218812005004X> EDN: <https://elibrary.ru/fnuavg>
2. Vlasenko, N. G. (2008). On the issue of agricultural technologies in general and phytosanitary technologies in particular. *Plant Protection News*, (2), 3-10. EDN: <https://elibrary.ru/juzdzr>

3. Vlasenko, N. G., Burlakova, S. V., Khalikov, S. S., Fedorovsky, O. Yu., & Chkanikov, N. D. (2017). Floroxan as a potential component of complex seed dressings for cereal crops. *Agrochemistry*, (7), 49-54. <https://doi.org/10.7868/S0002188117070079> EDN: <https://elibrary.ru/ytglf>
4. Vlasenko, N. G., Burlakova, S. V., Fedorovsky, O. Yu., Chkanikov, N. D., & Khalikov, S. S. (2018). Complex fungicide based on phenylamides and azoles for protection of spring wheat seed material. *Agrochemistry*, (10), 40-45. <https://doi.org/10.1134/S0002188118100149> EDN: <https://elibrary.ru/ymfrit>
5. Vlasenko, N. G., Burlakova, S. V., Chkanikov, N. D., & Khalikov, S. S. (2019). Fungicidal seed dressing based on azoles for treatment of cereal crop seeds. *Agrochemistry*, (6), 44-49. <https://doi.org/10.1134/S0002188119020145> EDN: <https://elibrary.ru/kltomc>
6. Ganiev, M. M., & Nedorezkov, V. D. (2006). *Plant protection chemicals*. Moscow: KolosS, 248 p.
7. Golubtsov, D. N., Zhizhina, E. Yu., & Melkumova, E. A. (2022). Efficiency of multicomponent fungicides against harmful mycoses of winter wheat. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*, 15(3), 79-86. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_79 EDN: <https://elibrary.ru/sshetc>
8. Kekalo, A. Yu., Nemchenko, V. V., Zargaryan, N. Yu., & Filippov, A. S. Phytosanitary problems of wheat field and effectiveness of plant disease control agents. *Agrochemistry*, (10), 45-50. <https://doi.org/10.31857/S0002188120100038> EDN: <https://elibrary.ru/vvnajo>
9. Kekalo, A. Yu., Khalikov, S. S., Ilyin, M. M., Chkanikov, N. D., & Zargaryan, N. Yu. (2023). Combined triazole seed dressings and their effect on growth and development of spring wheat seedlings. *Agrochemistry*, (10), 55-62. <https://doi.org/10.31857/S0002188123100071> EDN: <https://elibrary.ru/lfqapw>
10. Kekalo, A. Yu., Khalikov, S. S., Ilyin, M. M., Chkanikov, N. D., & Zargaryan, N. Yu. (2023). Combined triazole seed dressings and their effect on growth and development of spring wheat seedlings. *Agrochemistry*, (10), 55-62. <https://doi.org/10.31857/S0002188123100071> EDN: <https://elibrary.ru/lfqapw>
11. Malyuga, A. A., Chulikova, N. S., & Khalikov, S. S. (2020). Efficiency of innovative preparations based on tebuconazole, thiram, and carbendazim against potato diseases. *Agrochemistry*, (7), 57-67. <https://doi.org/10.31857/S000218812007008X> EDN: <https://elibrary.ru/rwrcmh>
12. Matychenkov, V. V., Bocharnikova, E. A., Pirogovskaya, G. V., & Ermolovich, I. E. (2022). Prospects for using silicon preparations in agriculture (review). *Soil Science and Agrochemistry*, 1(68), 219-234. [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-219-234](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-219-234) EDN: <https://elibrary.ru/rmuzpg>

13. Tyuterev, S. L. (2001). Problems of phytopathogen resistance to new fungicides. *Plant Protection News*, (1), 38-53. EDN: <https://elibrary.ru/zisgcp>
14. Khalikov, S. S., Teplyakova, O. I., & Vlasenko, N. G. (2022). Effect of tebuconazole formulations on phytosanitary condition of treated seeds, growth, and development of spring wheat seedlings. *Agrochemistry*, (2), 45-55. <https://doi.org/10.31857/S0002188122020065> EDN: <https://elibrary.ru/owibsl>
15. El-Sayed, S.A. & Abdel-Monaim, M.F. (2017). Integrated control management of root rot disease in lupine plants by using some bioagents, chemical inducers and fungicides. *Plant. Sci. Agr. Res.*, 1(1:2), 1-8.
16. Campbell, B.C., Chan, K.L. & Kim, J.H. (2012). Chemosensitization as a means to augment commercial antifungal agents. *Frontiers in Microbiology*, 3:79, 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00079> EDN: <https://elibrary.ru/rmslyr>
17. Dzhavakhiya, V., Shcherbakova, L., Semina, Y., Zhemchuzhina, N. & Campbell, B. (2012). Chemosensitization of plant pathogenic fungi to agricultural fungicides. *Frontiers in Microbiology*, 3:87, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00087> EDN: <https://elibrary.ru/rgbomt>
18. Dzhavakhiya, V.G., Voinova, T.M., Statsyuk, N.V. & Shcherbakova, L.A. (2019). Sensitization of plant pathogenic fungi to the tebuconazole-based commercial fungicide using some analogues of natural amino acids. *AIP Conference Proceedings*, 2063(1):030005, 1-6. <https://doi.org/10.1063/1.5087313> EDN: <https://elibrary.ru/yxkoap>
19. Karakotov, S.D. & Saraev, P.V. (2019). Preparative forms of modern pesticides. *Adaptively-integrated plant protection*. Moscow: Printing city, 65-76.
20. Khalikov, S.S. & Dushkin, A.V. (2020). Strategies for Solubility Enhancement of Anthelmintics (Review). *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 54(5), 504-508. <https://doi.org/10.1007/s11094-020-02229-4> EDN: <https://elibrary.ru/acavrf>
21. Lucas, J.A., Hawkins, N.J. & Fraaije, B.A. (2015). The evolution of fungicide resistance. *Advances in Applied Microbiology*, 90, 29-92. <https://doi.org/10.1016/b.s.aambs.2014.09.001> EDN: <https://elibrary.ru/yeyuvv>
22. Montfort, F., Klepper, B.L. & Smiley, R.W. (1996). Effects of two triazole seed treatments, triticonazole and triadimenol, on growth and development of wheat. *Pest Manag. Sci.*, 46, 299-306. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199604\)46:4<315::AID-PS369>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199604)46:4<315::AID-PS369>3.0.CO;2-R)
23. Oliver, R.P. (2014). A reassessment of the risk of rust fungi developing resistance to fungicides. *Pest. Manag. Sci.*, 70, 1641-1645. <https://doi.org/10.1002/ps.3767>
24. Selyutina, O.Y., Khalikov, S.S. & Polyakov, N.E. (2020). Arabinogalactan and glycyrrhizin based nanopesticides as novel delivery systems for plant protection. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 5864-5872. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07397-9> EDN: <https://elibrary.ru/vziehf>

25. Vlasenko, N.G., Khalikov, S.S. & Burlakova, S.V. (2020). Flexible Technology of Protectants for Grain Seeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 548 082003, 1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082003>
EDN: <https://elibrary.ru/udhhri>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Власенко Наталия Григорьевна, доктор биологических наук, академик РАН, профессор
Сибирский научно-исследовательский институт земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН
р.п. Краснообск, Новосибирский р-н, Новосибирская обл., 630501, Российская Федерация

Халиков Салават Самадович, доктор технических наук, старший научный сотрудник
ФГБУН «Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН»
ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация
khalikov_ss@ineos.ac.ru

Теплякова Ольга Ивановна, кандидат биологических наук
Сибирский научно-исследовательский институт земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН
р.п. Краснообск, Новосибирский р-н, Новосибирская обл., 630501, Российская Федерация
rudol4757@mail.ru

Халиков Марат Салаватович, научный сотрудник лаборатории физиологически активных фторорганических соединений
ФГБУН «Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН»
ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация
marat1988@ineos.ac.ru

Чкаников Николай Дмитриевич, доктор химических наук
ФГБУН «Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН»
ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация
nchkan@ineos.ac.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalia G. Vlasenko, Doctor of Biological Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor
Siberian Research Institute of Agriculture and Chemicalization of Agriculture SFSCA RAS
Krasnoobsk, Novosibirsk district, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation

Salavat S. Khalikov, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)
28, bld. 1, Vavilova Str., Moscow, 119334, Russian Federation
khalikov_ss@ineos.ac.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4736-5934>

Olga I. Teplyakova, Candidate of Biological Sciences
Siberian Research Institute of Agriculture and Chemicalization of Agriculture SFSCA RAS
Krasnoobsk, Novosibirsk district, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation
rudol4757@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-7322-1157>

Marat S. Khalikov, Research Fellow at the Laboratory of Physiologically Active Organofluorine Compounds
A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)
28, bld. 1, Vavilova Str., Moscow, 119334, Russian Federation
marat1988@ineos.ac.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3014-7383>

Nikolay D. Chkanikov, Doctor of Chemical Sciences
A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)
28, bld. 1, Vavilova Str., Moscow, 119334, Russian Federation
nchkan@ineos.ac.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1660-9223>

Поступила 23.10.2024

После рецензирования 02.12.2024

Принята 07.12.2024

Received 23.10.2024

Revised 02.12.2024

Accepted 07.12.2024

DOI: 0.12731/2658-6649-2025-17-3-1159

EDN: HVQMQO

UDC 1631.8:631.582:579.826



Original article

STUDY OF GENE EXPRESSION RESISTANCE IN OILSEED RAPE AGAINST PYTHIUM ROOT ROT CAUSED BY PYTHIUM SPP. FUNGI

J.T. Alkooranee

Abstract

Background. Pythium root rot (PRR), caused by multiple *Pythium* spp., is one of the most significant root diseases affecting Brassica crops. The use of chemical pesticides against PRR is an inappropriate due to the associated health and environmental risks to humans. Therefore, employing biotic and abiotic resistance elicitors presents a successful alternative for managing PRR in *Brassica napus*.

Materials and methods. *Bacillus subtilis*, *Chenopodium album* water extract, Salicylic acid, and Ayzox fungicide were used to analyze their effects on resistance genes involved in responses of *B. napus* to PRR. Three genes associated with plant defense, the JA signaling marker (*VSP2*), the ET signaling marker (*PR-4*), and the SA signaling marker (*PR-5*) - were examined for gene expression by quantitative real time-polymerase chain reaction (qRT-PCR).

Results. The results showed that plants inoculated with biotic and abiotic elicitors exhibited a reduction in the damping off, and the symptoms in these plants were less severe compared to those plants that were not inoculated with elicitors and were infected with PRR. The results of qPCR demonstrated that the expression levels of the *VSP2* and *PR-4* genes increased in plants infected with *Pythium* spp., while the expression levels of the *PR-5* gene increased in the leaves of plants treated with abiotic elicitors.

Conclusion. This study suggests that the biotic and abiotic elicitors used in the experiments are environmentally friendly agents and effective methods for protecting susceptible *B. napus* from *Pythium* spp.

Keywords: *Bacillus subtilis*; *Brassica napus*; *Chenopodium album* extract; *Pythium* spp.; Salicylic acid

For citation. Alkooranee, J. T. (2025). Study of gene expression resistance in oilseed rape against *Pythium* root rot caused by *Pythium* spp. fungi. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 253-267. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1159>

Introduction

Oilseed rape is a major crop with an increasing cultivation area across the world, but in Iraq, its cultivation remains limited and is widespread. However, the productivity of oilseed crop *Brassica napus* is still not sufficiently high, with a portion of the yield lost annually because of diseases.

Pythium spp. is one of the most diverse and widespread fungi of the Oomycetes family worldwide, with more than 355 described species [1]. *Pythium* spp. are soilborne pathogens that cause adverse effects and severe economic losses in crops of the family Brassicaceae, leading to diseases such as damping-off, root and stem rots and leaf blights, which caused significant economic damage [2-4]. The protection of plants through the induction of systemic resistance is a promising and comprehensive approach to suppress many pathogens in the current context [5]. In Iraq, the management of *Pythium* root rot (PRR) diseases is based on prevention through the use of synthetic fungicides, with few studies exploring the use of biological and chemical agents in inducing systemic resistance. Biotic agents such as *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma viride* and *T. harzianum* have been tested for their ability to stimulate the systemic resistance in plants against various pathogens [5, 6].

Similarly, several studies indicate the role of plant extract in providing protection to plants against various pathogens. One study revealed that GC-MS analysis of *Chenopodium album* water extract showed the presence of methyl ester; 2 (3H)-furanone, 9-octadecenoic acid (Z), methyl ester; 9,12-octadecenoic acid (Z), dihydro-4,4-dimethyl; hexadecanoic acid, methyl ester; 1,2-benzene dicarboxylic acid, mono (2-ethylhexyl) ester and 6-methylene bicyclo (3.2.0) hept-3-en-2-one has ability to control some plant disease fungi including *Rhizoctonia solani*, *Alternaria alternata*, *Sclerotinia sclerotium*, *Pythium aphanidermatum*, and *Fusarium solani* [7]. *C. album* extract significantly reduced the percentage of damping-off in bread wheat caused by *R. solani* and *F. solani* compared to the control treatment [8].

Biocontrol agents and plant extracts play an important role in protecting field crops by inducing systemic resistance against pathogens. Systemic resistance is classified into two types; induced systemic resistance (ISR) and systemic acquired resistance (SAR). ISR involves a promotion of plant defense activity to various pathogens through the application of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), while SAR is induced in plants through exposure to pathogenic microbes or treatment with abiotic elicitors [9].

ISR depends on ethylene (ET) and jasmonic acid (JA) pathways [10], while SAR is based on the salicylic acid (SA) pathway [11]. Salicylic acid and JA/

ET serve as regulatory hormones and are considered key signaling pathways for proteins and genes associated with plant resistance.

Defense and regulatory hormones have been used together to coordinate the host defense system. In earlier studies, certain genes associated with resistance have been observed in different plants in response to pathogen infections. Resistance genes, such as plant defenses in 1.2 (*PDF1.2*) and pathogenesis-related with proteins (*PR* families), including *PR-1*, *PR-2*, and *PR-5*, act directly or indirectly against pathogens. Genes of the pathogenesis-related proteins, like *PR-1*, *PR-2*, *TGA* transcription factor 5 and 6 are often used as markers for systemic acquired resistance (SAR) of the SA pathway. Whereas *PDF1.2*, *PR-3*, *PR-4*, the ethylene response factor 2 (*ERF2*) and allene oxide cyclase 3 (*AOC3*) genes, were used as markers of ISR in oilseed rape genotypes to *S. sclerotiorum* fungus [12, 13]. It is imperative to understand the relationship and interaction between the host and pathogens through the elicitor–receptor interaction. Acknowledging the relationships between the two is crucial for understanding the mechanisms of permanent resistance in plants and their evolution [14]. The aim of this study is to identify one or more hormonal signaling pathways involved in ISR and SAR by analyzing the responsive expression patterns of SA, JA and ET in *B. napus* treated with biotic or abiotic elicitors.

Materials and methods

Plant materials, pathogen and biotic

The genotype of *Brassica napus*, fungus *Pythium* spp. isolate and the abiotic elicitors SA, Ayzox fungicide (a new fungicide strobilurin & Hexaconazole 25% was tested as first time in lab) and the biotic elicitors *C. album* water extract and *B. subtilis* were prepared in the department of Field Crops, Faculty of Agriculture in Wasit University, Wasit city/ Iraq. The greenhouse and laboratory experiments were conducted in winter of 2023 in the Microbiology lab of the Field Crops department.

Pythium spp. was stored and cultured on an autoclaved Potato Dextrose Agar (PDA) medium in the dark at 20 to $25 \pm 1^\circ\text{C}$. *B. subtilis* was cultivated for two days at $28 \pm 2^\circ\text{C}$ using pour-plate method on nutrient broth medium.

Invitro inhibition of mycelia length growth

The effect of chemical and biotic elicitors on the growth of *Pythium* spp. mycelia in dual-culture techniques was tested, where 100 ppm of Ayzox fungicide, 100 ppm of SA, 20 % of *C. album* water extract and 1×10^6 CFU/ml of *B. subtilis* as 5 ml of each elicitor agent were added separately to 100 ml of thawed P.D.A medium ($40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) that autoclaved for 30 min at 21°C at 15 psi. Prior

to plating, then they mixed properly and then plates inoculated in the center separately with a 0.5 cm with mycelia plugs of *Pythium* spp., the plates for each combination of antagonist/ pathogen were replicated 3 times. As negative controls, 3 Petri dishes were inoculated only with a *Pythium* spp agar disc. After the fungal growth was completed in the control treatment plates, the radial growth and inhibition of mycelial pathogen were calculated according to the formula:

$$\text{Percent inhibition} = \frac{P_c - P_t}{P_c} \times 100$$

Where PC = control plate, and Pt = treatment (radial growth of the pathogen towards the chemical and biotic elicitors).

Preparation of Pathogen Inoculum

This experiment was done by using the protocol which described by Alkooranee et al [13]. Erlenmeyer flasks were incubated at 25°C for 15 days with shaking daily by hand. By using the inoculum source, fungal suspension was adjusted to 1×10^5 fragments mL⁻¹.

Examining elicitors agents on ISR-eliciting potential and disease impact

Experiments were designed under greenhouse conditions as follows: All seeds were rinsed with sterile distilled water. To test the chemical and biotic elicitors they sterilized by 70% ethanol and 1% sodium hypochlorite solution for 1 min 5 min respectively. The sterilized seeds were soaked for 2 hours separately in elicitors suspensions as follows:

- 1- 30 seeds were submerged in distilled sterile water as a control treatment.
- 2- 15 seeds were submerged in 100 ppm of Ayzox fungicide.
- 3- 15 seeds were submerged in 100 ppm of Salicylic acid.
- 4- 15 seeds were submerged in 20 % of *Chenopodium album* extract.
- 5- 15 seeds were submerged in 1×10^6 CFU/ml of *B. subtilis*,

The treated seeds were cultivated as 5 seeds per pot (10-cm-diameter) containing peat moss and sand autoclaved at a ratio of 1:3. Seeds were grown at 22 °C with a cycle of 12 h/12 h light/dark and a light intensity of 150 µE/m² /s.

Flasks of *Pythium* spp. inoculum were prepared in 2.3. paragraph, one day after applying the chemical and biological elicitors, the fungal pathogen inoculum was added to the seeds pots at a rate of 100 ml/pot and then mixed with the upper soil surface. Three duplicates of each treatment were used; three pots remained empty of the pathogen and elicitor agents however, as a control, only three pots inoculated with pathogen. The pots were irrigated twice a week.

Percentage germination (Germ %) evaluated after two weeks from planting:

$$\text{No. of germinated seed /Total number of seeds cultured } 100 \times$$

Thirty days after seed germination, shoot and root lengths (cm), fresh and dry shoot and root plants weight (g) of all seedlings were calculated on a sen-

sitive electronic weighing balance. The seedlings were placed in an electronic oven at 70 °C for 48 hours, and dry weights were recorded as well in this experiment.

Assay of Gene Expression

Twenty days after planting, two leaves were harvested from each treatment, and then frozen in liquid nitrogen. A whole RNA of *B. napus* leaves then extracted, quantitative real time-polymerase chain reaction (qRT-PCR) and first strand cDNA synthesis were performed by using Alkoorane et al [12] protocol. As shown in (Table 1), three primers of *B. napus* were used, consisting *VSP2*, *PR-4* and *PR-5* genes. On the other hand, the housekeeping gene (*GAPDH*) also used in this assay.

Table 1.

qRT-PCR primers used in this study			
	Gene description	Pathway	Primer sequence (5'-3')
<i>PR-5</i>	Pathogenesis-related protein 5	SA	ACCGCCACCATCTTCGTT GCCAGGGCAAATCTCGTT
<i>VSP2</i>	Vegetative storage protein 2	JA	TACCTACTTCCGACCAG TTCTCAGTCCCGTATCCA
<i>PR-4</i>	Hevein-like protein	ET	GCCACCTACCATTACTACAAC TCCAAATCCAATCCTCCA
<i>GAPDH</i>	Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase		CGCTTCCTTCAACATCATTCCCA TCAGATTCTCCTTGATAGCCTT

Data analysis

By using GenStat software, statistical analysis was carried out using the least significant difference tests (LSD), means ($P < 0.05$) were compared between treatments [15].

Results and discussion

Identify the ability of invitro antagonists of biotic and abiotic elicitors

The results of the systemic resistance stimulating factors test showed a high ability to inhibit the growth of the pathogenic fungus in the dual medium culture. When using Ayzox fungicide and (SA), *C. album* water extract and *B. subtilis*, the growth rate of *Pythium* spp. fungus was reached 100%, 51.30%, 93.33% and 100% respectively (Figure 1).

The results of the present study are consistent with the previous studies that reported the fungicides, SA and biotic agents showing inhibition and antagonism against different soil-borne pathogens. Mihajlović et al [16] pointed out

that growth inhibition of *P. aphanidermatum* using chemicals propamocarb-hydrochloride (Previcur 607 SL), mefenoxam (Ridomil gold 480 SL), mancozeb (Mankogal 80 WP) and azoxystrobin (Quadris) were 72.5%, 75.0% 57.5% and 77.5% respectively.

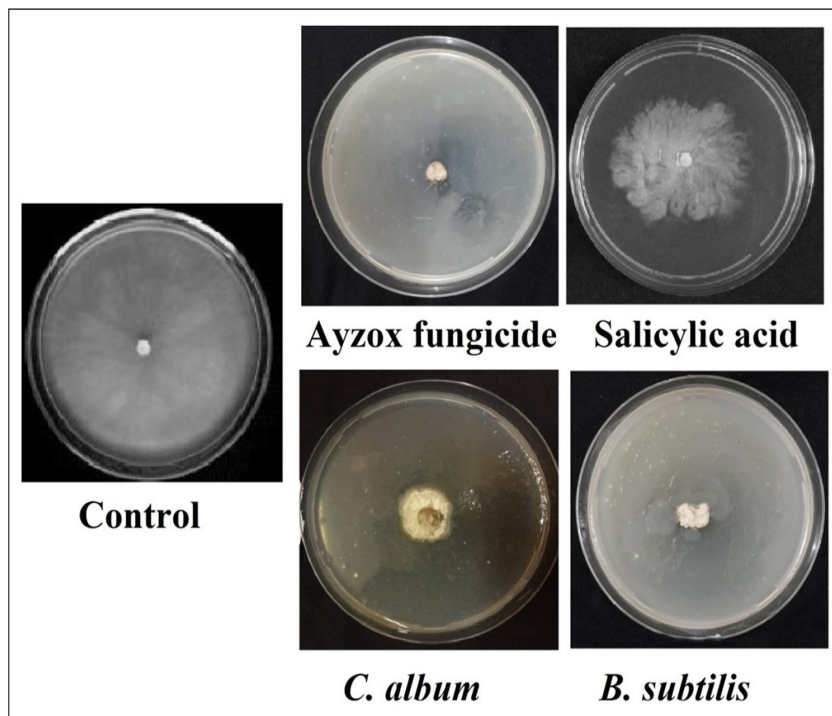


Figure 1. In vitro screening of elicitors agents against *Pythium* spp.

Ali et al [17] indicate that the ability of different root extract concentrations of *C. album* significantly reduced the growth of *Sclerotium rolfsii* fungus and biomass reached 15-58% compared to control. *B. subtilis* inhibited the mycelia growth of soil born fungi, such as *Pythium ultimum*, by up to 86.6 % [18]. Salicylic acid and fungicides, vitavax 200 (V200), rizolex (Rz) and moncut (Mo) either individually or in combinations reduced linear growth (cm) of both *R. solani* and *F. solani* [19].

Bio-elicitors isolates are capable of producing volatile and non-volatile antibiotics, powerful plant degrading enzymes, and production of secondary me-

tabolism compounds such as β -1,3 glucanase and chitinase enzymes. These enzymes lyse the mycelium of fungi by degrading the cell wall of the fungal pathogen [20].

Greenhouse Assays

The results of testing the ability of biological and chemical elicitors to stimulate resistance showed their effectiveness in inducing rapeseed resistance to PRR disease.

The percentage seed germination has been reached 73.33, 66.67, 80.00 and %100 in Ayzox, SA, *C. album* extract and *B. subtilis* and 33.33 % at pathogen treatment. The damping off test reached 0.00% for all elicitors' treatments, but it was 60% at pathogen treatment. However, the results identified that significant differences between vegetative growth parameters as high plant shoot fresh/dry weight and root fresh/dry weight of treated plants relative to comparison treatments (Table 2).

The *B. subtilis* treatment was the best in stimulating growth of the plant compared to the other treatments as the plants' height reached 14.90 cm, shoot fresh/dry weight 6.30 gm and 1.30 gm respectively, while root fresh/dry weight reached 1.54 gm and 0.163 gm (Table 2).

Systemic resistance is defined as the mechanism that protects plants by stimulating their defense against a wide range of pathogens, which is acquired after the presence of a suitable induction factor during infection. Biotic and abiotic elicitors in plants work together to improve plants health; ISR is important mechanisms by which selected PGPR in the rhizosphere system to strengthen the defense in the body of the plant against various pathogens [13]. Abiotic elicitors can be stimulate systemic resistance in plant through SA- signaling pathway and then turn-on gene resistance to pathogens attack [13; 21; 22].

Reports indicated that the plants growth has been effectively increased by the biotic elicitors. Alkooranee et al [6] found out that seed treated with *T. harzianum* increased the resistance and growth of plants. Secondary metabolism of PGPR act as resistance elicitor compound in variety of plants such as siderophore, pyoverdine, rhamnose (lipopolysaccharide), bacterial SA, fucose, flagellins and there enzymes that lead to ISR, including β -1,3-glucanase, chitinase, polyphenol oxidase, peroxidase, phenylalanine ammonia lyase, catalase, lipoxygenase, proteinase inhibitors, superoxide dismutase, and ascorbate peroxidase [23]. In one of the previous studies, the GC-MS analysis of the root extract of *C. album* revealed six compounds, may have an important role in inhibiting the growth of fungismono (2-ethylhexyl) ester, 9-octadecenoic acid (Z)-, 1,2-benzenedicarboxylic acid, methyl ester, methyl ester, and 9-octadecenoic acid (Z)- [17].

Table 2.

**Effect of elicitors agents on growth of oilseed rape infected by *pythium* spp.
in greenhouse conditions**

Treatments	Germ (%)	Damp-ing off (%)	High plant (cm)	Shoot fresh weight (gm)	Root fresh weight (gm)	Shoot dry weight (gm)	Root dry weight (gm)
Control	66.67*	20.00	11.59	4.41	1.32	0.82	0.084
Pathogen	33.33	60.00	7.14	2.37	0.94	0.30	0.034
Ayzox	73.33	0.00	12.73	4.39	1.39	0.76	0.090
Salicylic acid	66.67	0.00	13.92	5.13	1.41	0.92	0.096
<i>C. album</i> extract	80.00	0.00	13.48	5.45	1.30	1.12	0.121
<i>B. subtilis</i>	100	0.00	14.90	6.30	1.54	1.30	0.163
L.S.D	14.15	18.84	3.11	1.62	0.22	0.14	0.013

* Each value is a mean of three replications containing 5 seeds per plate.

Gene Expression

To determine the ability of *B. napus*, both treated and untreated with elicitors, to resist *Pythium* spp., three genes associated with resistant defense in *B. napus* leaves, including *VSP2*, *PR-4* and *PR-5*, have been detected by qRT-PCR technique after twenty days of planting. Hevein-like protein or the putative marker *PR-4* gene used as an indicator for the path of ET signal. While the *PR-5* (Pathogenesis-related protein 5) gene used as an indicator for the path of SA signal, however *VSP2* (Vegetative storage protein 2) used as an indicator for the path of JA signal.

Comparison of the Defense-Signaling Pathways in Healthy *B. Napus* Leaves or Infected By *Pythium* Spp.

Results demonstrated that, twenty days after planting, the high levels of expression of the *PR-5* gene increased by 3.14 -fold (from 1.21- to 3.80-fold) (Figure 2). *VSP2* is anti-pathogenic genes. For *VSP2* gene, the expression level increased in infected plants compared to non-infected ones, with a regulation of 1.28 fold (0.85 to 1.09 fold) (Figure 2).

The expression level of the *PR-4* gene showed that there were significant differences between infected and non-infected *B. napus*. They were up-regulated by 1.72-fold (from 1.12- to 1.93-fold) (Figure 2). It was clearly noticed that the defense response was low in infected plants, enabling the pathogenic fungus to grow rapidly and infect the plants. Low and delayed levels of expression of *PR-4* and *VSP2* genes were affected by the JA/ ET pathway. In fact, *Pythium* spp. saprophytic did not stimulate this pathway. The high level of *PR.5* gene expression may be related to SA pathway, which is induced by pathogenic micro-organisms

and, in turn, induces systemic acquired resistance or (SAR) in the host. Therefore, SAR is characterized by the induction of pathogenesis-related proteins.

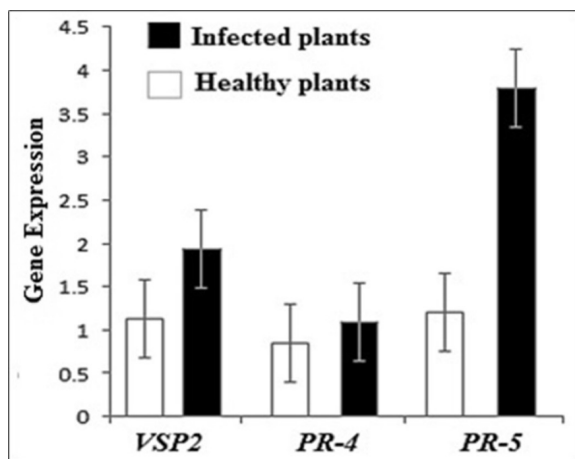


Figure 2. Expression levels of genes related to the resistance response after *B. napus* leaves were infected with *Pythium* spp, total RNA was extracted, cDNA was synthesized and the quantitative real-time polymerase chain reaction (qRT-PCR) was determined for three resistance genes *VSP2*, *PR-4* and *PR-5*

Several previous studies have identified that increased expression levels of resistance genes in oil seed rape genotypes infected with fungal pathogen compared to non-infected plants. The qRT-PCR results showed that the *PDF 1.2*, *AOC3* and *ERF2* genes (marker for the JA/ET signal pathway) expression levels increased in early plants infected by *S. sclerotiorum*, additionally to *PR-1* gene, but the expression levels decreased by *TGA5* and *TGA6* (marker for the SA signal pathway) [12]. The expression levels of resistance gene increased over time in oilseed rape genotypes inoculated with the fungus pathogen *Erysiph curciferarium*, causing powdery mildew disease compared to non-inoculated plants. The expression levels of *PR1* and *PR2* genes increased early in plants infected by *Sclerotinia sclerotiorum* pathogen, while the *PR-3* and *PDF1.2* genes, which serve as indicators for the path of the JA/ET signaling, increased later. This delay is because of the lifestyle of a pathogenic fungus as an obligate parasite [13].

Comparison of The Defense-Signaling Pathways in *B. Napus* Plants Treated And Non-Treated With Elicitors

In plants treated with Ayzox fungicide and infected by *Pythium* spp, the *PR-5* expression level, linked with SA pathway, was up-regulated by 19.06-fold

(3.80- to 72.45-fold) after twenty days of planting (Figure 3-A). However, the expression levels of the *VSP2* and *PR-4* genes were down-regulated in leaves treated with Ayzox fungicide, reaching 1.08-fold (1.93- to 3.20-fold) and 1.08-fold (1.09- to 5.10-fold), respectively (Figure 3-A).

In seeds treated with salicylic acid (SA) and then infected by pathogen after 24 hours, the *PR-5* gene expression level was up-regulated by 31.62.37-fold (Figure 3- B). Nevertheless, the expression levels of *VSP2* and *PR-4* genes showed no significant increase or a slight increase.

The results of gene expression levels in plants infected with *Pythium* spp. after 24 hours of treatment with *C. album* water extract showed that the expression of *VSP2* and *PR-4* genes was increased, being up-regulated by 26.85-fold (from 1.93- to 53.76-fold) and 36.51-fold (from 1.09- to 39.80-fold) respectively. However, the *PR-5* gene expression level in leaves treated with *C. album* water extract increased only slightly, reaching 2.52-fold (from 3.80- to 9.60-fold) (Figure 3-C).

In plants treated with *B. subtilis* and then infected by *Pythium* spp after 24 hours, the expression levels of *VSP2* and *PR-4* increased by 38.36-fold and 80.04-fold respectively. However the expression level of *PR-5* gene in plants was down-regulated by 1.08-fold (Figure 3-D).

Through the above results, it is noticed the success of biotic and abiotic elicitors to ISR in plant inoculated and infected by pathogen. The results showed that the abiotic elicitors depended on SA pathway, while biotic elicitors relied on JA and ET pathways. In plants treated with biotic factors, the genes associated with JA/ET pathway, *VSP2* and *PR-4*, were up-regulated, whereas the resistance gene related to SA-accumulation, *PR-5*, was down-regulated.

Many studies tested the ability of biotic elicitors to induce systemic resistance and activate resistance genes in different plants against many phytopathogens.

Chemicals that work as abiotic elicitors are capable of inducing systemic acquired resistance (SAR). It offers a number of features over current traditional techniques for disease control in plants. Even if only a portion of roots or shoots is sprayed during the seedling stage, the systemic acquired resistance (SAR) would be induced throughout the plant, providing long-term resistance.

The strobilurin fungicide, F500 (Pyraclostrobin), can induce systemic resistance in tobacco plants by acting downstream of SA in the SA signaling mechanism against tobacco mosaic virus (TMV) and *Pseudomonas syringae pv tabaci*, leading to accumulation of *PR-I* proteins in plants infected by TMV or in plants pre-treated with strobilurin fungicide than in the water-pretreated controls [24].

Salicylic acid plays an important role in activating systemic resistance in plants to different pathogens attack by stimulating some genes associated with

resistance. some studies conducted on this issue, including peanut against *Alternaria alternata* [25] and *Curcuma longa* (L.) against *Pythium aphanidermatum* [26]. Salicylic acid is usually crucial in regulating acquired resistance (SAR) in hosts to defend against pathogens, resulting rapid SAR response.

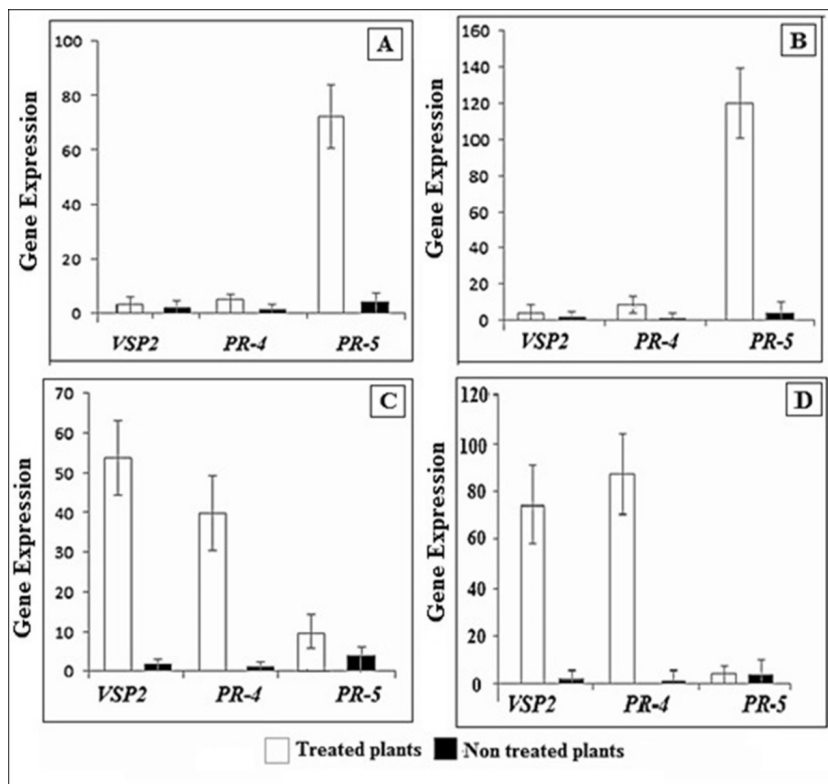


Figure 3. Expression levels of genes related to the resistance response in *B. napus* infected by *Pythium* spp. were treated with biotic and abiotic elicitors (A) Ayzox fungicide, (B) Salicylic acid, (C) *C. album* water extract, (D) *B. subtilis*. total RNA was extracted, cDNA was synthesized and the quantitative real-time polymerase chain reaction (qRT-PCR) was determined for three resistance genes *VSP2*, *PR-4* and *PR-5*.

The accumulation of various pathogenesis-related (PR) proteins suggests that the SA successfully induces systemic resistance in plants inoculated and infected with pathogen. The results indicate that the resistance is dependent on the SA pathway and independent of the JA/ET pathway. Specifically, the resistance gene related to SA

pathway, *PR-5*, was up-regulated in plants treated with SA, while the resistance genes associated with SA-accumulation, such as *VSPE* and *PR-4*, were down-regulated.

Salicylic acid operates through the SA signaling pathway in plants. This may be because SA acts as abiotic elicitor that activates SAR.

PR-1, *PR-2* and *PR-5* genes, which are related to pathogen response and serve as markers for SAR dependent on SA, were examined in the shoots and roots of tomato plants infected by root-knot nematodes (RKNs). The results showed that the expression of these genes was up-regulated in plants pre-treated with SA, enhancing their resistance to the pathogen [27].

Cucurbit powdery mildew, caused by *Podosphaera fusca* fungus, was suppressed by *B. subtilis* UMAF6639, which was tested for its ability to induce systemic resistance in melon plants. This treatment led to the up-regulation of genes related to JA pathway, such as *LOX2* (lipoxygenase 2, as JA signal path indicators) and *PR-9* (peroxidase, as SA and JA signals path indicators). However, the *PR-1* gene, associated with SA pathway, was down-regulated. Before infection by *P. fusca*, plants treated with *B. cereus* UMAF8564 and *B. subtilis* UMAF6639 did not show a significant increase of *LOX2* expression compared to non-treated plants. After infection, the expression levels increased at 24 hpi in plants treated with UMAF8564 and at 48 hpi in those treated with UMAF6639 [28].

Conclusion

In Iraq, synthetic pesticides are widely used to control various field crop diseases. In the present study, the synthetic fungicide (Ayzox) was used to compare its effectiveness with some natural biological and chemical factors. The comparison was made by identifying the expression of resistance genes that rely on two different pathways (SA) and (JA/ETH). The present study showed that biological factors can be used as biocatalysts for systemic resistance, along with natural chemicals such as salicylic acid, which do not harm the environment or pose risks to human and animal health.

The study also demonstrated that the signaling pathways in plants depend on the type of elicitor. It was found that the resistance pathways in both systemic resistance types, ISA and SAR, are influenced by whether the elicitor is chemical or biological, leading to the stimulation of some genes associated with particular paths. The study also revealed that the type of pathogen plays a role in activating certain resistance genes.

References

1. Ho, H.H. (2018). The Taxonomy and Biology of *Phytophthora* and *Pythium*. *Journal of Bacteriology & Mycology: Open Access*, 6, 40-45. <https://doi.org/10.15406/jbmoa.2018.06.00174>

2. van der Plaats-Niterink, A.J. (1981). Monograph of the Genus *Pythium*. *Studies in Mycology*, 21, 1-242. Available at: <https://www.cabi.org/isc/abstract/19821379>
3. Lodhi, A.M., Khanzada, M.A., Shahzad, S., & Ghaffar, A. Prevalence of *Pythium aphanidermatum* in Agro-ecosystem of Sindh province of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 45(2), 635-642.
4. Mohammadi, M., Smith, E.A., Stanghellini, M.E., & Kaundal, R. (2022). Insights into the Host Specificity of a New Oomycete Root Pathogen, *Pythium brassicum* P1: Whole Genome Sequencing and Comparative Analysis Reveals Contracted Regulation of Metabolism, Protein Families, and Distinct Pathogenicity Repertoire. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16): 9002. <https://doi.org/10.3390/ijms22169002> EDN: <https://elibrary.ru/nxmwf>
5. Khoshru, B., Mitra, D., Joshi, K., Adhikari, P., Rion, M.S.I., Fadiji, A.E., Alizadeh, M., Priyadarshini, A., Senapati, A., Sarikhani, M.R., Panneerselvam, P., Mohapatra, P.K.D., Sushkova, S., Minkina, T., & Keswani, C. (2023). Decrypting the multi-functional biological activators and inducers of defense responses against biotic stresses in plants. *Heliyon*, 9(3), e13825. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13825> EDN: <https://elibrary.ru/uhrhdb>
6. Alkooranee, J.T., Kadhum, N.N., Aledan, T.R., & Al farhan, I.M.H. (2017). Induced Systemic Resistance in Oilseed Rape by Some Bio-Elicitors Agents Against Rot Roots Diseases Caused by *Rhizoctonia solani*. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 5(3), 1-9. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2953>
7. Alkooranee, J.T. (2020). Activity of Leaves and Root Extracts of *Chenopodium album* against Damping-off disease on Bread Wheat under Greenhouse Conditions. *Plant Archives*, 20(1), 1479-1482.
8. Alkooranee, J.T., Al-khshemawee, H.H., Al-badri, M.A.K., Al-srai, M.S., & Daweri, H.H. (2020). Antifungal activity and GC-MS detection of leaves and roots parts of *Chenopodium album* extract against some phytopathogenic fungi. *Indian Journal of Agricultural Research*, 54, 117-121.
9. Yu, Y., Gui, Y., Li, Z., Jiang, C., Guo, J., & Niu, D. (2022). Induced Systemic Resistance for Improving Plant Immunity by Beneficial Microbes. *Plants (Basel)*, 11(3), 386. <https://doi.org/10.3390/plants11030386> EDN: <https://elibrary.ru/cvmmdo>
10. Verhagen, B.W., Glazebrook, J., & Zhu, T. (2007). The transcriptome of rhizobacteria-induced systemic resistance in *Arabidopsis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 17, 895-908.
11. Spoel, S.H., Koornneef, A., & Claessens, S.M. (2003). NPR1 modulates cross-talk between salicylate- and jasmonate-dependent defense pathways through a novel function in the cytosol. *Plant Cell*, 15, 760-770.

12. Alkoorane, J.T., Yin, Y., Aledan, T.R., Jiang, Y., Lu, G., Wu, J., & Li, M. (2015). Systemic Resistance to Powdery Mildew in Brassica napus (AACC) and Raphanus alboglabra (RRCC) by Trichoderma harzianum TH12. *PLoS ONE*, 10(11), e0142177. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142177>
13. Alkoorane, J.T., Aledan, T.R., Ali, A.K., Zhang, X., Wu, J., Fu, C., & Li, M. (2017). Detecting the Hormonal Pathways in Oilseed Rape behind Induced Systemic Resistance by Trichoderma harzianum TH12 to Sclerotinia sclerotiorum. *PLoS ONE*, 12(1), e0168850. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168850> EDN: <https://elibrary.ru/yxmkmn>
14. Abdul Malik, N.A., Kumar, I.S., & Nadarajah, K. (2020). Elicitor and Receptor Molecules: Orchestrators of Plant Defense and Immunity. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 963. <https://doi.org/10.3390/ijms21030963> EDN: <https://elibrary.ru/ixvxgs>
15. Gomez, K.A., & Gomez, A.A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2nd Edition. John Wiley and Sons, Inc., London, pp. 13-175.
16. Mihajlović, M., Rekanović, E., Hrustić, J., Tanović, B., Potočnik, I., Stepanović, M., & Milijašević-Marčić, S. (2013). In Vitro and In Vivo Toxicity of Several Fungicides and Timorex Gold Biofungicide to *P. aphanidermatum*. *Pesticides and Phytomedicine (Belgrade)*, 28(2), 117-123.
17. Ali, A., Javaid, A., & Shoaib, A. (2017). GC-MS Analysis and antifungal activity of methanolic root extract of *Chenopodium album* against *Sclerotium rolfsii*. *Planta Daninha*, 35, e017164713.
18. El-Mohamedy, R.S.R. (2012). Biological control of Pythium root rot of broccoli plants under greenhouse conditions. *Journal of Agricultural Technology*, 8(3), 1017-1028.
19. Mohamed, G.M., & Amer, S.M. (2014). Application of Salicylic acid and some fungicides as seed treatment for controlling damping-off and root rot disease of squash and cantaloupe plants under field conditions. *Journal of Plant Protection and Pathology*, 5(12), 1025-1043.
20. Ahmed, J.S., & Baker, R. (1987). Competitive saprophytic ability and cellulolytic activity of rhizosphere competent mutants of *Trichoderma harzianum*. *Phytopathology*, 77, 358-362.
21. Kojima, H., Hossain, M.M., Kubota, M., & Hyakumachi, M. (2013). Involvement of the salicylic acid signaling pathway in the systemic resistance induced in Arabidopsis by plant growth-promoting fungus *Fusarium equiseti* GF19-1. *Journal of Oleo Science*, 62(6), 415-426.
22. Ding, L.N., Li, Y.T., Wu, Y.Z., Li, T., Geng, R., Cao, J., Zhang, W., & Tan, X.L. (2022). Plant Disease Resistance-Related Signaling Pathways: Recent Prog-

- ress and Future Prospects. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 16200. <https://doi.org/10.3390/ijms232416200> EDN: <https://elibrary.ru/xrahnv>
23. Annapurna, K., Kumar, A., Kumar, L.V., Govindasamy, V., Bose, P., & Ramadoss, D. (2012). PGPR-Induced Systemic Resistance (ISR) in Plant Disease Management. *Bacteria in Agrobiological: Disease Management*, pp. 405-425.
24. Herms, S., Seehaus, K., Koehle, H., & Conrath, U. (2020). A Strobilurin Fungicide Enhances the Resistance of Tobacco against Tobacco Mosaic Virus and *Pseudomonas syringae* pv. tabaci. *Plant Physiology*, 130(1), 120-127. <https://doi.org/10.1104/pp.004432>
25. Chitra, K., Ragupathi, K.N., Dhanalakshmi, P., Mareeshwari, N., Indra, A., Kamalakannan, A., Sankaralingam, & Rabindran, R. (2007). Salicylic Acid Induced Systemic Resistance on Peanut against *Alternaria alternata*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 41(1), 50-56. <https://doi.org/10.1080/03235400600655263>
26. Radhakrishnan, N., & Balasubramanian, R. (2008). Salicylic acid induced defence responses in *Curcuma longa* (L.) against *Pythium aphanidermatum* infection. *Crop Protection*, 28(11), 974-979.
27. Molinari, S., Fanelli, E., & Leonetti, P. (2014). Expression of tomato salicylic acid (SA) responsive pathogenesis-related genes in Mi-1-mediated and SA-induced resistance to root-knot nematodes. *Molecular Plant Pathology*, 15(3), 255-264. <https://doi.org/10.1111/mpp.12085> EDN: <https://elibrary.ru/wqzbtl>
28. García-Gutiérrez, L., Zerriouh, H., Romero, D., Cubero, J., Vicente, A., & Pérez-García, A. (2013). The antagonistic strain *Bacillus subtilis* UMAF6639 also confers protection to melon plants against cucurbit powdery mildew by activation of jasmonate- and salicylic acid-dependent defence responses. *Microbial Biotechnology*, 6(3), 264-274. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12028>

DATA ABOUT THE AUTHOR

Jawadayn Talib Alkoorane

Plant Department, College of Agriculture, Wasit University

Wasit, Iraq

jalkooranee@uowasit.edu.iq

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2997-4637>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Jawadayn-Alkoorane>

Scopus Author ID: 56951124900

Поступила 16.10.2024

После рецензирования 25.11.2024

Принята 29.12.2024

Received 16.10.2024

Revised 25.11.2024

Accepted 29.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1179

EDN: JTMKKJ

UDC 633.853



Original article

PRODUCTIVITY OF WINTER GRAIN CROPS VARIETIES AND THEIR CULTIVATION EFFICIENCY DEPENDING ON THE USE OF AGROCHEMICALS IN THE NON-BLACK EARTH REGION CONDITIONS

*D.V. Vinogradov, E.M. Dedova, A.S. Shkurkina,
T.V. Zubkova, E.I. Lupova*

Abstract

Background. Considering that winter wheat and rye are among the important and main agricultural crops in the region, which are grown for food and feed purposes, the task was to increase its yield and grain quality, as well as to study the possibility of increasing the survival of crops after wintering. One of the ways to increase the survival of plants for the spring period and for harvesting in general is the use of various organomineral fertilizers in agroecosystems. Such a preparation can be agrochemical Arksoil, KKR in various doses, which is used as seed treatment before sowing and when spraying during the growing season of the crop. With the advent of new, promising varieties of winter wheat and rye, which require agroecological testing in conditions of a specific terrain in combination with organomineral fertilizers, it becomes possible to increase the productivity of winter grain crops, and this was the subject of these scientific experiments.

Materials and methods. Research methods and methodology were based on the generalization of scientific sources of domestic and foreign authors, conducting laboratory and field studies, phenological observations, records, according to recommendations and generally accepted methods, using correlation and statistical analysis of the obtained experimental data. Microsoft Office Excel 10 was used for statistical work.

Results. In conditions of the Non-Black Earth Region in 2021-2023, the highest yield level in experimental variants was shown by winter wheat variety Grom. In the variant without treatment, the average yield of winter wheat of Grom variety was 43.3 dt/ha, in variants with the use of organomineral fertilizer with growth-stimulating activity Arksoil KKR at dosages of 80 ml/ha and 120 ml/ha, respectively, it was 46.0 dt/ha and 47.7 dt/ha. Treatment with an agrochemical in the fall during the tillering period affected the survival rate by spring, increasing this indicator by 5.6-19.8% to 86.0-79.5%. On average, the maximum survival of plants was revealed in variants Grom + Arksoil KKR,

120 ml/ha (79.5%), Ethana + Arksoil KKR, 120 ml/ha (74.6%), Grom + Arksoil KKR, 80 ml/ha (75.0%). Relatively low overwintering of winter wheat plants was noted for varieties Lipetskaya Zvezda and Torrild. In the experiment, the most effective fertilizer in increasing the productivity of winter rye was Folirus Active, the variants of which had the maximum yield recorded among the hybrids. Among the studied winter rye hybrids, higher yields were shown by plots of ZU Forzetti hybrid, from 32.6 to 41.4 dt/ha; low productivity was revealed for Eterno hybrid, from 28.1 to 32.6 dt/ha.

Conclusion. The use of organomineral fertilizer Arksoil KKR on all studied varieties provided a significant increase in the yield, as well as an increase in the economic efficiency of winter wheat grain production. The maximum economic effect was demonstrated by the technology of growing winter wheat of Grom variety with the introduction of agrochemical Arksoil KKR at a dosage of 120 ml/ha. In the studies conducted in agrocenoses of winter rye, the efficiency of all used organomineral fertilizers was observed. The maximum efficiency was revealed in the variant of growing winter rye ZU Forzetti + Folirus Active (41.4 dt/ha), Eterno + Folirus Active (32.6 dt/ha), Ravo + Folirus Active (35.7 dt/ha). The role of the studied organomineral fertilizers in experiments with winter wheat and rye in conditions of the Non-Black Earth Region was proven.

Keywords: winter wheat; winter rye; variety; Non-Black Earth Region; organomineral fertilizer; yield; productivity; economic efficiency

For citation. Vinogradov, D. V., Dedova, E. M., Shkurkina, A. S., Zubkova, T. V., & Lupova, E. I. (2025). Productivity of winter grain crops varieties and their cultivation efficiency depending on the use of agrochemicals in the non-black earth region conditions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 268-282. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1179>

Научная статья

УРОЖАЙНОСТЬ СОРТОВ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ АГРОХИМИКАТОВ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

*Д.В. Виноградов, Е.М. Дедова, А.С. Шкуркина,
Т.В. Зубкова, Е.И. Лупова*

Аннотация

Обоснование. Учитывая, что озимая пшеница и рожь относятся к числу важных и основных сельскохозяйственных культур в регионе, которые выра-

щаются в продовольственных и кормовых целях, была поставлена задача повысить их урожайность и качество зерна, а также изучить возможность повышения выживаемости посевов после зимовки. Одним из способов повысить приживаемость растений к весеннему периоду и к сбору урожая в целом является применение в агроценозах различных органоминеральных удобрений. Таким препаратом может быть агрохимикат Arksoil, KKR в различных дозах, который используется в качестве обработки семян перед посевом и при опрыскивании в период вегетации культуры. С появлением новых, перспективных сортов озимой пшеницы и ржи, которые требуют агроэкологического тестирования в условиях конкретной местности в сочетании с органоминеральными удобрениями, становится возможным повысить урожайность озимых зерновых культур, что и было предметом данных научных экспериментов.

Материалы и методы. Методы и методология исследования были основаны на обобщении научных источников отечественных и зарубежных авторов, проведении лабораторных и полевых исследований, фенологических наблюдений, учетов, согласно рекомендациям и общепринятым методикам, с использованием корреляционного и статистического анализа полученных экспериментальных данных. Для статистической работы использовался Microsoft Office Excel 10.

Результаты. В условиях Нечерноземья в 2021-2023 годах самый высокий уровень урожайности в опытных вариантах показал сорт озимой пшеницы Гром. На варианте без обработки средняя урожайность озимой пшеницы сорта Гром составила 43,3 ц/га, на вариантах с применением органоминерального удобрения со стимулирующей рост активностью Arksoil KKR в дозировках 80 мл/га и 120 мл/га соответственно - 46,0 ц/га и 47,7 ц/га./га. Обработка агрохимикатом осенью в период кушения повлияла на приживаемость к весне, увеличив этот показатель на 5,6-19,8% до 86,0-79,5%. В среднем максимальная приживаемость растений была выявлена в вариантах Grom + Arksoil KKR, 120 мл/га (79,5%), Ethana + Arksoil KKR, 120 мл/га (74,6%), Grom + Arksoil KKR, 80 мл/га (75,0%). Относительно низкая перезимовка растений озимой пшеницы была отмечена у сортов Липецкая Звезда и Торрилд. В эксперименте наиболее эффективным удобрением для повышения урожайности озимой ржи был Фолирус Актив, у вариантов которого была зафиксирована максимальная урожайность среди гибридов. Среди изученных гибридов озимой ржи более высокую урожайность показали участки с гибридом ZU Forzetti - от 32,6 до 41,4 ц/га; низкая урожайность была выявлена у гибрида Eterno - от 28,1 до 32,6 ц/га.

Вывод. Применение органоминерального удобрения Arksoil KKR на всех изучаемых сортах обеспечило значительное повышение урожайности, а также повышение экономической эффективности производства зерна озимой пшени-

цы. Максимальный экономический эффект продемонстрировала технология выращивания озимой пшеницы сорта Гром с внесением агрохимиката Arksoil KKR в дозировке 120 мл/га. В исследованиях, проведенных в агроценозах озимой ржи, была отмечена эффективность всех применяемых органоминеральных удобрений. Максимальная эффективность была выявлена в варианте выращивания озимой ржи ZU Forzetti + Folirus Active (41,4 ц/га), Eterno + Folirus Active (32,6 ц/га), Ravo + Folirus Active (35,7 ц/га). Доказана роль изучаемых органоминеральных удобрений в опытах с озимой пшеницей и рожью в условиях Нечерноземья.

Ключевые слова: озимая пшеница; озимая рожь; сорт; Нечерноземье; органоминеральное удобрение; урожайность; продуктивность; экономическая эффективность

Для цитирования. Виноградов, Д.В., Дедова, Е.М., Шкуркина, А.С., Зубкова, Т.В., & Лупова, Е.И. (2025). Урожайность сортов озимых зерновых культур и эффективность их возделывания в зависимости от применения агрохимикатов в условиях Нечерноземья. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 268-282. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1179>

Introduction

Winter wheat and rye are the most common grain crops for the Non-Black Earth Region. They are grown in all categories of farms and in all soil and climatic zones of the region.

According to official data from Rosstat, 155.3 thousand hectares were sown in Ryazan region in 2023, which, however, was significantly (55.6%) less than in 2022. Nevertheless, winter wheat crops in terms of the total area of agricultural crops in Ryazan region made up about 46% and more than 97% of the total area of winter crops. In general, in the Russian Federation in 2023, winter wheat crops amounted to more than 15.650 thousand hectares or 19.3% of the total sown area in all categories of farms. Unfavorable wintering conditions for the 2022/2023 season in the Non-Black Earth Region, when an ice crust was observed, affected the crop yield, where some of the crops simply died.

Winter wheat, due to its morphological and biological characteristics, showed good yield in conditions of the Non-Black Earth Region of the Russian Federation. Thus, according to the results of the 2023 harvesting campaign, the average yield of winter wheat in Ryazan region in farms of all categories amounted to 39.5 dt/ha, which was 7.8 dt/ha or 19.7% lower than the last year's level in conditions of Moscow region - 38.0 dt/ha.

Analysts noted a decrease in this indicator in 2023 compared to 2022 and in Russia as a whole by 8.1%. Nevertheless, over the past 6 years, this was the

second largest harvest of winter wheat, and experts called unfavorable weather conditions, worsening phytosanitary conditions, and the lack or poor quality of herbicide treatments as the reasons for the shortfall in 2023.

During the development process, winter wheat forms are most demanding of macronutrient reserves, such as nitrogen, potassium and phosphorus. The most significant consumption of nitrogenous substances occurs during the period of tube emergence before the wheat earing phase [1; 2; 3]. Nitrogen is responsible for the growth of the aboveground mass, the growth of the root system activates phosphorus, and potassium strengthens the plant stem [4]. For the conditions of Ryazan region, the application of nitrogen-phosphorus fertilizers must be carried out under cultivation or pre-sowing cultivation [5; 6]. The balance of nutritional elements is especially important in the initial period of growth and development of winter wheat; in its absence, all further fertilizing will be ineffective.

In recent years, the use of microbiological fertilizers and humates, which are used as foliar feeding and as seed treatment before sowing, has been greatly developed in crop cultivation technologies [7; 8; 9]. Biological fertilizers significantly increase grain yield and quality. They are cheap preparations compared to mineral fertilizers, and are relatively environmentally friendly agrochemicals [10; 11; 12]. The use of biological fertilizers is an important way to increase the yield and quality indicators of agricultural grain [13; 14; 15].

In recent years, varieties “Angelina”, “Lipetskaya Zvezda”, “From”, “Etana” and “Torid” have occupied ever larger areas in Ryazan region, demonstrating stable yields above the regional average. Thus, in 2023, Angelina variety occupied an area of more than 20 thousand hectares in Ryazan region, and Grom variety occupied more than 10 thousand hectares. Etan and Lipetskaya Zvezda varieties also proved themselves well in the region, although they are not included in the State Register of Breeding Achievements of the Central (3) Region. In the production conditions of Ryazan region, all varieties are characterized by high quality indicators and high winter hardiness, in connection with which the regional producers are interested in growing these varieties and developing elements of agricultural technologies that contribute to increasing crop yields.

Thus, determining the efficiency of biological fertilizers in winter wheat agrocenoses in conditions of the southern part of the Non-Black Earth Region is a relevant area of research, which served as the subject of these studies.

The purpose of the work was to identify the efficiency of using organomineral fertilizers on the yield of winter grain crops in conditions of the Non-Black Earth Region of Russia.

Scientific novelty. For the first time in conditions of the Non-Black Earth Region of Russia, an agroecological assessment of winter wheat varieties Angelina, Lipetskaya Zvezda, Grom, Etana, Torrild to Moskovskaya 56 standard was given, and the reaction of the crop to treatment with the organomineral fertilizer Arksoil KKR was studied at two rates of application of the preparation: 80 ml/ha and 120 ml/ha.

In conditions of the Non-Black Earth Region of Russia, studies on agroecological testing of winter wheat varieties against the background of the crop's response to treatment with organomineral fertilizer Arksoil KKR had not been previously conducted. For the first time in winter wheat agrocenoses in conditions of Ryazan region, the effect of agrochemical Arksoil KKR was studied. It was a new anti-stress preparation created on the basis of a combination of indoleacetic acid, aliphatic amino acid, aliphatic dicarboxylic amino acid and auxins.

In conditions of the Non-Black Earth Region, the efficiency of growing winter rye with treatment with agrochemicals in the complex of ZU Forzetti + Folirus Active, Eterno + Folirus Active, Ravo + Folirus Active was proved.

Materials and methods

These studies on the agroecological assessment of winter wheat and rye and treatment with agrochemicals were carried out in conditions of the Non-Black Earth Region of Russia in 2021-2023.

Two multifactorial field experiments were conducted:

Experiment 1 – Studying the effect of the agrochemical Arksoil KKR on the productivity of winter wheat varieties in conditions of Ryazan region (experimental agrotechnological station of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ryazan State Agricultural University, Stenkino settlement, Ryazan district, Moscow region).

Experiment 2 – Determining the productivity of winter rye hybrids depending on the treatment with agrochemicals (experimental field of the All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Barybino settlement, Domodedovo district, Moscow region).

The agrochemical composition of the experimental dark gray forest soil in Ryazan region was as follows: humus (according to Tyurin) - 3.54-3.86%, mobile phosphorus and potassium (according to Kirsanov) - 149-157 mg/kg and 129-136 mg/kg, respectively, pH - 5.49-5.59. The agrochemical composition of the experimental sod-podzolic soil in Moscow region was as follows: humus (according to Tyurin) - 2.2-2.3%, mobile phosphorus and potassium (according to Kirsanov) - 128-132 mg/kg and 108-124 mg/kg, respectively, pH - 5.5.

Agrotechnical operations for growing winter grain crops were generally accepted for the Non-Black Earth Region.

Experiment 1. The following winter wheat varieties were used as factor A in the experiment: Moskovskaya 56 (standard), Bezostaya 100, Lipetskaya Zvezda, Tanya, Torrild, Shkola, Ethana, which were sown after peas for grain with a seeding rate of 5.1 million pcs/ha. Ammophoska was added as background nutrition at a dose of 1 dt/ha during sowing, and ammonium nitrate was applied by scattering in early spring at 35 kg s.d./ha. Variants of treatment with agrochemical Arksoil KKR at two consumption rates of 80 ml/ha and 120 ml/ha were used as factor B. Uniform spraying with Arksoil KKR was carried out in the evening, pre-adding the preparation to water with subsequent intensive mixing. Arksoil KKR was applied to winter wheat crops twice: the first time in the autumn during the tillering phase, the second time in the spring during the flag leaf phase of the crop. This agrochemical was used for experimental crops in a tank mixture with insecticide Euphoria, KS, 0.2 l/ha (lambda-cyhalothrin, 106 g/l + Thiamethoxam, 141 g/l) against a complex of pests and herbicide Shansti, VDG, 0.025 kg/ha (750 g/kg thifen-sulfuron-methyl) in the tillering phase of the crop. The consumption of the working tank liquid was 250-280 l/ha.

In experiment 2 with winter rye, factor A was winter rye hybrids ZU Forzetti, Ravo, Eterno. Factor B was treatment of plants during the growing season with agrochemicals Lebozol, Arksoil KKR, Folirus Aktiv, Folirus Maxi, which were applied as foliar feeding twice during the crop growing season: in the early autumn period - in the tillering phase at a dose of 2 l/ha and in the spring - during the development of the flag leaf - the beginning of heading - 3 l/ha. Arksoil KKR was processed in the same phases at a dose of 0.15 l/ha. Agrochemicals were applied together with pesticides at a liquid consumption of 300 l/ha. During the growing season, insecticides Borey Neo, 0.2 l/ha; Titul KKR, 390, 0.26 l/ha and Primadonna Super, KKR, 0.7 l/ha were used.

The experiments were laid out according to the method of B.A. Dospekhov, where the plot area was 100 m².

Results and discussion

Analyzing the phenological data in the studies conducted in Ryazan region, we noted that the vegetation period of the studied varieties of winter wheat was 296-314 days. In general, in 2022, winter wheat ripened 8-14 days earlier (in the third decade of July) than in 2023 (the first decade of August). On average, over two years, the vegetation period of the standard variety - Moskovskaya

56 was 304 days. Varieties Grom (279 days) and Lipetskaya Zvezda (288 days) turned out to be earlier ripening in the experiment.

The variants with treatment with Arksoil KKR were characterized by a longer vegetation period, on average, 4-6 days longer than in the control variant. When treated with agrochemical Arksoil, the interphase period of the flag leaf emergence - earing - was significantly extended, as well as the ripening period in the milk ripeness phase of the grain in the crop was extended. Later ripening was noted in the variants with Arksoil KKR treatment, 120 ml/ha for varieties Angelina (8 days more than the control), Torrild and Ethana (6-7 days more).

The yield of winter wheat varieties consisted of the yield structure indicators, mainly due to the weight of 1 000 seeds, the number of seeds in an ear, as well as plant density taking into account better overwintering of plants. An increase in the overwintering of wheat was revealed in variants with treatment with Arksoil, KKR with doses of 80 ml/ha and 120 ml/ha, relative to the control. Thus, treatment with an agrochemical in the fall during the tillering period affected the survival rate by spring, increasing this indicator by 5.6-19.8% to 86.0-79.5%. On average, the maximum survival of plants was revealed in variants Grom + Arksoil KKR, 120 ml/ha (79.5%), Ethana + Arksoil KKR, 120 ml/ha (74.6%), Grom + Arksoil KKR, 80 ml/ha (75.0%). Relatively low overwintering of winter wheat plants was noted for Lipetskaya Zvezda and Torrild varieties.

In the 2022/2023 season, the worst wintering in the last ten years was noted in Ryazan region. That winter, there was a frequent change of thaws and high negative temperatures, which led to the rupture of wheat plant tissues and the death of winter grain crops. By spring, winter crops in many farms in the region were completely destroyed by the ice crust, which led to re-sowing of wheat with other spring crops. We noted the relatively good wintering of experimental crops for all varieties of winter wheat, at the same time, the 2023 harvest was lower than in 2022, which affected the average values for experimental variants (Table 1).

Table 1.

**The yield of winter wheat varieties depending on the use of agrochemical
Arksoil KKR, dt/ha**

Variety (factor A)	Variants for using agrochemicals (factor B)		
	Without treatment	Arksoil KKR, 80 ml/ha	Arksoil KKR, 120 ml/ha
Moskovskaya 56	40.1	41.8	43.4
Angelina	41.0	43.2	44.4
Grom	43.3	46.0	47.7
Lipetskaya Zvezda	40.7	41.7	42.0

Torrild	34.2	36.3	38.6
Ethana	42.5	44.6	47.0
LSD ₀₅ , AB interactions: 2022 – 4.58; 2023 – 4.31. LSD ₀₅ , by factor A: 2022. – 4.58; 2023 – 2.49. LSD ₀₅ , by factor B: 2022 – 4.58; 2023 – 1.76. Sx: 2022 – 1.61; 2023 – 1.52. Sd: 2022 – 2.28; 2023 – 2.15.			

Analyzing the data in Table 1, one can draw the following conclusion: the highest yield in all three experimental variants was shown by winter wheat variety Grom. In the variant without treatment, the average yield of winter wheat of Grom variety was 43.3 dt/ha, in variants with the use of organomineral fertilizer with growth-stimulating activity Arksoil KKR at doses of 80 ml/ha and 120 ml/ha, respectively, it was 46.0 dt/ha and 47.7 dt/ha. The variety that showed the minimum yield in all three experimental variants was Torrild, which was explained by its morphological and production characteristics and agronomic traits.

In general, it can be noted that the yield of winter wheat of all studied varieties in variants with the use of organomineral fertilizer Arksoil KKR at a dosage of 120 ml/ha turned out to be higher than the variant with the use of this agrochemical at a dosage of 80 ml/ha.

An important criterion for the feasibility of a particular agrotechnical technique, an element of improving the technology of cultivating an agricultural crop, is economic efficiency, which is expressed in the growth of profits and the level of profitability of the industry.

The economic efficiency of winter wheat cultivation depending on the variety and the use of organomineral fertilizer with growth-stimulating activity Arksoil KKR at dosages of 80 ml/ha and 120 ml/ha is considered in Table 2.

Table 2.

Economic efficiency of winter wheat cultivation depending on the variety and application of organomineral fertilizer Arksoil KKR

Variety	Variant	Yield, dt/ha	Production costs, rub/ha	Cost, rub/ha	Profit from sales, rub/ha	Profitability level, %
Moskovskaya 56	Without treatment	40.1	27 123	43 308	16 185	59.7
	Arksoil KKR, 80 ml/ha	41.8	27 331	45 144	17 813	65.2
	Arksoil KKR, 120 ml/ha	43.4	27 435	46 872	19 437	70.8

Angelina	Without treatment	41.0	27 123	44 280	17 157	63.3
	Arksoil KKR, 80 ml/ha	43.2	27 331	46 656	19 325	70.7
	Arksoil KKR, 120 ml/ha	44.4	27 435	47 952	20 517	74.8
Grom	Without treatment	43.3	27 123	46 764	19 641	72.4
	Arksoil KKR, 80 ml/ha	46.0	27 331	49 680	22 349	81.8
	Arksoil KKR, 120 ml/ha	47.7	27 435	51 516	24 081	87.8
Lipetskaya Zvezda	Without treatment	40.7	27 123	43 956	16 833	62.1
	Arksoil KKR, 80 ml/ha	41.7	27 331	45 036	17 705	64.8
	Arksoil KKR, 120 ml/ha	42.0	27 435	45 360	17 925	65.3
Torrild	Without treatment	34.2	27 123	36 936	9 813	36.2
	Arksoil KKR, 80 ml/ha	36.3	27 331	39 204	11 873	43.4
	Arksoil KKR, 120 ml/ha	38.6	27 435	41 688	14 253	52.0
Ethana	Without treatment	42.5	27 123	45 900	18 777	69.2
	Arksoil KKR, 80 ml/ha	44.6	27 331	48 168	20 837	76.2
	Arksoil KKR, 120 ml/ha	47.0	27 435	50 760	23 325	85.0

The data in Table 2 showed that the use of organomineral fertilizer with growth-stimulating activity Arksoil KKR in the technology of winter wheat cultivation at doses of 80 ml/ha and 120 ml/ha on all the studied varieties led to an increase in the economic efficiency of production.

At the same time, on all varieties of winter wheat, the dosage of 120 ml/ha provided greater profitability than the dosage of 80 ml/ha. Agrochemical Arksoil KKR at a dosage of 120 ml/ha showed its best efficiency on winter wheat varieties Grom and Ethana. In the first case, it had profitability of grain production at the level of 87.8%, in the second case, at the level of 85%.

In experiment 2 with winter rye hybrids, the efficiency of using all agrochemicals in the studies was revealed (Table 3).

Table 3.

The yield of winter rye hybrids depending on the use of agrochemicals, dt/ha

Treatment variant	Yield, dt/ha		
	ZU Forzetti	Eterno	Ravo
Without treatment	32.6	28.1	28.5
Arksoil KKR	37.6	30.3	31.3
Lebozol - Complete Care	36.3	28.6	29.7
Folirus Active	41.4	32.6	35.7
Folirus Maxi	34.8	29.8	31.6
LSD ₀₅ , AB interactions: 2022 – 1.32; 2023 – 2.79.			

Among the studied winter rye hybrids, plots of ZU Forzetti hybrid showed higher yields, from 32.6 to 41.4 dt/ha; low productivity was revealed for Eterno hybrid, from 28.1 to 32.6 dt/ha.

The most effective fertilizer in increasing rye productivity was Folirus Aktive, on variants of which the maximum yield was recorded for hybrids: ZU Forzetti + Folirus Aktive (41.4 dt/ha), Eterno + Folirus Aktive (32.6 dt/ha), Ravo + Folirus Aktive (35.7 dt/ha). Relatively high yield indicators were revealed on variants with Arksoil KKR for all hybrids (37.6-30.3 dt/ha) and Lebozol (36.3 dt/ha for ZU Forzetti hybrid), Folirus Maxi (29.3 dt/ha for Eterno and 31.6 dt/ha for Ravo).

Growing ZU Forzetti rye hybrid showed the profitability of the technology at the level of 107.4%, Eterno hybrid had 63.3%, Ravo hybrid had 78.9%.

Conclusion

Thus, the experiments showed that of the six winter wheat varieties studied, in the Non-Black Earth Region, Grom and Ethana varieties showed the best yield results. The use of organomineral fertilizer Arksoil KKR on all the studied varieties provided not only an increase in the yield, but also an increase in the economic efficiency of grain production. The maximum economic effect was demonstrated by the technology of growing winter wheat of Grom variety with the introduction of agrochemical Arksoil KKR at a dosage of 120 ml/ha. In the studies conducted in winter rye agroecosystems, we noted the efficiency of all applied organomineral fertilizers. The maximum efficiency was revealed in the variant of growing winter rye ZU Forzetti + Folirus Aktive (41.4 dt/ha), Eterno + Folirus Aktive (32.6 dt/ha), Ravo + Folirus Aktive (35.7 dt/ha).

The results of the research allow to conclude that it is advisable to include various organomineral fertilizers as an element of the technologies for producing winter rye and winter wheat grain in conditions of the Non-Black Earth Region.

References / Список литературы

1. Bakulina, G., Fedoskin, V., Pikushina, M., Kukhar, V., & Kot, E. (2020). Factor analysis models in enterprise costs management. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 14, 232-240. <https://doi.org/10.46300/9106.2020.14.34> EDN: <https://elibrary.ru/kwoplo>
2. Nakayeva, A.A., & Okazova, Z.P. (2017). On the competitiveness of field crops. *Successes of Modern Science*, 2(12), 191-195.
3. Vinogradov, D.V., & Zubkova, T.V. (2022). The use of organic fertilizers based on waste mushroom compost in agricultural crop production technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1010(1), 012013.
4. 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 bio diagnostics. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.36), 929. EDN: <https://elibrary.ru/ycwjby>
5. Ilinskiy, A., Vinogradov, D., Politaeva, N., & Badenko, V. (2023). Features of the phytoremediation by agricultural crops of heavy metal contaminated soils. *Agronomy*, 13(1), 127.
6. 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/e3s-conf/202021004003> EDN: <https://elibrary.ru/xduvar>
7. 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.
8. Vinogradov, D.V., Naumtseva, K.V., & Lupova, E.I. (2019). Use of biological fertilizers in white mustard crops in the non-Chernozem zone of Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 341(1), 012204.
9. Lupova, E.I., Sazonkin, K.D., & Vinogradov, D.V. (2021). Yield of winter rape in Ryazan region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723, 022031.
10. 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 Humustim. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, 23(5), 816-819.
11. 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.
12. Zubkova, T.V., Vinogradov, D.V., & Dubrovina, O.A. (2022). Effect of zeolite on the micro-morphological and biochemical features of the spring rapeseed

- (*Brassica napus* L.). *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 54(1), 153-164. <https://doi.org/10.54910/SABRAO2022.54.1.14> EDN: <https://elibrary.ru/qijtze>
13. Виноградов, Д.В., Макарова, М.П., & Зубкова, Т.В. (2023). Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур. *Теоретическая и прикладная экология*, 1, 93-100. (Vinogradov, D. V., Makarova, M. P., & Zubkova, T. V. (2023). Application of fertilizing mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed crop agrocenoses. *Theoretical and Applied Ecology*, 1, 93-100.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-093-100> EDN: <https://elibrary.ru/kwvmhj>
14. 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>
15. Zubkova, T., & Butov, M. (2023). Effectiveness of foliar fertilizing spring oilseed rape in the forest-steppe conditions of central black earth economic region of Russia. *BIO Web of Conferences*, 71, 01035.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Vinogradov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of General Agriculture and Agroecology; Head of the Department of Agronomy, Agrochemistry and Plant Protection, Doctor of Biological Sciences, Full Professor
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
vdv-rz@rambler.ru

Elena M. Dedova, Senior Lecturer, Department of Agribusiness Organization
Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev
1, Kostychev Str., Ryazan, 390044, Russian Federation
emdedova.75@mail.ru

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

Tatyana V. Zubkova, Head of the Department of Agrotechnologies, Agricultural Products Storage and Processing, Candidate of Agricultural Sciences
Yelets State University Named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation
ZubkovaTanua@yandex.ru

Ekaterina I. Lupova, Professor, Department of Agronomy, Agrochemistry and Plant Protection, Doctor of Agricultural Sciences, Full Professor
Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev
1, Kostychev Str., Ryazan, 390044, Russian Federation
katya.lilu@mail.ru

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Виноградов Дмитрий Валериевич, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой агрономии, агрохимии и защиты растений; профессор кафедры общего земледелия и агроэкологии
Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Российская Федерация; Ленинские горы, 1, стр. 12, 119234, г. Москва, Российская Федерация;
vdvrzn@mail.ru

Дедова Елена Михайловна, старший преподаватель кафедры организации агробизнеса
Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева
ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Российская Федерация
emdedova.75@mail.ru

Шкуркина Анна Сергеевна, соискатель 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

Зубкова Татьяна Владимировна, кандидат сельскохозяйственных наук,
заведующий кафедрой агротехнологий, хранения и переработки
сельскохозяйственной продукции

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
ZubkovaTatiana@yandex.ru

Лупова Екатерина Ивановна, доктор сельскохозяйственных наук, доцент
Рязанский государственный агротехнологический университет
имени П.А. Костычева

ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Российская Федерация
katya.lilu@mail.ru

Поступила 23.10.2024

После рецензирования 10.12.2024

Принята 17.12.2024

Received 23.10.2024

Revised 10.12.2024

Accepted 17.12.2024

АГРОХИМИЯ И АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ

AGROCHEMISTRY AND AGRICULTURAL
SOIL SCIENCE

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1035

EDN: KTSAMQ

UDC 631.4:004.94



Original article

USING HYDRUS-1D SOFTWARE TO PREDICT
CUMULATIVE INFILTRATION VALUES
FOR DIFFERENT SOIL TEXTURES*F.A. Al-Wazzan**Abstract*

Four soil samples with varying textures (clay loam, clay, sandy clay loam, and silty loam) were collected from different locations in Nineveh Governorate, northern Iraq. Four different models were used to calculate air-entry values, including Lenhard (Ψ_e), Cornelis (Ψ_{e1}), Van Genuchten (Ψ_{e2}), and a modified model proposed in this study ($\Psi_{e,m}$) and a modified model proposed in this study (α). These values, which represent the inverse of the air-entry value (α), serve as inputs for the Hydrus-1D program. It is a difficult standard to measure and requires time and work to estimate. These models were used in the Brooks and Corey model (1964) to predict accumulated infiltration. It is expressed in the following formulas (I_{Ψ_e} , $I_{\Psi_{e1}}$, $I_{\Psi_{e2}}$, $I_{\Psi_{e,m}}$). As a new method in predicting accumulated infiltration values by using the Hydrus-1D program and comparing it with infiltration values measured in the laboratory and field. This a novel scientific enhances the program's functionality and updates input data to minimize errors.

The results demonstrated that cumulative infiltration predicted by Hydrus-1D using hydraulic functions (θ_s , θ_r , K_s) and the two constants in V.G model (α , n) gave close values to the measured values. A high level of agreement was also observed between the predicted accumulated infiltration values (I_{Ψ_e} , $I_{\Psi_{e1}}$, $I_{\Psi_{e2}}$, $I_{\Psi_{e,m}}$) and the measured values when the same program was used, relying on the air-entry values of (Ψ_e , Ψ_{e1} , Ψ_{e2} , $\Psi_{e,m}$) as an alternative to the (α) value. The modified value in this study

($\Psi_{e.m.}$) gave the best results to predict accumulated infiltration values when used in the Hydrus-1D program. We recommend adopting this modified value ($\Psi_{e.m.}$) in Hydrus-1D to predict soil hydraulic properties.

Keywords: accumulative infiltration; accumulated infiltration prediction; soil hydraulic parameters; Hydrus-1D program

For citation. Al-Wazzan, F. A. (2025). Using Hydrus-1D software to predict cumulative infiltration values for different soil textures. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 283-299. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1035>

Introduction

Understanding water and solute transport in unsaturated soil is a complex yet critical topic. It poses significant challenges for researchers in soil and irrigation sciences, requiring considerable time and effort and being influenced by environmental conditions. Mathematical models describing water movement through porous soil media are essential for quantifying hydraulic properties that provide a quantitative description and accurate explanations of the water functions and the detailed knowledge about the constants of these functions in order to take action against the lack of soil moisture and to reach better methods for irrigation water scheduling and management [1].

Modern approaches employ mathematical models to predict soil water characteristics, including infiltration and unsaturated hydraulic conductivity, and the accuracy of these equations depends largely on the water functions, such as the saturation moisture content (θ_s) the residual moisture content (θ_r) and the water function constants represented by the Van Genuchten constants (α , n and m).

Many attempts have been made to estimate these functions and their constants to simulate the movement of the water within the porous medium of soil, as researchers have used various methods based on the numerical solutions of Richards equation of unsaturated flow to develop mathematical models to predict some water functions of the soil that presented a Clear perception that describes the unsaturated flow under the lab conditions and developing them led to the natural use in the field conditions. The huge development on programming abilities resulted in using multiple programs to predict different characteristics. The Hydrus-1D software is considered one of the most important software for simulating the movement and transfer of water, salts and heat in one dimension in saturated and unsaturated porous media. The numerical solution of Richard's equation and the mathematical models, that predict some water soil properties like the moisture description curve; in order to fit the measurement in the software and

they simulate the basic soil properties and represent the best natural prediction method [2]. Also, the Hydrus-1D software is related to Marquardt-Levenberg algorithm to find the inverse solutions to predict the hydraulic constants depending on other characteristics like evaporation [3; 4; 5] indicating that when using Hydrus-1D software in their study to the changing conditions of the moisture content during the flow process of two soils; one of them is sandy loam and the other is loam sand to a high degree of compatibility between the values measured and the values predicted by the software in addition to the possibility of detecting the water movement within the porous medium.

Infiltration is very important in designing the irrigation systems, managing its operations and evaluating its efficiency as it expresses the access of water to the soil through the surface due to adding water by irrigation or the rain and it takes place due to the integration of the water conductivity and the decline of the water potential at the surface of the soil [6]. There are many factors that affect infiltration to the soil, the most important is the initial moisture content (θ_0) and influence appears within the first (20) minutes of infiltration in addition to the soil texture, its porosity and the extent to which the air is detained inside the pores and the type of soil structure. Also, the physical properties of the soil play an important role in the process of infiltration [7].

The Philip equation [8] is regarded as the most important equation that describes the accumulative infiltration:

$$D = S t^{0.5} + A t \quad (1)$$

Where D = The accumulative infiltration, cm, S = sorptivity, t : time, min, A = constant

The factor (A) is connected to the water soil properties, the earth gravity and the time which is considered the influential factor in water infiltration. It is observed that absorptivity has an effect on water infiltration in the soil in short time and responsible for moving the water in the early stages of the infiltration and after that the absorptivity role becomes less influential and role of the factor (A) becomes more obvious with longer periods of time until reaching the balance of the water quantity that enters the soil in the time unit.

The equation of Kostiyakov that describes the infiltration in the soil is regarded as an experimental equation and one of the simple models that is easily applied therefore it has been used in the study and evaluation of the various irrigation systems.

$$D = a t^b \quad (2)$$

Where D = accumulative infiltration (cm), t = time (min), a and b = constants of Kostiyakov equation that is estimated from the infiltration data.

The previous equation used for estimating the infiltration involves many weaknesses that are represented by incapability of calibrating or modifying them to suit the condition other than the ones it measured the infiltration within them, and this entails conducting the field tests again to collect the infiltration data and this requires tremendous amount of time consumed and efforts to be made.

Materials and methods

Disturbed and undisturbed soil samples were collected from the surface layer (0–30 cm depth) at four sites in Nineveh Governorate, northern Iraq. The soils are various textures in areas of Nineveh governorate which are considered with the arid and semi-arid areas in the north of Iraq. The soils are calcareous, with the majority classified as Calciorthids according to the American Soil Classification System. The samples were taken to the lab after they were dried, ground, and sieved with a 2-mm sieve to be ready for the physical and chemical analytics [9].

Table 1.

Some physical properties of the soil

Soil type	Order	Soil particle fractions gm. Kg ⁻¹			Soil Organic Matter	Total porosity	Bulk density	Hydraulic conductivity	Initial Volumetric water content
		Clay	silt	sand	gm. kg ⁻¹	cm.cm ⁻¹	Mg.m ⁻³	cm. hr ⁻¹	cm.cm ⁻³
Clay loam	ENTISOLS	300	461	239	11.33	0.48	1.36	0.158	0.182
Clay	ARIDISOLS	570	315	115	22.65	0.528	1.25	0.069	0.20
Sandy clay loam	ENTISOLS	225	240	535	5.18	0.486	1.36	0.360	0.130
Silty loam	ARIDISOLS	240	560	200	9.92	0.505	1.31	0.222	0.177

Table 2.

Some chemical properties of the soil

Property	Texture				Unit
	Clay loam	Clay	Sandy clay loam	Silty loam	
pH	8.23	8.39	7.95	7.84	
EC	0.63	1.72	0.75	3.42	dSm ⁻¹
Na exchanged	0.88	2.55	1.00	3.77	Cmolc kg ⁻¹
CEC	24	30	18	26	
Total carbonate	316	405	289	290	g kg ⁻¹

Water infiltration

Field measurements

Measurements of water infiltration in the soils of the study area were conducted in four sites using the double-ring infiltrometer according to the method described by [10]. The inner ring had a diameter of 30 cm, while the outer ring measured 60 cm in diameter, and both have a height of 60 cm.

The small ring was fixed inside the bigger one in a depth of 10 cm from the soil surface and the float was connected inside the small ring and connected with a plastic tube that is connected to a 80-cm-height rectangular metal tank with a diameter that equals the diameter of the small ring to supply water and on the rings side a graded glass tube is fixed vertically to measure the infiltrated water with the time for the soils of the four sites.

Laboratory measurements

The vertical infiltration was measured in the laboratory in the columns of the soils with various textures for all the sites studies by means of using a plastic column with a diameter of 6 cm and a height of 14 cm. These were filled with soil at an apparent density that is similar to the field soil and the infiltrated water was measured with time.

Use of Hydrus-1D software

The principle of the software is summarized with a numerical solution of a differential equation with physical bases. The data is entered in a group of lists that are fed depending on the property studied.

Theoretical basis

The theoretical basis of Hydrus-1D software relies on the numerical solution of the water flow equation, assuming an incompressible medium. It is based on Darcy's law equation, represented by Richards equation, which describes one-dimensional water flow:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (3)$$

Where θ = the moisture content (cm^3), h = moisture stress (cm water), t = time, S = term that represents the collection and supply of water in the flow equation ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

Modifying the air-entry value parameter (α) in Hydrus-1D:

The value of the constant (α) was modified, which stands for the inverse of the value of air entry using four different models to show its effect on the software outputs and a new style to manifest the effect of this constant modifying according to the outputs of the software and then comparing the predicted values with the measured ones for a varying domain of soil textures.

The air-entry pressure was found in four formulas as follows:

A - Lenhard formula (ψ_e), and mentioned in [11]:

$$\psi_e = 0.5^{\frac{1}{n}} (2^{\frac{1}{m}} - 1)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

B - In this study the Lenhard formula (ψ_e) was modified by changing the constant from (0.5) to (1.2) and the symbol was given to it (ψ_{em})

$$\psi_{em} = 1.20^{\frac{1}{n}} (2^{\frac{1}{m}} - 1)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

C - The formula of Cornelis (ψ_{e1}) and mentioned in [12]:

$$\psi_{e1} = \frac{1}{0.5\alpha} \quad (6)$$

D - The formula of van Genuchten (ψ_{e2}) It was mentioned in [13]]:

$$\psi_{e2} = \frac{1}{\alpha} \quad (7)$$

Results and discussion

Accumulative water infiltration measured in the field

The values of the accumulative water infiltration measured in the field were 1.11, 0.940, 3.087 and 1.7 cm compared to the values measured in the laboratory, which were 1.072, 0.912, 2.945 and 1.66 cm respectively after 200 min from the measurement, Tables 3 and 4. This is attributed to the soil, which preserves its structure and its aggregations stability in the field sites and because there were cracks and remains of roots that helped increase the depth of the infiltrated water. On the other hand, the laboratory soil was disturbed, leading to structural breakdown. This is in conformity with the results of the [14; 15; 16] confirming that the accumulative infiltration values measured in the field are higher than the ones measured in the laboratory. The lowest cumulative infiltration value measured in clay-textured soil was 0.940 cm. since these soils have small pores and have the ability to preserve moisture and thus the ability of water conductivity and the movement of water in both vertically and horizontally slow. The highest value of field accumulative infiltration was at the site with sandy clay loam texture, i.e., 3.087 cm. This can be attributed to the lower clay content and higher sand content, which increases the cross-sectional area for water flow through the porous medium, thereby enhancing infiltration. This is conformity with the results of [17] that indicated that the soils with light texture have high infiltration values.

Values of the accumulative infiltration measured in the laboratory

It was shown that the lowest values of the accumulative infiltration measured in the laboratory were in clay-textured soils as he reached 0.911 cm at 200 min later. The reason for this is the decrease in the cumulative infiltration values in the fine textured soils. It is due to the compaction of the soil and the confinement

of the air, causing the opposite pressure and swelling of the clay particles, which leads to a small size of the interstitial pores as well as the movement and transmission of fine particles and their deposition within the interfacial pores, reducing the movement of water to the bottom.

Values of the accumulative infiltration predicted by HYDRUS-1D

Richards equation was solved by means of the numerical method using the ended elements by applying Hydrus and the water functions (θ_s , θ_r , K_s) and the two constants (α and n) in [13].

The solution process to obtain the predicted accumulative infiltration values is represented by I_v . Also, the same water functions were used with the calculated of air entry values from the equations (4, 5, 6, 7), as a tool for improving the method of predicting the accumulative infiltration values represented by $(I\psi_e, I\psi_{e_m}, I\psi_{e_1}, I\psi_{e_2})$, respectively. Predicted cumulative infiltration values closely matched field-measured values, with a Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) ranging from 0.939 to 0.999 for all the sites (Table 3). The limiting values ranged from 0.939 to 0.999 and the lowest value was in the sandy clay loam and the highest was in the silty loam soil, while the value of RMSE was 0.0553 in the silty loam to 3.9375 in the sandy clay loam. Table 3 and Fig. 1 show the relationship between these values. The predicted values of accumulative infiltration (I_v) were closer with the measured values. The values of the statistical significance that the highest value was 0.999 and the lowest value for the RMSE. From the other hand $I\psi_{e_m}$ of the accumulative infiltration showed closer values compared to the other equation, depending of air entry value. Results in Table 4 showed that the predicted values of accumulative infiltration were close to the values measured at the laboratory in all the soils of the study. The value of limitation coefficient ranged from 0.025 to 0.999 and the lowest value was in the clay soil and the value of RMSE was 0.0035 in the clay soil. The accumulation infiltration predicted values (I_v) were closer to the measured values and this might be due to that some predicted values (I_v) depended on the measurement and the accurate estimation of the water functions and the constants (α and n), whereas the values of the accumulated infiltration predicted by $I\psi_e, I\psi_{e_m}, I\psi_{e_1}, I\psi_{e_2}$ were less convergent to the measured values and this might be because the values predicted depended on air entry values calculated from predictive equation and this yielded more accuracy in the direct measurements. The lowest predicted values of the accumulative infiltration were ($I\psi_e$) compared to the values measured and the values of the other predicted accumulative infiltration, Fig. 2 due to the decrease of the value of air entry (ψ_e) were calculated in the Equation 4, which led to the rise in the constant values

(α). The ($I_{\psi_{e_m}}$) of predicting the accumulative infiltration showed values that are more compatible with the values measured compared to (I_{ψ_e}) for all the soil in question and the reason behind that is the modification of equation (4) in this study by changing the constant of the equation from 0.5 to 1.2 (Equation 5) and this in turn resulted in an increase in the values of air entry, which decreased the value of the constant (α) and so better results were provided by Hydrus-1D. This way the sensitivity of (I_{ψ_e}) was treated at or close to the saturation of the clay soils as the identification coefficient of the site with clay texture was 0.997 as noted in Table 4 and Fig. 3. The air entry value in ($I_{\psi_{e_1}}$) and ($I_{\psi_{e_2}}$) was calculated depending on the measured value of (α). The model ($I_{\psi_{e_1}}$) showed the highest predicted values of accumulative infiltration for all the soils of the sites in question (Table 4). That was because the air entry value reached the maximum when calculated from the relation ($\frac{1}{0.5\alpha}$) as well as the decrease in the value of (α). That reached the maximum, which is in agreement with the results [18].

The predicted values of the accumulative infiltration in ($I_{\psi_{e_2}}$) showed more compatibility with the values measured and they were close to the predicted values of the mode ($I_{\psi_{e_m}}$) (Fig. 3) as it was the lowest value for the identification coefficient of the clay texture and the reason behind that is due to the rise in the value of air entry (ψ_e), which was calculated from the relation ($\frac{1}{\alpha}$) and this led to a decrease in (α) value and this was indicated by [4; 11; 19], which demonstrated the inverse relation between the air entry value and the factor (α). It was noticed that the predicted values of the accumulated infiltration increased when using the two models ($I_{\psi_{e_1}}$) and ($I_{\psi_{e_2}}$) using the Hydrus-1D software at the long periods of time (i.e., 160 and 200 min) and the occurrence of a slight change to the values when compared with the measured values. This is in agreement with what was indicated by [20; 21; 22; 23], which indicated that there is a possibility for the occurrence of a slight deviation in the predicted values when using the prediction equations for the accumulative infiltration at the end of the measurement periods due to the factor of time and these deviations will be according to the model used.

Table 3.

Accumulated infiltration values field-measured and predicted by the Hydrus-1D

			accu- mulated	infiltra- tion	predic- tion	By Hy- drus	Cm
	Time, min	Accumulated infil- tration field-meas- ured, cm	I_v	I_{ψ_e}	$I_{\psi_{e_m}}$	$I_{\psi_{e_1}}$	$I_{\psi_{e_2}}$
Clay loam	1	0.181	0.153	0.022	0.086	0.098	0.077

Clay	1	0.166	0.152	0.017	0.076	0.105	0.068
Sandy clay loam	1	0.293	0.287	0.024	0.201	0.247	0.111
Silty loam	1	0.193	0.180	0.022	0.126	0.157	0.078
Clay loam	3	0.246	0.217	0.030	0.151	0.166	0.144
Clay	3	0.227	0.208	0.025	0.124	0.166	0.118
Sandy clay loam	3	0.437	0.433	0.043	0.375	0.452	0.367
Silty loam	3	0.285	0.269	0.041	0.209	0.285	0.136
Clay loam	7	0.311	0.281	0.055	0.233	0.258	0.207
Clay	7	0.284	0.269	0.041	0.198	0.276	0.182
Sandy clay loam	7	0.635	0.616	0.077	0.586	0.705	0.542
Silty loam	7	0.387	0.370	0.056	0.317	0.442	0.206
Clay loam	10	0.352	0.317	0.066	0.278	0.310	0.245
Clay	10	0.321	0.296	0.053	0.233	0.317	0.212
Sandy clay loam	10	0.743	0.721	0.091	0.703	0.856	0.692
Silty loam	10	0.443	0.427	0.073	0.374	0.524	0.245
Clay loam	20	0.435	0.413	0.095	0.382	0.434	0.344
Clay	20	0.401	0.374	0.075	0.317	0.448	0.295
Sandy clay loam	20	1.023	0.994	0.144	1.012	1.208	1.006
Silty loam	20	0.578	0.565	0.111	0.522	0.741	0.353
Clay loam	30	0.496	0.477	0.122	0.466	0.536	0.423
Clay	30	0.452	0.428	0.092	0.392	0.552	0.356
Sandy clay loam	30	1.356	1.204	0.198	1.258	1.503	1.248
Silty loam	30	0.687	0.685	0.147	0.652	0.915	0.446
Clay loam	90	0.772	0.743	0.277	0.820	0.977	0.752
Clay	90	0.683	0.653	0.185	0.703	0.975	0.626
Sandy clay loam	90	2.121	2.066	0.494	2.285	2.671	2.274
Silty loam	90	1.136	1.126	0.364	1.147	1.615	0.833
Clay loam	160	1.012	0.970	0.446	1.113	1.356	1.031
Clay	160	0.857	0.835	0.279	0.960	1.328	0.849
Sandy clay loam	160	2.892	2.776	0.844	3.145	3.623	3.132
Silty loam	160	1.520	1.503	0.606	1.573	2.196	1.186
Clay loam	200	1.11	1.080	0.542	1.254	1.547	1.170
Clay	200	0.940	0.922	0.331	1.087	1.498	0.957
Sandy clay loam	200	3.087	3.1226	1.043	3.578	4.092	3.556

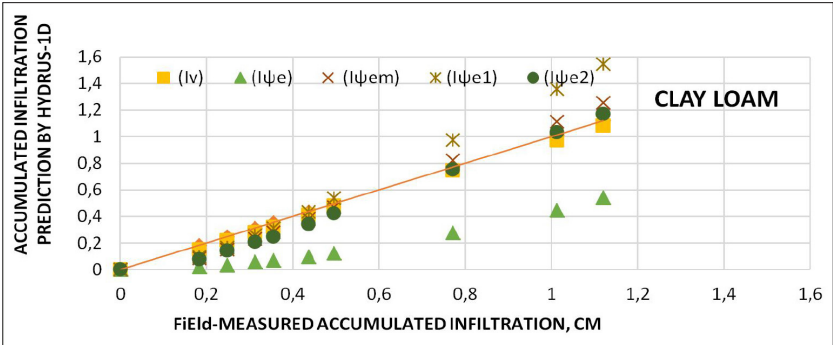
Silty loam	200	1.7	1.686	0.744	1.784	2.481	1.367
Clay loam		R^2	0.999	0.950	0.990	0.986	0.989
		RMSE	0.107	1.329	0.057	0.296	0.216
Clay		R^2	0.999	0.952	0.980	0.981	0.983
		RMSE	0.0773	1.312	0.107	0.531	0.270
Sandy clay loam		R^2	0.996	0.939	0.994	0.996	0.994
		RMSE	0.171	3.937	0.187	1.087	0.101
Silty loam		R^2	0.999	0.952	0.997	0.997	0.991
		RMSE	0.055	1.955	0.112	0.966	0.869

Table 4.

Accumulated infiltration values laboratory-measured and predicted by the Hydrus-1D

			accu- mulated	infiltra- tion	predic- tion	By Hy- drus	Cm
	Time, min	Lab-measured accumulated infil- tration, cm	I_v	I_{ψ_e}	$I_{\psi_{em}}$	$I_{\psi_{e1}}$	$I_{\psi_{e2}}$
Clay loam	1	0.135	0.151	0.026	0.078	0.105	0.077
Clay	1	0.133	0.145	0.012	0.067	0.096	0.071
Sandy clay loam	1	0.220	0.274	0.024	0.102	0.307	0.215
Silty loam	1	0.152	0.178	0.017	0.076	0.158	0.117
Clay loam	3	0.202	0.218	0.044	0.137	0.190	0.136
Clay	3	0.193	0.206	0.029	0.111	0.172	0.124
Sandy clay loam	3	0.367	0.428	0.046	0.136	0.530	0.388
Silty loam	3	0.241	0.263	0.034	0.131	0.274	0.206
Clay loam	7	0.270	0.280	0.062	0.209	0.282	0.206
Clay	7	0.245	0.266	0.038	0.177	0.259	0.190
Sandy clay loam	7	0.561	0.614	0.095	0.204	0.815	0.587
Silty loam	7	0.343	0.364	0.052	0.205	0.416	0.310
Clay loam	10	0.311	0.322	0.077	0.242	0.341	0.245
Clay	10	0.286	0.296	0.045	0.212	0.306	0.226
Sandy clay loam	10	0.673	0.723	0.178	0.294	0.978	0.713
Silty loam	10	0.404	0.421	0.065	0.248	0.499	0.367
Clay loam	20	0.391	0.406	0.111	0.342	0.478	0.348
Clay	20	0.366	0.377	0.068	0.291	0.435	0.315
Sandy clay loam	20	0.951	0.985	0.345	0.436	1.404	1.011
Silty loam	20	0.534	0.566	0.103	0.353	0.717	0.516
Clay loam	30	0.456	0.472	0.147	0.418	0.595	0.432

Clay	30	0.424	0.431	0.085	0.356	0.538	0.387
Sandy clay loam	30	1.191	1.202	0.412	0.578	1.736	1.256
Silty loam	30	0.643	0.676	0.136	0.442	0.877	0.645
Clay loam	90	0.735	0.746	0.284	0.748	1.044	0.774
Clay	90	0.644	0.653	0.188	0.625	0.958	0.695
Sandy clay loam	90	2.026	2.067	0.624	1.297	3.106	2.276
Silty loam	90	1.103	1.128	0.466	0.832	1.565	1.144
Clay loam	160	0.969	0.976	0.426	1.021	1.426	1.065
Clay	160	0.822	0.832	0.336	0.846	1.300	0.956
Sandy clay loam	160	2.744	2.775	0.875	2.108	4.421	3.146
Silty loam	160	1.483	1.500	0.689	1.183	2.138	1.570
Clay loam	200	1.072	1.087	0.558	1.168	1.612	1.21
Clay	200	0.911	0.919	0.456	0.954	1.472	1.084
Sandy clay loam	200	2.945	3.081	0.998	2.442	4.799	3.578
Silty loam	200	1.66	1.683	0.785	1.364	2.415	1.781
Clay loam		R^2	0.999	0.972	0.998	0.999	0.998
		RMSE	0.042	1.152	0.081	0.608	0.025
Clay		R^2	0.999	0.929	0.997	0.997	0.996
		RMSE	0.037	1.138	0.160	0.605	0.003
Sandy clay loam		R^2	0.999	0.989	0.993	0.997	0.996
		RMSE	0.180	3.272	1.758	2.523	0.562
Silty loam		R^2	0.999	0.978	0.997	0.999	0.999
		RMSE	0.085	1.697	0.710	1.005	0.031



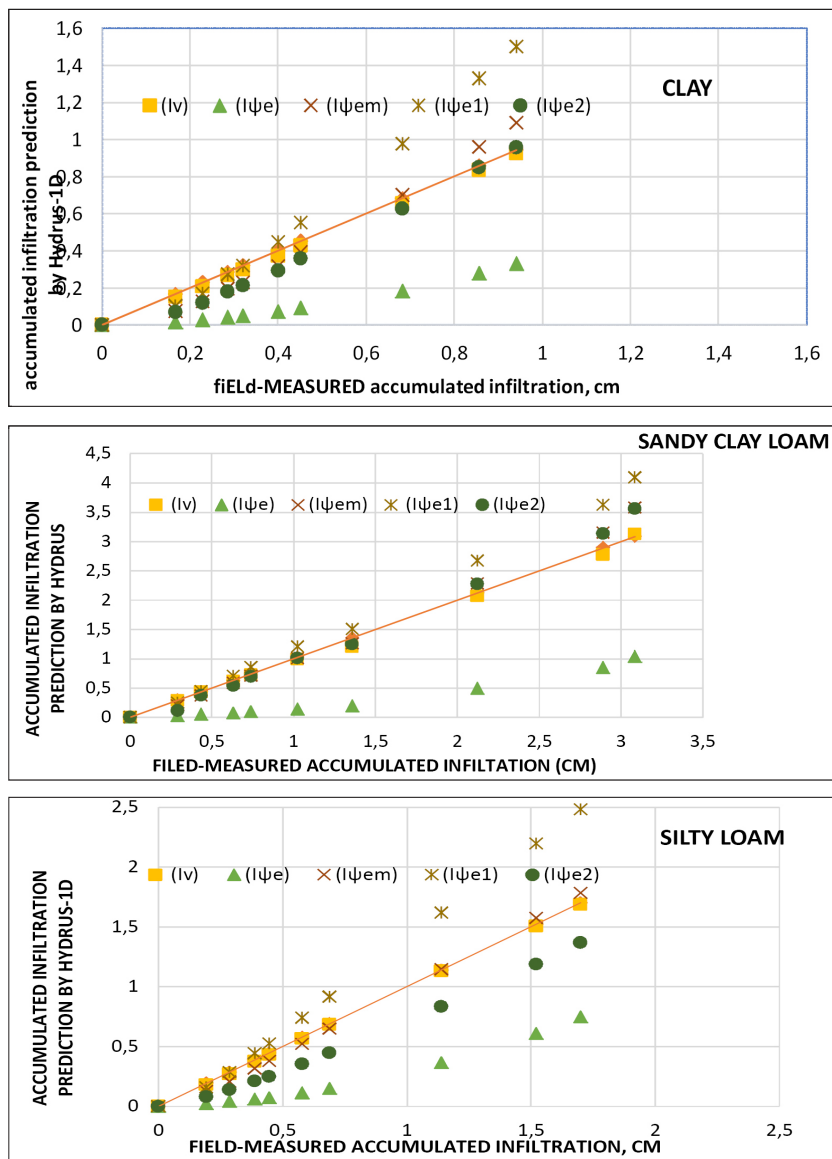
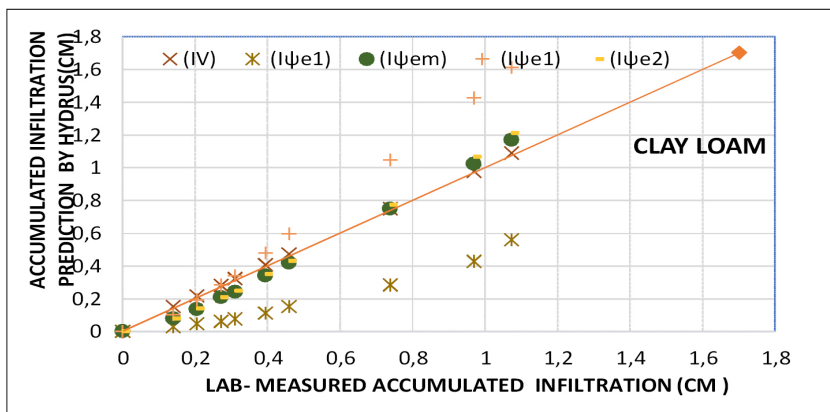
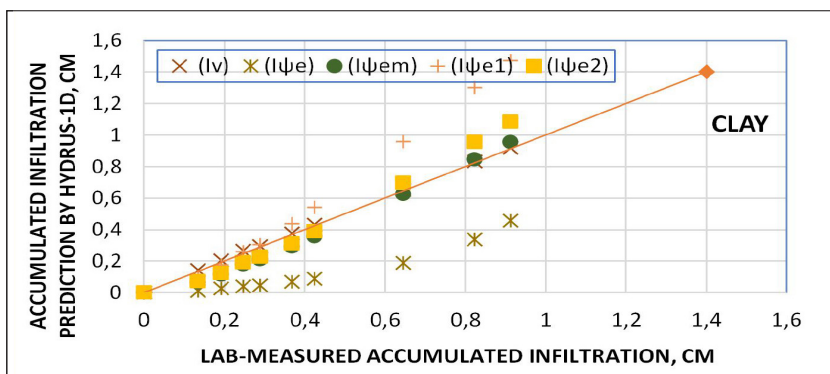
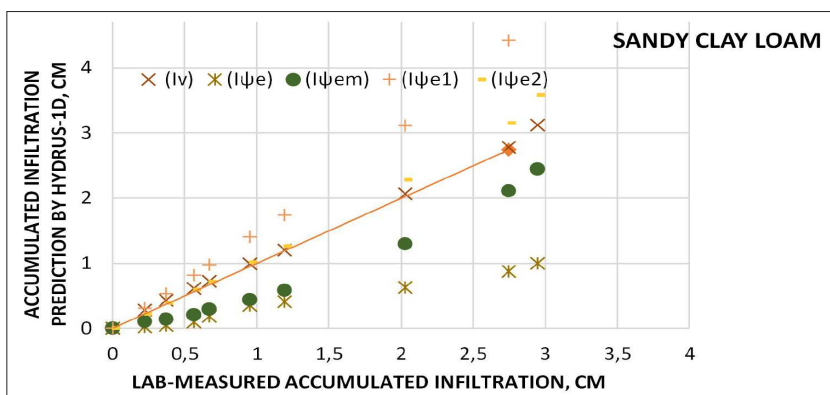


Fig. 1. The relationship between the accumulative infiltration measured in the field and the one predicted by the Hydrus-1D



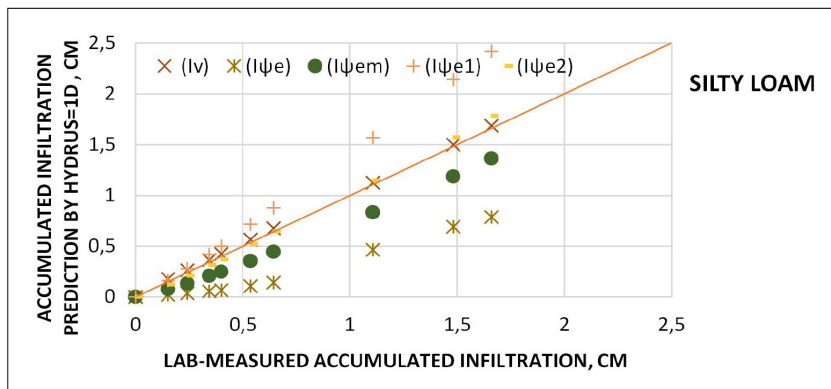


Fig. 2. The relationship between the accumulative infiltration measured in the laboratory and the one predicted by the Hydrus-1D software

Conclusion

This study highlights the importance of measuring accumulated infiltration values, as they are crucial to understanding soil water dynamics. Given the challenges associated with direct measurement, the Hydrus-1D program provides an effective predictive tool. It has been used to predict the infiltration value depending on simpler characteristics in the measurement process such as moisture content at saturation or residual moisture content in comparison with the measured values of the infiltration in the field and in the laboratory.

In this study we recommend modifying the air entry value according to the models used in order to improve the performance of the Hydrus-1D program to predict the accumulative infiltration values, especially adopting the modified formula in this study in order to obtain the best values and the lowest percentage of error. The study recommends using the inverse of the air entry value to predict other hydraulic properties, such as unsaturated hydraulic conductivity and diffusivity, which are challenging to measure.

Acknowledgment. The authors are very grateful to the University of Mosul / college of Agriculture and Forestry for their provided facilities, which helped to improve the quality of this work.

References

1. Simunek, J., Neumann, L.E., & Cook, F.J. (2011). Implementation of quadratic upstream interpolation schemes for solute transport into HYDRUS-1D. *Envi-*

- ronmental Modeling and Software*, 26(11), 1298-1308. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.010>
2. Rezaei, M., Seuntjens, P., Shahidi, R., Joris, I., Boenne, W., Al-Barri, B., & Cornelis, W.M. (2016). The relevance of in situ and laboratory characterization of sandy soil hydraulic properties for soil water simulations. *Journal of Hydrology*, 534, 251-265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.062>
 3. Kasel, D., Bradford, S.A., Simunek, J., Heggen, M., Vereecken, H., & Klumpp, E. (2013). Transport and retention of multi-walled carbon nanotubes in saturated porous media: Effects of input concentration and grain size. *Water Research*, 47(2), 933-944. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.019>
 4. Dabach, S., Lazarovitch, N., Simunek, J., & Shani, U. (2013). Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science*, 31(1), 27-36. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-011-0289-x> EDN: <https://elibrary.ru/qgiygv>
 5. Esam, M., AL-Qassab, S.A., & AL-Wazzan, F.A. (2022). Using inverse modeling by HYDRUS-1D to predict some soil hydraulic parameters from soil water evaporation. *Colombia Forestal*, 25, 21-35. <https://doi.org/10.14483/2256201X.18157>
 6. Mustafa, B.M., & Al-Wazzan, F.A. (2022). The variation of some soil physical properties by using water with different salinities. *Int. J. Agric. Stat. Sci.*, 18(1), 2099-2110. <https://connectjournals.com/pages/article/details/toc036676>
 7. Al-Wazzan, F.A., & Sarbast, A.M. (2022). Effects of conservation and conventional tillage on some soil hydraulic properties. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1060, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012002> EDN: <https://elibrary.ru/yyyyyz>
 8. Philip, J.R. (1957a). The theory of infiltration. 1: The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, 83, 345-357. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1957/05000/THE_THEORY_OF_INFILTRATION_1_THE_INFILTRATION.2.aspx
 9. Klute, A. (1986). Methods of soil analysis part 1: Physical and mineralogical methods (2nd ed.). *Agronomy Monograph No.9*. Madison, WI: ASA-SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed>
 10. Parr, J.F., & Bertrand, A.R. (1960). Water infiltration into soils. *Adv. In Agron*, 12, 311-363. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60086-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60086-3)
 11. Lenhard, R., Parker, J.C., & Mishra, S. (1989). On the correspondence between Brooks-Corey and van Genuchten model. *J. Irrig. Drain. E.*, 115, 744-751. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(744\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(744))
 12. Cornelis, V.M., Khlosi, M., Hartmann, R., van Meirvenne, M., & Devos, B. (2005). Comparison on unimodal analytical expression for soil water reten-

- tion curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 1902-1911. https://journals.lww.com/soilsci/abstract/2012/06000/entropy_characterization_of_soil_pore_systems.1.aspx
13. van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.036159950>
 14. Philip, J.R. (1957b). The theory of infiltration. 2: The profile of infinity. *Soil Sci.*, 83, 345-448. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1957/06000/The_Theory_of_Infiltration_2_the_Profile_of.3.aspx
 15. Hillel, D. (1980). *Applications of soil physics*. Academic press, New York.
 16. Ritter, A., Hupet, F., Munoz-Carpena, R., Lambot, S., & Vanclooster, M. (2003). Using inverse method for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agricultural Water Management*, 59, 77-96. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00160-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00160-9) EDN: <https://elibrary.ru/bfwujr>
 17. Hachimi, M., Maslouhi, A., Tamoh, K., & Qanza, H. (2019). Estimation of soil hydraulic properties of basin Loukkos (Morocco) by inverse modeling. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(3), 1407-1419. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0628-7>
 18. Dexter, A.R., & Richard, G.R. (2009). Tillage of soil in relation to their bimodal pore size distributions. *Soil Tillage Res.*, 103, 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.001>
 19. Schaap, M.G., Leij, F.J., & van Genuchten, M.Th. (2001). Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarch pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 163-176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8) EDN: <https://elibrary.ru/arbijnj>
 20. Simunek, J., Angulo-Jaramillo, R., Schaap, M.G., Martinus, J.V., & Van Genuchten, Th. (1998). Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soil from tension-disc infiltrometer data. *Geoderma*, 86, 61-81. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00035-4) EDN: <https://elibrary.ru/ab-smkd>
 21. Vogel, T., van Genuchten, M.Th., & Cislerova, M. (2001). Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources*, 24, 133-144. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(00\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00037-3)
 22. Mualem, Y. (1976). A new model predicting the hydraulic of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>

23. Brooks, R.H., & Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology paper No.3*. Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins. <https://api.mountainscholar.org/server/api/core/bitstreams/f7532f39-5f13-4e4b-a3c0-dd9523ba5219/content>

DATA ABOUT THE AUTHOR

Faris A. Al-Wazzan

*Department of Soil Science and Water Resources,
College of Agriculture and Forestry, University of Mosul
Mosul, Iraq
Dr.farisakram@uomosul.edu.iq*

Поступила 02.05.2024

После рецензирования 25.11.2024

Принята 05.12.2024

Received 02.05.2024

Revised 25.11.2024

Accepted 05.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1444

EDN: MVZWQP

UDC 631.46:579



Original article

A COMBINATION OF BENTONITE, BIOLOGICAL SUBSTRATE, AND MICROBIAL PRODUCTS TO ENHANCE CORAL SAND AND INFLUENCE THE GROWTH PERFORMANCE OF HEAT-RESISTANT MUSTARD GREENS, BRASSICA JUNCEA

C.T. Nguyen, D.N. Vu, N.T. Bui, T.T.T. Dinh, T.H. Le, M.T. Vu

Abstract

Background. Coral sand along the coast of Vietnam presents several challenges for plant growth, including inadequate nutrition, poor moisture retention, and high salinity, which complicate the cultivation of vegetables and trees.

Purpose. This study aims to address the challenge of enhancing coral sand by optimizing its physical and chemical properties, moisture retention, nutrient availability, and suitability for cultivation.

Materials and methods. The quality of mixed substrates is assessed using standard methods in accordance with Vietnamese Standards.

Collected data were analyzed using SPSS 22 statistical software (IBM, USA) and MS Excel 365 software (Windows, USA). Comparison of differences between experiments based on one-factor ANOVA analysis at 95% confidence level.

Results. Results indicate that with the improved soil formulation incorporating adhesive additives, organic substrates, salt-tolerant polysaccharide membrane-forming microorganisms, and salt-tolerant beneficial microorganisms at varying concentrations, porosity has increased to 54.90%, nearly matching that of alluvial soil at 56.14%. Consequently, the remediation formulas proved to be effective in enhancing soil characteristics. A growth index monitoring test conducted on the heat-resistant vegetable *Brassica juncea* after 35 days of cultivation demonstrated that the selected soil improvement formula yielded growth and productivity comparable to the control sample of alluvial soil, with the number of leaves reaching 7-8, an average leaf area of approximately 20 dm² per plant, a harvested vegetable yield of 20 g per plant, and a SPAD index of 23.87.

Conclusion. The effect of adding microbial preparations and bentonite to coral sand increases EC and post-harvest vegetable volume but is not significantly different from formulas without preparations and bentonite.

Keywords: Coral sand soil; improved soil; bentonite; microbial preparation

For citation. Nguyen, C.T., Vu, D.N., Bui, N.T., Dinh, T.T.T., Le, T.H., & Vu, M.T. (2025). A combination of bentonite, biological substrate, and microbial products to enhance coral sand and influence the growth performance of heat-resistant mustard greens, *Brassica juncea*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 300-318. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1444>

Introduction

Vietnam encompasses approximately 0.5 million hectares of sandy soil, approximately 339,000 hectares (68%) of which are located in the coastal areas of the Central Region. Notably, the climate and soil in these coastal and island regions exhibit a dry and saline environment. In areas characterized by coral sand, agricultural practices and tree cultivation face significant challenges. The sandy soil of the South Central Coast (SCC) is primarily composed of sand (> 90%), features low clay content, exhibits low cation exchange capacity (CEC), high acidity, minimal organic matter, and poor water retention capabilities. The application of scientific and technological advancements to transform chronically contaminated coral sand into arable land holds both scientific and economic significance. The characteristics, soil properties, and climatic conditions of the coastal and island regions in the South Central area of Vietnam are predominantly characterized by loose sandy soil, salinity, inadequate water retention, nutrient deficiency, a hot climate, water scarcity during the dry season, and flooding during the rainy season, compounded by the tendency for land to become saline due to the geographical features of the region. Consequently, this study aims to address the challenge of enhancing coral sand by optimizing its physical and chemical properties, moisture retention, nutrient availability, and suitability for cultivation. In addition to its poor moisture retention, coral sand is deficient in nutrients and exhibits salinity. Therefore, it is essential to incorporate humectants to improve the soil, alongside the addition of nutrients and microorganisms. Alluvial soil is regarded as a highly suitable type of soil for various crops, particularly vegetables. To convert coral sand into viable arable land for vegetables and crops, the criteria for this soil type must be established. Key indicators to consider include porosity, maximum moisture storage capacity, soil salinity, and nutritional components (organic matter, CEC, total nitrogen, total phosphorus, nitrate), all of which must meet appropriate levels

to optimize vegetable growth, particularly soil acidity (pH). Most plants thrive in neutral to slightly acidic soil, with the optimal pH range for vegetable growth being between 5.5 and 7.0, as this pH level facilitates the optimal uptake of nutrients by the plants.

Currently, numerous solutions exist globally to enhance soil quality, involving the application of soil-improving and moisturizing agents including natural minerals like bentonite, organic moisturizers, biochar, and CMC. These can be combined with organic nutrient sources, including microbial fertilizers, straw, and agricultural waste.

Bentonite serves as a soil improver and moisture retainer, having been extensively studied and effectively applied in numerous countries characterized by arid and semi-arid climates [6-8]. Due to its exceptional moisture retention and high adsorption capacity, bentonite is recognized as a natural material that enhances soil quality and increases fertility, particularly in sandy soils that necessitate substantial improvement for agricultural purposes. In its moist state, bentonite's swelling ability diminishes the capillary channels within the soil, thereby facilitating water retention and reducing permeability in sandy soils. As soil moisture levels rise, bentonite also enhances the thermal conductivity of the soil, thereby improving the heat resistance of sandy soils [9].

Bentonite is derived from volcanic ash, primarily composed of the mineral montmorillonite, which features a layered structure. This mineral clay exhibits swelling properties, high viscosity, and the capacity to adsorb various substances. Bentonite has found extensive application in soil enhancement. Beyond its moisturizing effects, it possesses the ability to retain nutrients and purify both soil and the environment. As a natural mineral, bentonite contains over 45 chemical elements of significant nutritional value, including CaO , MgO , SiO_2 , and Al_2O_3 . Consequently, it is utilized by numerous countries worldwide in the agricultural sector for the production of animal feed, fertilizers, and soil improvement.

In Vietnam, published studies on the application of Vietnamese bentonite for soil enhancement have been limited. Currently, only a handful of studies exist, notably by the authors Hoai Chau Nguyen [13], who investigated the effects of bentonite on the cation exchange capacity and moisture retention of sandy soil in Ninh Thuan province for asparagus cultivation. Transforming coral sand soil into a medium suitable for growing leafy vegetables, such as onions and mustard greens, presents a significantly greater challenge.

Growing media is widely utilized for plant cultivation due to its numerous advantages, including porosity, appropriate density, balanced nutrition, and efficient drainage. Various types of growing media exist, most of which are com-

posed of natural materials that include rice husk, coconut fiber, sawdust, sand, and stone powder.

Beneficial microorganisms enhance soil nutrition through various mechanisms: nitrogen-fixing and phosphorus-decomposing microorganisms provide essential nitrogen and phosphorus nutrients; cellulose-decomposing microorganisms supply carbon sources and elevate organic carbon content in the soil; EPS-synthesizing microorganisms promote adhesion, enhance structure, and increase moisture retention capacity in cultivated soil. The introduction of beneficial microorganisms is crucial for the enhancement of numerous cultivated lands, particularly significant for the long-term transformation of coral sand soil into arable land.

Green mustard (*Brassica juncea* L.), a member of the cabbage family, is a plant capable of enduring drought and exhibiting moderate to good salinity tolerance ($\text{pH} \approx 8.6$, $\text{EC} \approx 3.2\text{--}10$ mS/cm, $\text{ESP} \approx 15$) (Shirazi et al., 2011). It is cultivated extensively across various regions globally, particularly in Asian countries [14]. This vegetable is recognized for its high economic viability for farmers, attributed to its straightforward cultivation and rapid harvest cycle.

With their relatively low nutritional requirements compared to other crops, mustard greens can utilize organic fertilizers as basal nutrients, thereby producing safe organic products while also mitigating the drawbacks associated with inorganic fertilizers. Numerous studies have been conducted on mustard greens in recent years [15–20].

This study integrates bentonite with microorganisms and organic substrates to enhance coral sand, rendering it suitable for cultivation, while also examining the growth process of heat-resistant mustard greens, *Brassica juncea*.

Materials and methods

Materials and chemicals

Material: Bentonite and additives.

Substrate: utilized with the following specifications: Density 1.28 g/cm³; Porosity ranging from 70–75%; EC: 0.705 mS/cm; pH 7–7.5; N, P, K index at-tains 3% $\pm$ 0.2% (commercially purchased).

Bioinoculants: Salt-tolerant polysaccharide biofilm-producing microbial formulation BTS (comprising *Bacillus velezensis* TSD5 and *Meyerozyma guilliermondii* DTA-Y5.8 strains); Salt-tolerant beneficial microbial formulation NPC (comprising nitrogen-fixing *Azotobacter chroococcum* TSL B1.2, phosphate-solubilizing *Pseudomonas* sp. TSD-B5.7, and cellulose-decomposing *Bacillus amyloliquefaciens* DTA-B5.1 strains). The density of selected microorganisms is $\geq 10^8$ CFU/g.

Plant Varieties

Heat-resistant Hong Kong Mustard green F1 variety from Viet A Vegetable Company

General Characteristics of Coral Sand

Coral sand soil in the study exhibited a grain size primarily ranging from 0.2 to 5 mm, characterized by an unstable structure. The attributes of coral sand are as follows:

Table 1.

Physical and Chemical Properties of Coral Sand

pH (H ₂ O)	Salinity ‰	Particle Density (g/cm ³)	Bulk density (g/cm ³)	WHC (%)	Total Nitrogen (%)	Total Phosphate (%)
8,0-9,0	4,5-12,7	1,33	2,44	23.17	0.06	0.02

Experimental setup

The experiment was carried out at the Vegetable Greenhouse, Faculty of Agronomy, Vietnam Academy of Agriculture, under the following conditions: Temperature ranged from 28 °C to 35 °C; Humidity varied from 50% to 70%; Light intensity exceeded 6000 lux. The study employed a randomized complete block design (RCBD), with each formula replicated three times, and each replicate consisting of three plants, utilizing the following experimental:

Table 2.

Experimental Formulations

	Coral sand	Bentonite	Substrate	BTS Polysaccharide film forming salt tolerant microorganisms	NPC salt tolerant beneficial microorganisms
DC1	100%	-	-	-	-
DC2	97%	3%	-	-	-
DC3	90%	-	10%	-	-
DC4	89.5%	-	10%	0.25%	0.25%
DC5	87.3%	2.7%	10%	-	-
DC6	100% Alluvial soil				
CT1	86.82%	2.68%	10%	0.25%	0.25%
CT2	81.97%	2.53%	15%	0.25%	0.25%
CT3	77.12%	2.38%	20%	0.25%	0.25%
CT4	91.67%	2.83%	5%	0.25%	0.25%
CT5	89.24%	2.76%	7.5%	0.25%	0.25%

The experiments are maintained under a consistent regimen. Watering occurs twice daily through manual methods, ensuring an even distribution of water across all experiments.

Analytical Methods

Soil physical and chemical parameters

The quality of mixed substrates is assessed using standard methods in accordance with Vietnamese Standards:

Determination of particle density

Determine the density based on TCVN 11399:2016

The treated soil samples were determined for specific gravity using a pycnometer.

Determination of bulk density

Determine bulk density based on TCVN 11399:2016

After being completely dried, the soil samples will be weighed using an analytical balance with an error of 0.001 mg at the Biochemistry Department - Institute of Biotechnology - Vietnam - Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center.

Determination of porosity

Soil porosity is determined according to ASTM D1557

Soil porosity: is the percentage of voids in the soil compared to the soil volume. Soil porosity P (%) is determined through the specific gravity and bulk density of the soil.

Formula for determining porosity:

$$P(\%) = \left(1 - \frac{d}{D}\right) \times 100.$$

In which: d is density (g/cm³)

D is density (g/cm³)

Determination of EC conductivity

The electrical conductivity (EC) of the substrate mixture was assessed using a handheld EC meter (Hana 901, Taiwan), with each formula measured three times, involving two plants per measurement. This assessment was conducted weekly. The EC of the substrate was determined in accordance with ISO 11265:1994

The soil EC is measured with a handheld EC measuring pen (Hana 901, Taiwan), measuring each formula 3 times, each time measuring 2 trees. Measure 1 time/week.

pH measurement

Soil pH_{H₂O} is assessed in accordance with ISO 11277.

Total nitrogen and phosphorus content

Total nitrogen is determined according to ISO 14237; total phosphorus is determined according to ISO 11263.

Indicators for monitoring plant growth

Number of leaves

Measure the number of leaves on a weekly basis, observing leaf growth and the total number of leaves per plant prior to harvesting. Each formula is assessed three times, with two plants evaluated during each assessment.

SPAD Index

The SPAD index was assessed using a SPAD 502 meter (Japan), measuring each plant with two new leaves and calculating the average value. Each formula was evaluated three times, with two plants measured during each assessment.

Harvest yield

Harvest yield was determined by multiplying the individual yield by standard density per square meter. The sample harvest occurred two months post-sowing. Fresh stems and leaves were weighed to compute the harvest yield and subsequently stored at 70°C for 48 hours to ascertain the accumulated dry matter mass.

Data Processing

Collected data were analyzed using SPSS 22 statistical software (IBM, USA) and MS Excel 365 software (Windows, USA). Comparison of differences between experiments based on one-factor ANOVA analysis at 95% confidence level.

Results and discussion

Changes in the physical properties of the soil

Table 3.

Physical parameters of soil in the improvement experiment

Experiment	Particle Density (g/cm³)	Burk density (g/cm³)	Porosity (%)
DC1	2,10	1,31	37,46
DC2	2,16	1,01	53,32
DC3	1,99	0,90	54,93
DC4	2,11	0,97	54,08
DC5	2,16	0,98	54,60
DC6	2,28	1,00	56,14
CT1	2,03	0,92	54,90
CT2	1,87	0,81	56,55
CT3	1,81	0,72	60,21
CT4	2,29	1,13	50,69
CT5	2,06	0,95	53,99

The indices of physical properties, including density, bulk density, and porosity of soil, are displayed in Table 3.

In comparison to control 1 (DC1) - Coral sand, the densities of the 15% (CT2) and 20% (CT3) mixing experiment are lower, whereas experiment DC5 and DC6 exhibit higher densities. The other experiments demonstrated equivalent densities when compared to coral sand.

However, the bulk density of all formulations containing mixed substrates was lower than control 1 (DC1). As the ratio of organic substrate increased, the bulk density of the mixture decreased. Concurrently, the porosity of the mixture rose progressively from 37.46% (DC1) to 60.21% (CT3 - mixed 20% organic substrate).

Changes in soil chemistry

The alteration in the chemical properties of coral sand soil following renovation is evidenced by indicators including soil pH, electrical conductivity (EC), total nitrogen, and total phosphate (Table 4).

Table 4.

Soil Chemical Indices in the Enhancement Experiment

Experiment	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Total Nitrogen	Total Phosphate
DC1	8,15c	212de	0,32e	0,01e
DC2	8,23ab	314de	0,19e	0,02e
DC3	7,69efg	1.377b	1,58c	0,32c
DC4	7,68fg	1.083c	1,58c	0,35ab
DC5	7,69g	1.056c	1,58c	0,35a
DC6	7,26d	174d	0,92d	0,20d
CT1	7,65ef	1.048c	1,76bc	0,32bc
CT2	7,61e	1.043c	2,11b	0,35abc
CT3	7,50fg	1.879a	2,88a	0,34abc
CT4	7,84a	354de	0,69d	0,20d
CT5	7,74b	432d	0,83d	0,22d

The assessment of the physical and chemical parameters of the enhanced soil formula mixture indicates that:

The pH of the formulations comprising 10 - 20% substrate in conjunction with bentonite and microbial preparations was approximately 7.6. A decrease in pH was observed as the organic matter content increased. In contrast, the formulations containing 5% and 7.5% substrate exhibited lower pH levels than coral sand (8.15), registering at 7.84 and 7.74, respectively. The incorporation of bentonite generally resulted in an elevation of the substrate's pH.

The electrical conductivity (EC) of coral sand was measured at $212 \mu\text{S}/\text{cm}$, which was higher than DC6 (alluvial soil) but significantly lower than the experiment incorporating organic substrates. The EC exhibited a gradual increase with a rising ratio of organic substrates, with CT3 recording the highest EC at $1879 \mu\text{S}/\text{cm}$. Formulations containing 10% to 15% organic substrates did not demonstrate a distinct change in EC following mixing. The addition of bentonite and microbial preparations also did not result in a significant increase in the EC of the mixture utilizing substrates prior to planting.

The incorporation of substrates markedly enhanced the total nitrogen (N) and phosphorus (P) levels in the experimental formulations when compared to the coral sand control (DC1) and the coral sand combined with bentonite (DC2). Elevating the substrate mixing ratio to 10% resulted in a fivefold increase in N content in formulations Control 3 (DC3), Control 4 (DC4), Control 5 (DC5), and CT1. Further increases in the substrate mixing ratio to 15% (CT2) and 20% (CT3) led to a rise in N content from seven to nine times relative to Control 1. In contrast, CT4 and CT5 exhibited only a two- to threefold increase in N content compared to Control 1 (DC1). Notably, increasing the substrate amount from 5% to 7.5% resulted in a twentyfold increase in P content, while raising the mixed substrate proportion from 10% to 20% elevated P content by as much as thirty-five times compared to Control 1 (DC1). Nevertheless, no statistically significant differences were observed among formulations CT1, CT2, or CT3 at substrate mixing levels of 10%, 15%, or 20% at the $p < 0.05$ significance level.

Effects of improvement experiments on plants

EC changes during vegetable growing

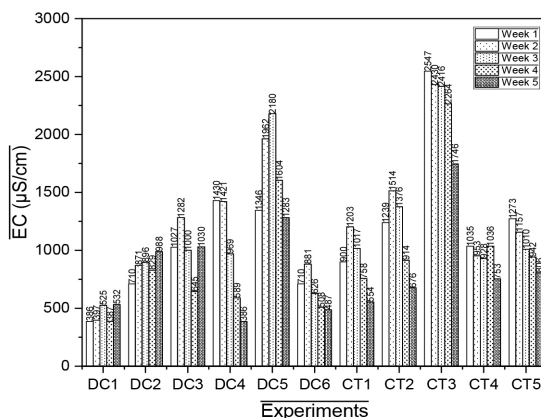


Fig. 1. EC in experimental

EC in experimental is illustrated in Figure 1. Generally, the EC measured directly in soil pots exceeds that obtained in laboratory settings. However, under actual growing conditions, where the water content in the substrate mixture is significantly lower than the dilution ratio used in the laboratory (1:5), the concentration of exchangeable cations in experimental pots is elevated. Consequently, the EC measured directly in experimental pots is greater than the laboratory results.

In the formulation utilizing organic substrate CT3 (20%), the recorded electrical conductivity (EC) was the highest at 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, gradually diminishing as the substrate ratio decreased, reaching its lowest point in coral sand ($< 500 \mu\text{S}/\text{cm}$). Throughout the monitoring weeks, the EC value of the mixture also exhibited a significant decline in the mixed formulations, whereas the control formulations DC1 and DC2 displayed an upward trend.

Impact of enhancement experiments on the leaf growth rate of vegetable plants

For vegetable plants, the quantity of leaves and leaf area serve as crucial indicators for assessing growth and yield potential at harvest.

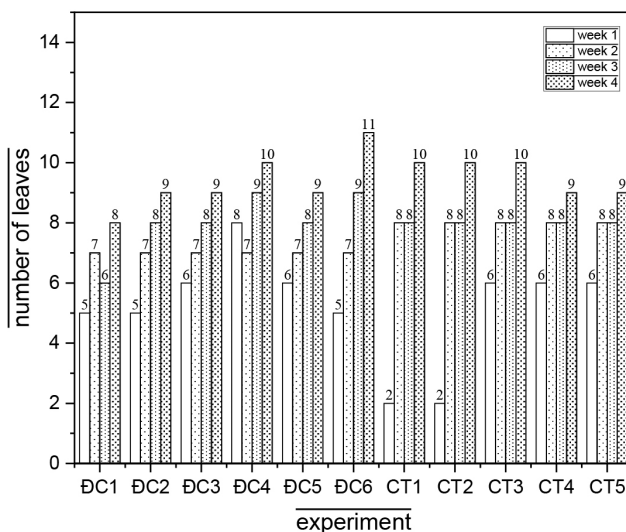


Fig. 2. Leaf growth rate in experimental formulations

Monitoring of leaf growth indicated a gradual increase in the number of leaves over the monitoring period, with the most pronounced growth observed

in experiment CT1 and CT2, which contained 10% and 15% organic substrate, respectively. In contrast, experiment DC1-coral sand and DC2-coral sand + bentonite exhibited a significantly lower rate of leaf growth compared to those mixed with organic substrate. Additionally, the application of microbial preparations (DC5, CT1 - CT5) resulted in an increased leaf count; however, no significant difference was noted when compared to experiments that did not incorporate microbial preparations (DC3).

Through monitoring, the final leaf count in formula DC1 was the lowest, averaging only 5 leaves across both plantings (Figure 3). Formula DC2 exhibited a leaf count ranging from 5 to 7 leaves. These two experiments were significantly lower than the substrate mixing experiment ($P < 0.05$). The remaining experiment had an average final leaf count of 7 to 8 leaves in both plantings, demonstrating a clear difference at the 95% statistical significance level.

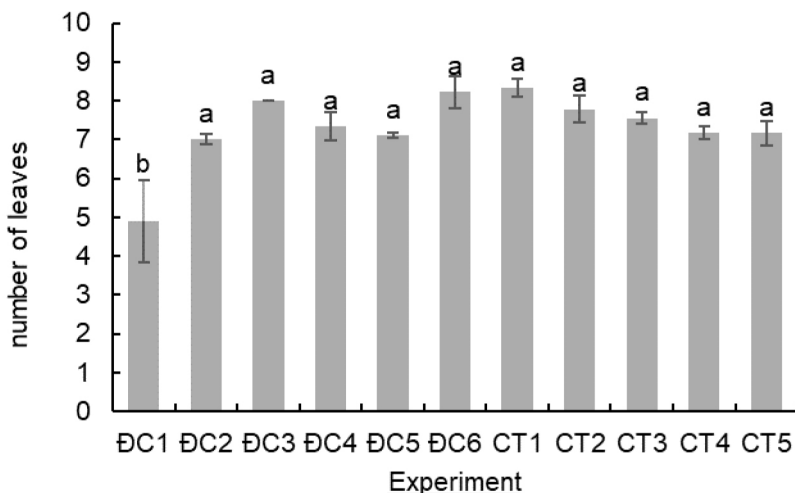


Fig. 3. Final count of leaves in experimental experiment (Characters in experiment denote the difference at a 95% confidence level between experimental experiment at the same monitoring time; error bars represent the standard error of the sample SE)

The evaluation of the leaf area index at harvest indicated that the leaf area in experiment DC3 - DC5 and CT1 - CT3, which incorporated 10 - 20% organic substrate combined with microbial products and bentonite at equivalent levels, exhibited no significant difference (Figure 4). In contrast, the leaf area in experiment DC1 and DC2 was significantly lower than that of the other experiment ($p < 0.05$). Formula DC6, utilizing alluvial soil, demonstrated the highest leaf area,

significantly surpassing the other experiments ($p < 0.05$). Experiment CT4 and CT5 exhibited a significantly greater leaf area than DC1 and DC2 ($p < 0.05$), yet remained lower than the other experiment at the statistical significance level.

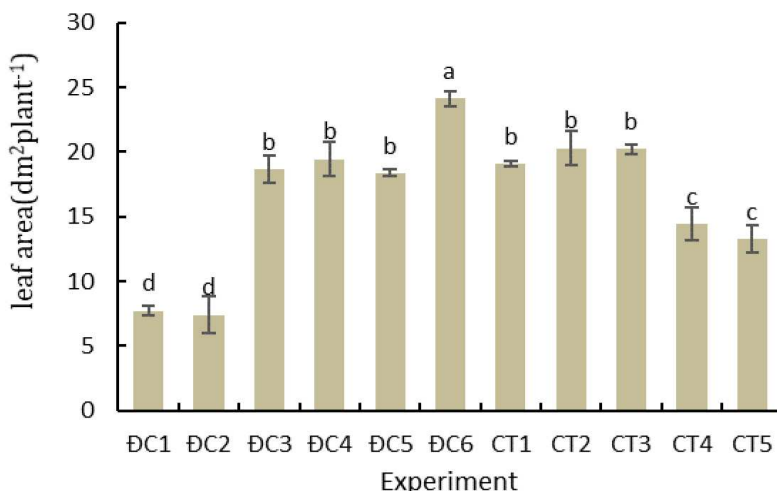


Fig. 4. Leaf area at harvest in experimental experiments (Characters in experiments denote the differences at a 95% confidence level between experimental experiments at the same monitoring time; error bars represent the standard error of the sample, SE.)

Impact of soil formulations on plant SPAD index

The SPAD index quantifies the chlorophyll content in crops, which is closely linked to their capacity to utilize nitrogen nutrients [1]. In the case of leafy vegetables, this factor significantly influences both the quality and yield at various fertilizer levels during harvest [2].

Through monitoring and evaluation, the SPAD index in experiments DC1 and DC2 was markedly lower than in the other experiments during both planting periods (Figure 5). This indicates that the efficiency of nitrogen utilization by plants in coral sand is inferior to that of the experiments incorporating organic substrates for soil enhancement. No significant difference was observed between the experiments when comparing those that utilized organic substrates and microbial preparations for soil improvement. Furthermore, the SPAD index in the improvement experiments did not fall below that of the control on alluvial soil. This suggests that the effectiveness of using substrates to enhance sand is considerable. However, the effect of the organic substrate ratio in the mixture of 5 - 20% on the SPAD index was negligible.

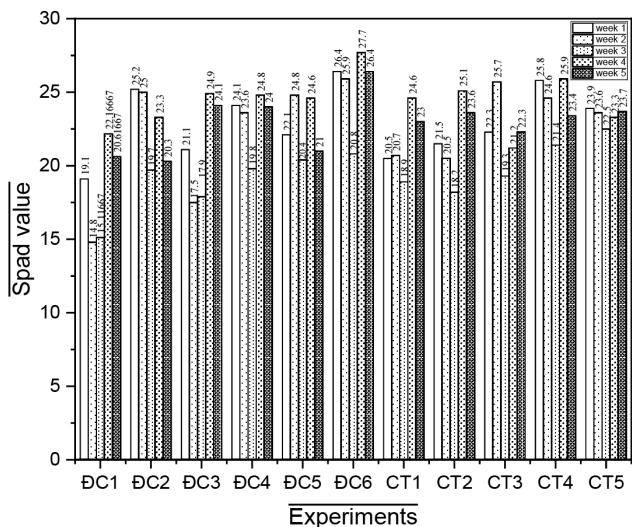


Fig. 5. Variation of the SPAD index of vegetables in experimental formulations throughout the growing weeks

The SPAD index at harvest, which ranged from 22 to 26 in the coral sand enhancement experiments utilizing microbial products and substrates containing bentonite, exhibited minimal variation (Figure 6).

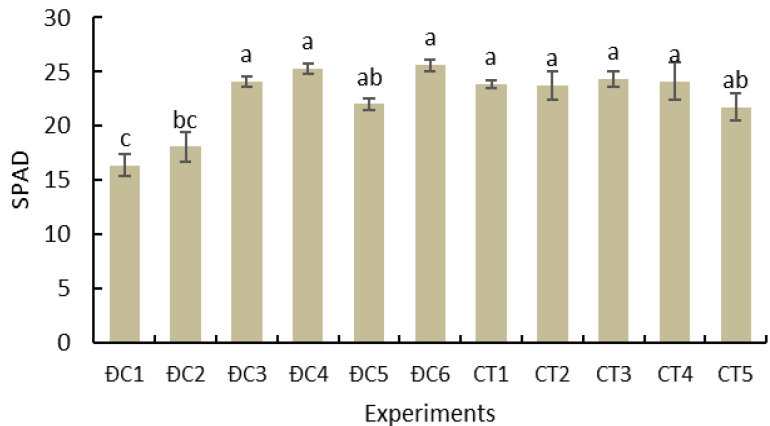


Fig. 6. SPAD index of vegetables in experimental formulations at harvest time (Characters in formulations indicate a 95% confidence difference between experimental formulations at the same time of follow-up; error bars represent SE sample errors)

Impact of enhancement experiments on the yield of vegetable crops

The harvested vegetable mass is illustrated in Figure 7. The mass is significantly greater in experiment DC6 utilizing alluvial soil (27 g/plant) compared to the other experiments. The superiority in harvested biomass is evident, as the initial growth rate of the other experiment is inferior to that of plants grown in alluvial soil. This may be attributed to the elevated pH and electrical conductivity of the mixed substrate experiments, which adversely affect plant growth, particularly during the initial planting phase [3]. This is further demonstrated by the slower growth rate in the number of leaves for the experiments employing coral sand and mixed substrate in comparison to DC6 during the first three weeks.

Utilizing coral sand can result in a harvest; however, the plant weight remains quite low, averaging around 5 g per plant. In contrast, the formulation incorporating bentonite - DC2 shows some enhancement, though its efficiency relative to DC1 remains ambiguous. While both formulations exhibit low pH and electrical conductivity comparable to alluvial soil, their capacity to enhance productivity is limited when relying solely on inorganic fertilizers.

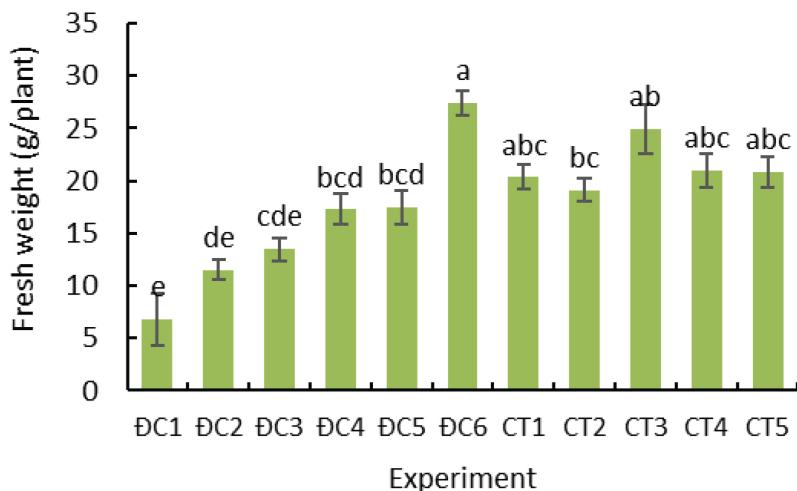


Fig. 7. Harvested vegetable mass across various experiments in batches (Characters in experiments denote the differences at a 95% confidence level between experimental experiments at the same monitoring time; error bars indicate sample error SE)

The harvested vegetable mass of the experiments utilizing mixed substrates in conjunction with microbial preparations and bentonite (DC4, DC5, CT1 to CT5) demonstrated a significant superiority over DC1 ($p < 0.05$). In comparison

to DC3, which employed only 10% organic substrates, the harvested vegetable mass of experiments DC4, DC5, and CT1 (utilizing substrates at the same level combined with microbial preparations and bentonite) was greater, although not statistically significant ($p < 0.05$).

The negligible difference in the volume of vegetables produced using both organic substrates, bentonite and microbial preparations (CT1 to CT5), indicates that the incorporation of organic matter ranging from 5% to 10% in conjunction with these preparations can sustain vegetable yield while decreasing enhancement costs by 15% or 20% relative to the substrate quantity. Nonetheless, assessing the factors that enhance the chemical and physical properties of the soil remains essential.



Fig. 8. Photos of vegetable plants in pre-harvest recipes

Discussion

Research indicates that the combined application of bentonite, biological substrates, and microbial preparations enhances the physical and chemical properties of coral sand, thereby benefiting cultivation and plant growth. The quality of the soil post-improvement is contingent upon the quantity of substrate added, particularly its porosity. Soil porosity is a critical factor, as higher porosity facilitates aeration and promotes robust root development. Initially, the coral sand exhibited a loose structural composition with a porosity of only 37.46%. Analysis of soil samples from experimental formulations post-improvement reveals an increase in porosity compared to the original coral sand sample. With a substrate mass of 10%, porosity reached 54.90%, nearly matching that of alluvial soil at 56.14%, indicating that the improved soil is nearly equivalent to alluvial soil in terms of porosity, making it suitable for vegetable cultivation.

Physical and chemical parameters of the soil, such as pH, reached 7.65, and electrical conductivity (EC) measured 1048 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In contrast, the initial coral

sand sample had a higher pH of 8.15 and a lower EC of 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The incorporation of organic substrate significantly elevated the levels of nitrogen and phosphorus in the mixture post-renovation, enhancing nutrient availability for improved plant growth compared to the coral sand control. With a bentonite component ratio of 3% (w/w), an organic substrate of 10%, and each of the polysaccharide mucilaginous microbial preparations and salt-tolerant beneficial microbial preparations at 0.25%, the growth metrics for mustard greens included an average leaf count of 7-8, an average leaf area of approximately 20 dm^2/plant , a harvested vegetable weight of 20 g/plant, and a SPAD index of 23.87. In comparison, the coral sand control sample yielded an average leaf count of only 5, a leaf area of 7.73 dm^2/plant , a SPAD index of 16.37, and a harvested vegetable weight of merely 6.77 g/plant. Furthermore, these metrics were not inferior to those of the alluvial soil control sample. Consequently, the indices at the 10% organic substrate addition ratio are more favorable for mustard greens than those of the other formulations. Although the 5% and 7.5% supplementation experiments yielded similar results, they did not lower soil pH. Therefore, the optimal formulation for enhancing coral sand is the inclusion of 10% organic substrate. The addition of microbial preparations and bentonite to coral sand resulted in increased EC and vegetable weight post-harvest, although no significant difference was observed compared to the formulations lacking these preparations and bentonite.

Conclusion

Through the evaluation of the growth and development of vegetable plants in coral sand remediation recipes, it was found that:

The improvement of coral sand is necessary, the coral sand remediation formulas all give good results. The addition of organic substrate increases porosity, reduces capacity, and enhances the nutrient content in the soil, thereby increasing the growth and harvest yield of vegetables compared to coral sand control. The formula adds 10% organic substrate to the growth indicators and the volume of harvested vegetables is not lower than the addition of 15% or 20% organic substrate, and the chemical indices (pH, EC) of the soil are at a level more suitable for vegetables than the rest of the formulas. The additional 5% and 7.5% formulations, although with the same yield as the above formulations, do not reduce soil pH. Therefore, the right formula for coral sand remediation is to use 10% organic substrate.

The effect of adding microbial preparations and bentonite to coral sand increases EC and post-harvest vegetable volume but is not significantly different from formulas without preparations and bentonite.

Acknowledgments. This project is supported and implemented by the Laboratory of Biochemistry - Department of Biotechnology/ Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center.

References

1. Hai, N.Q., Hao, L.T.M., Hiep, N.V., Chi, V.T.Q., Loi, N.T., Tuan, L.A., Lua, T.T., Sy, D.V., & Viet, N.C. (2022). Physical, chemical, and biological characteristics of sandy soil in the Truong Sa Archipelago. *Journal of Soil Science, Vietnam Soil Science Association*, 68, 13-17.
2. Tu, T.D. (1998). An overview of the natural conditions and soil cover characteristics of select islands in the Truong Sa archipelago. In *Collection of research works on the natural conditions and resources of the Truong Sa archipelago*. Science & Technology Publishing House, Hanoi, pp. 271-276.
3. Tuan, T.A. (2014). Investigation of the landscape characteristics of coral islands in the Truong Sa archipelago. *Journal of Marine Science and Technology*, 34, 238-245.
4. Bach, N.V. (2000). Mechanism of coral reef formation in the Truong Sa Sea area. *Geological Journal*, 260, 9-10.
5. Garbowski, T., Bar-Michalczyk, D., Charazińska, S., Grabowska-Polanowska, B., Kowalczyk, A., & Lochyński, P. (2023). An overview of natural soil amendments in agriculture. *Soil and Tillage Research*, 225, 105462. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105462> EDN: <https://elibrary.ru/uchgky>
6. Golubeva, O.Y., Korytkova, E.N., & Gusarov, V.V. (2005). Hydrothermal synthesis of magnesium silicate montmorillonite for polymer-clay nanocomposites. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 78, 26-32. <https://doi.org/10.1007/s11167-005-0225-z> EDN: <https://elibrary.ru/liwsww>
7. Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia. (2024). *Claying to ameliorate soil water repellence*. Natural resources factsheets.
8. Sitthaphanit, S., Bell, R.W., & Limpinuntana, V. (2010). Effect of clay amendments on nitrogen leaching and forms in a sandy soil. In Gilkes RJ, Prakongkep N (Eds.), *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World*.
9. Hassan, A.Z.A., & Mahmoud, A.W.M. (2013). The combined effect of bentonite and natural zeolite on sandy soil properties and productivity of some crops. *Topclass Journal of Agricultural Research*, 1(3), 22-28.
10. Zhou, L., Liu, J.H., Zhao, B.P., Xue, A., & Hao, G.C. (2016). Effects of soil amendment on soil characteristics and maize yield in Horqin Sandy Land. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 41(1), 012005. IOP Publishing.

11. Karbout, N., Moussa, M., Gasmi, I., & Bousnina, H. (2015). Effect of clay amendment on physical and chemical characteristics of sandy soil in arid areas: the case of ground south-eastern Tunisian. *Appl. Sci. Reports*, 11, 43-48.
12. Czaban, J., Czyz, E., Siebielec, G., & Niedzwiecki, J. (2014). Long-lasting effects of bentonite on properties of a sandy soil deprived of the humus layer. *International Agrophysics*, 28(3).
13. Chau, N.H., Ha, N.V., Tua, T.V., Ha, D.Q., & Hao, C.T. (2020). Effects of bentonite on cation-exchange and moisture retaining capacities in the sandy soil of Ninh Thuan province for asparagus cultivation. *Journal of Analytical Chemistry, Physics and Biology*, 25(1), 81-85.
14. Kumar, V., Thakur, A.K., Barothia, N.D., & Chatterjee, S.S. (2011). Therapeutic potentials of *Brassica juncea*: an overview. *CellMed*, 1(1), 2-1.
15. Siddiqui, M.H., Mohammad, F., & Khan, M.N. (2009). Morphological and physio-biochemical characterization of *Brassica juncea* L. Czern. & Coss. genotypes under salt stress. *Journal of Plant Interactions*, 4(1), 67-80. <https://doi.org/10.1080/17429140802227992> EDN: <https://elibrary.ru/ozvxjr>
16. Goel, P., Singh, A.K., & Trivedi, P.K. (2015). Abiotic stresses downregulate key genes involved in nitrogen uptake and assimilation in *Brassica juncea* L. *PLOS ONE*, 10(11), e0143645.
17. Saha, B., Mishra, S., Awasthi, J.P., Sahoo, L., & Panda, S.K. (2016). Enhanced drought and salinity tolerance in transgenic mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern & Coss.] overexpressing *Arabidopsis* group 4 late embryogenesis abundant gene (AtLEA4-1). *Environmental and Experimental Botany*, 128, 99-111.
18. Singh, I., Kumar, R., Kaur, S., Singh, H., & Kaur, R. (2019). Combining ability studies using diallel mating design in Indian mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern & Coss.]. *Indian Journal of Agricultural Research*, 53, 366-369.
19. Jat, R.S., & Choudhary, M. (2019). Nitrogen utilization efficiency variability in genotypes of Indian mustard (*Brassica juncea*) under contrasting N supply. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), 2435-2446.
20. Phuong, L.N., Son, D.H., Giang, N.D.C., & Dong, N.M. (2018). Salinity tolerance potential and ability to improve salinity alluvial soil chemistry of broccoli (*Brassica juncea* L.). *Vietnam Journal of Agricultural Science and Technology*, 88(3), 72-79.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Cong Tinh Nguyen: study conception and design, drafting of the manuscript. writing of the manuscript.

Duy Nhan Vu: study conception, editing of the draft of the manuscript.

Ngoc Tan Bui: data collection and analysis.

Thi Thu Trang Dinh: statistical data analysis.

Thi Hue Le: data collection and analysis.

Minh Tien Vu: statistical data analysis.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Cong Tinh Nguyen, Master of Science, Researcher, Research Assistant, Department of Biotechnology

*Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
tinhdtk2k48@gmail.com*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6535-6101>

Duy Nhan Vu, Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Laboratory

*Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
vuduyhanvn@gmail.com*

Ngoc Tan Bui, Master of Science, Researcher, Lecturer

*Vietnam National University of Agriculture
Ngo Xuan Quang Str., Gia Lam District, Hanoi, Vietnam
bntan@vnua.edu.vn*

Thi Thu Trang Dinh, Master of Science, Researcher, Research Assistant

*Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
trangdt1806@gmail.com*

Thi Hue Le, Master of Science, Researcher, Research Assistant

*Joint Vietnam - Russia Tropical Science and Technology Research Center
63, Nguyen Van Huyen Str., Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
huelebiotech85@gmail.com*

Minh Tien Vu, Biotechnology Engineer

*Graduate University of Science and Technology
18, Hoang Quoc Viet Str., Cau Giay, Hanoi, Vietnam
minhtienvu0@gmail.com*

Поступила 26.12.2024

После рецензирования 01.02.2025

Принята 14.02.2025

Received 26.12.2024

Revised 01.02.2025

Accepted 14.02.2025

САДОВОДСТВО И ЛЕСОВОДСТВО

HORTICULTURE AND FORESTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1167

EDN: MYFRJE

УДК 630.5(561.1)



Научная статья

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ВЫСОТЫ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ СИБИРСКОЙ В ДРЕВОСТОЯХ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

С.Л. Шевелев, П.В. Михайлов

Аннотация

Обоснование. Высота древостоев является важным таксационным показателем, тесно связанным с производительностью древостоев и широко используется при характеристике их условий местопроизрастания, как в пределах отдельных лесорастительных регионов, так и в процессе сопоставления формирования древостоев в разных климатических зонах. Связь высот деревьев с их диаметрами является важным аспектом вертикальной структуры древостоев и в конечном итоге находит использование при построении основных нормативов таксации товарной структуры.

Цель. Установить особенности изменения высот древостоев ели сибирской в спелых древостоях Енисейского кряжа – горного таежного региона, с достаточной суровыми условиями произрастания древесной растительности.

Материалы и методы Объектом исследования явились спелые древостои ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на Енисейском кряже – горном массиве западной части Среднесибирского плоскогорья. В основу работы положены материалы 15 пробных площадей, заложенных в древостоях с преобладанием в запасе ели сибирской.

Результаты. В ходе математического анализа удалось выделить несколько рядов естественного развития древостоев в пределах одной группа типов леса и даже в пределах одного типа леса. По результатам исследования можно констатировать, что использование бонитетной основы при составлении таксаци-

онных нормативов для еловых древостоев не оправдан, так как в бонитетную шкалу заложено отсутствие приростов в высоту в древостоях значительного возраста. Интенсивность роста древостоев ели в высоту можно разделить на три периода с различной изменчивостью комплексного оценочного показателя.

Заключение. В результате выполнения данной работы можно констатировать, что спелые, низкопроизводительные древостои ели в суровых климатических условиях Енисейского кряжа имеют ряд особенностей роста деревьев в высоту. В этой связи использование бонитетной основы для составления таксационных нормативов для еловых древостоев не оправдан, так как в бонитетную шкалу заложено отсутствие приростов в высоту в древостоях значительного возраста, следовательно, для специфических условий местопроизрастания древостоев ели на Енисейском кряже требуется разработка собственной нормативной базы таксации.

Ключевые слова: Енисейский кряж; ель сибирская; средняя высота; спелые древостои; естественный ряд развития древостоя; комплексный оценочный показатель

Для цитирования. Шевелев, С. Л., & Михайлов, П. В. (2025). Особенности динамики высоты деревьев ели сибирской в древостоях Енисейского кряжа. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 319-335. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1167>

Original article

DYNAMICS OF THE HEIGHT OF SIBERIAN SPRUCE IN THE STANDS OF THE YENISEI RIDGE

S.L. Shevelev, P.V. Mikhailov

Abstract

Background. The height of trees is an essential indicator in forest inventory, closely associated with stand productivity. It is a widely utilized metric for characterizing site conditions, both within individual forests and for comparing stand development across diverse climatic zones. The relationship between tree height and diameter is a pivotal aspect of forest stand vertical structure, ultimately informing the development of primary inventory standards for the commodity structure.

Purpose. The objective of this study is to identify the characteristics of height change in Siberian spruce trees in mature stands of the Yenisei Ridge, a mountain taiga region with challenging conditions for woody vegetation growth.

Materials and Methods. The study was conducted in mature stands of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) on the Yenisei Ridge, a mountain range in the western part of the Central Siberian Plateau. The research was based on data obtained from 15 research plots placed in stands with a predominance of Siberian spruce in the stand composition, as determined by the largest growing stock value.

Results. In the course of mathematical analysis, a number of series of natural development of forest stands were identified, both within a group of forest types and even within a single forest type. The findings of the study indicate that the application of the bonitet classes scale in the formulation of inventory standards for spruce stands is unwarranted, given that the bonitet scale encompasses the absence of growth in height in stands of considerable age. The growth intensity of spruce stands in height can be delineated into three phases, each characterized by a distinct variability of the complex assessment indicator.

Conclusion. The findings of this research indicate that mature, low-productivity spruce stands subjected to the harsh climatic conditions of the Yenisei Ridge exhibit a number of characteristics associated with tree growth in height. The utilization of a bonitet scale for the establishment of inventory standards for spruce stands is not a viable proposition. This is due to the fact that the bonitet scale incorporates the absence of height increments in stands of considerable age. Consequently, in order to ensure the suitability of the regulatory forest inventory base for spruce stands on the Yenisei Ridge, it is essential to develop a bespoke approach that takes into account the specific site conditions.

Keywords: Yenisei Ridge; Siberian spruce; mean height; mature stands; natural series of forest stand development; complex assessment indicator

For citation. Shevelev, S. L., & Mikhailov, P. V. (2025). Dynamics of the height of Siberian spruce in the stands of the Yenisei Ridge. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 319-335. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1167>

Введение

Интенсивная эксплуатация коренных лесов бореальной зоны, привело к фрагментации лесных ландшафтов и изменению структуры лесов [12; 18; 20; 21]. Как следствие все это влечет за собой их замену на производные лесные сообщества, что минимизирует возможности изучения фундаментальных закономерностей развития биogeоценозов, сформировавшихся за длительные исторические периоды [4, 9]. Согласно Shorohova et al. [20] развитие древостоев в бореальных лесах Евразии выявило многочисленные пути сукцессии во всех типах девственных лесов. Старовозрастные древостои, разновозрастность которых обусловлена особенностями про-

цессов лесообразования (темнохвойные), или вызвана мелкомасштабными нарушениями, формируются в течение нескольких сотен лет сукцессионного развития. Серьезные нарушения, такие как лесные пожары, ветровалы, буреломы, повреждения насекомыми и болезни, могут изменить структуру и динамику древостоя, физически разрушая древесный полог и даже выкорчевывая деревья [14].

Понимание роли соответствующих таксационных характеристик основных лесообразующих пород имеет решающее значение при разработке рациональных методов адаптивного лесоправления [10].

В настоящее время исследование горизонтальных компонентов структуры лесных насаждений, таких как густота и сумма площадей сечения стволов, показали наличие их существенных изменений вдоль экологических и эдафических градиентов [16; 19]. Однако варьирование вертикальных компонентов структуры леса и их причины остаются гораздо менее изученными. И это несмотря на имеющиеся данные, свидетельствующие о том, что высота дерева при заданном диаметре ствола может значительно варьировать у разных видов [13] и в разных регионах [17].

Высота деревьев является фактором, важным для определения объема древесины отдельных деревьев и запаса древостоев. Изменение высот деревьев, формирующих древостой, связь их с другими таксационными показателями зависят от ряда многих факторов, включающих не только климат и богатство условий местопроизрастания, но и особенности горизонтальной структуры древостоев и т.п.

В условиях изменения климата, т.е. повышения эвапотранспирации и снижения количества осадков, с возрастом у отдельных деревьев замедляется рост в высоту и увеличивается рост диаметра [15], что сказывается на средней высоте древостоя.

Цель исследования – установить особенности изменения высот древостоев ели сибирской в спелых древостоях Енисейского края – горного таежного региона, с достаточно суровыми условиями произрастания древесной растительности.

В рамках существующей проблемы для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- установление связи высот деревьев ели сибирской с их диаметрами в спелых древостоях Енисейского края и выявление рядов естественного развития;
- анализ динамики высот в древостоях ели с использованием «комплексного оценочного показателя» (КОП).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования явились спелые древостои ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на Енисейском кряже – горном массиве западной части Среднесибирского плоскогорья. Резко-континентальный климат, смешанный горно-равнинный характер рельефа, с преобладающими высотами 700-900 метров над уровнем моря, формируют достаточно суровые условия местопроизрастания, что находит отражение в невысокой производительности древостоев.

В основу работы положены материалы 15 пробных площадей, заложенных в древостоях с преобладанием в запасе ели сибирской. В составе древостоев значительные доли приходятся на пихту сибирскую (*Abies sibirica* Ledeb), сосну кедровую сибирскую (*Pinus sibirica* Du Tour) и березу повислую (*Betula pendula* Roth). На пробных площадях срублено и обмерено 159 модельных деревьев. При закладке пробных площадей соблюдались требования отраслевого стандарта – ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метода закладки».

В таблице 1 приведена характеристика древостоев пробных площадей.

Высота древостоев является важным таксационным показателем, тесно связанным с производительностью древостоев. Этот признак широко используется при характеристике их условий местопроизрастания, как в пределах отдельных лесорастительных регионов, так и в процессе сопоставления формирования древостоев в разных климатических зонах (Усольцев и др. [8]).

Еще в начале прошлого века М.М. Орлов, опираясь на труды немецкого лесоведа Эттеля, разработал бонитетную шкалу, которой мы пользуемся до сих пор, где за базовый признак была принята средняя высота древостоев [4]. Характеризуя прежде всего условия местопроизрастания древостоев, М.М. Орлов совершенно верно использовал среднюю высоту, справедливо считая ее наиболее консервативным показателем, опосредованным условиями местопроизрастания (прежде всего богатством и влажностью почв) и связанным с производительностью древостоев.

В работах В.Г. Стороженко [5,6,7], посвященных горизонтальной структуре лесов еловых формаций европейской тайги России и структуре древесных фракций древесины еловых биогеоценозов, отмечается что формирование структур девственных лесных биогеоценозов, развивающихся без вмешательства в их сукцессионную динамику человека [4] и каких-либо экзогенных факторов воздействия, подчинено эволюционным

законам балансового равновесия. Это состояние определяет основное содержание понятия устойчивости лесных сообществ и может рассматриваться как базовая, созданная эволюцией платформа функционирования лесного сообщества.

Таблица 1.

Характеристика древостоев пробных площадей

№ ПП	Состав	Средние главного элемента леса		Полнота древостоя	Запас, м ³ /га	Густота древостоя, шт./га	Бонитет	Тип леса
		Высота, м	Диаметр, см					
1	6Е2Б1К1П	19,5	20,9	0,82	198	1016	IV	Е.черн.
2	6Е2Б1К1П	16,0	19,6	0,80	179	1029	V	Е.зелен.
3	5Е2К2Б1П	17,5	22,3	0,72	193	732	V	Е.зелен.
4	5ЕЗБ1К1П	14,5	18,8	0,64	143	833	V	Е.черн.
5	4ЕЗП2Б1К	13,2	18,7	1,27	269	1472	V	Е.черн.-зелен.
6	5Е2К2Б1П	16,8	19,4	0,62	149	794	V	Е.черн.
7	4ЕЗК2Б1П	16,5	18,6	0,73	174	936	V	Е.черн.-зелен.
8	5Е2К2Б1П	18,7	21,6	0,77	182	746	IV	Е.зелен.
9	5Е2К2Б1П	17,0	19,8	0,69	170	843	V	Е.черн.-зелен.
10	7Е2П1Б ед.К	18,0	20,5	0,70	198	837	V	Е.черн.-зелен.
11	6Е2П1К1Б	17,1	18,8	1,15	259	1634	V	Е.зелен.
12	7Е2П1Б+К	20,2	22,9	0,72	176	878	IV	Е.зелен.
13	7Е2П1Б+К	18,3	21,1	1,04	259	1217	IV	Е.зелен.
14	4ЕЗП2Б1П	17,6	19,2	0,85	234	1090	V	Е.черн.
15	6ЕЗБ1П+К	16,3	17,5	0,75	153	1002	V	Е.черн.-зелен.

Опираясь на это, можно утверждать, что изучение особенностей формирования и взаимосвязей между элементами таких биологических систем весьма важно и актуально.

Результаты и обсуждение

Ограниченное число модельных деревьев, срубленных в пределах пробных площадей не позволило детально охарактеризовать возрастную структуру еловых древостоев, подвергшихся исследованию, однако позволяет утверждать о их разновозрастности.

В таблице 2 приведены амплитуды колебания возрастов модельных деревьев и редуccionные числа, соответствующие минимальной ($R_{\min}$) и максимальной ($R_{\max}$) по возрасту моделям.

Таблица 2.

Показатели возрастной структуры древостоев

№ пробной площади	$R_{\min}$	$R_{\max}$	Амплитуда возрастов моделей, лет
1	0,39	1,56	190
2	0,37	1,58	202
3	0,42	1,87	240
4	0,39	1,86	228
5	0,51	1,83	223
6	0,48	1,71	194
7	0,46	1,77	217
8	0,40	1,60	222
9	0,66	1,89	181
10	0,42	1,75	213
11	0,60	1,73	144
12	0,45	1,38	145
13	0,46	1,54	177
14	0,41	1,56	178
15	0,53	1,31	139

Средний состав, полученный путем обобщения формул состава древостоев на отдельных пробных площадях:

5,4Е 1,4К 1,4П 1,8Б.

Ряды распределения числа стволов по диаметру, закономерно для темновойных древостоев, растянуты. Редуccionные числа наибольших стволов по диаметру в древостоях всех пробных площадей превышают 2.0, ряды трех пробных площадей – 2.5 и трех достигают 3.0.

Все это подтверждает то, что процесс лесообразования в исследуемых древостоях идет практически постоянно. Древостои состоят из деревьев различного возраста и размера, что значительно осложняет выделение возрастных поколений при визуальной оценке [11; 14].

Важным аспектом вертикальной структуры древостоев являются связи высот деревьев с их диаметрами. Эти связи в конечном итоге находят использование при построении основных нормативов таксации товарной структуры.

Анализ данных позволил установить функцию наиболее приемлемую для этой цели, она соответствует уравнению логарифмического вида:

$$y = a + b \cdot \ln(x) \quad (1)$$

На рисунке 1 показаны кривые высот древостоев пробных площадей.

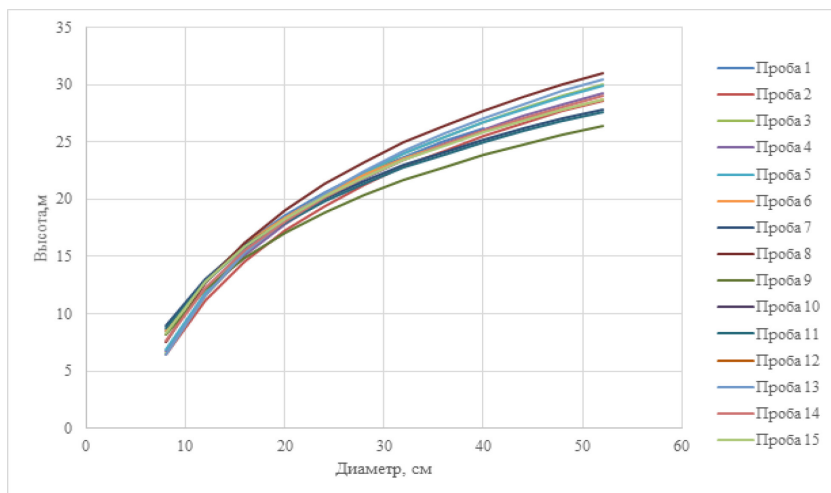


Рис. 1. Связь высот деревьев с диаметрами на высоте 1,3 м в древостоях ели

В таблице 3 приведены величины коэффициентов уравнений и показатели их адекватности.

Таблица 3.

Коэффициенты и показатели адекватности уравнений “кривых высот”

№ п.п.	a	b	R ²
1	-14,270702	10,974228	0,947
2	-18,334621	11,888733	0,850
3	-19,579489	12,556732	0,958
4	-18,19495	12,01361	0,952
5	-18,853073	12,347217	0,928
6	-13,878416	10,788159	0,924
7	-12,03057	10,093347	0,902
8	-18,477895	12,524118	0,938
9	-12,093562	9,7470841	0,879
10	-20,784238	13,071784	0,941

11	-12,282108	10,103506	0,853
12	-21,157445	13,045723	0,941
13	-20,325269	12,851138	0,863
14	-16,112347	11,413698	0,920
15	-14,281482	10,874508	0,964

Оценка совокупности кривых позволяет рекомендовать их к дальнейшему использованию при составлении таксационных нормативов для древостоев ели Енисейского края.

Ход роста по высоте деревьев в еловых древостоях также с достаточной адекватностью можно отобразить функцией (1) (таблица 4).

Таблица 4.

Коэффициенты и показатели адекватности уравнений хода роста по высоте

№ п.п.	a	b	R ²
1	-32,57214	10,495742	0,696
2	-35,254206	10,770341	0,568
3	-39,112047	11,80448	0,576
4	-36,312393	11,040395	0,474
5	-20,855233	8,5131023	0,287
6	-75,548943	18,584708	0,864
7	-15,010856	6,8621558	0,485
8	-48,989358	13,804163	0,719
9	-59,598238	14,761551	0,724
10	-43,865378	13,164429	0,553
11	-49,074638	13,747878	0,497
12	-47,577209	13,868805	0,880
13	-69,650748	18,123646	0,662
14	-18,079187	7,4731816	0,312
15	-36,973934	11,025794	0,314

Однако линии хода роста по высоте отличаются значительной изменчивостью в форме кривых, (рисунок 2) несмотря на то, что все древостои относятся к одной группе типов леса.

В совокупности линий хода роста по высоте можно выделить несколько рядов естественного развития древостоев в пределах одной группы типов леса и даже в пределах одного типа леса, что вызывает определенные трудности при подборе исходных данных в процессе построения таксационных нормативов, отражающих динамику таксационных показателей

древостоев или получении математических моделей, отражающих этот процесс.

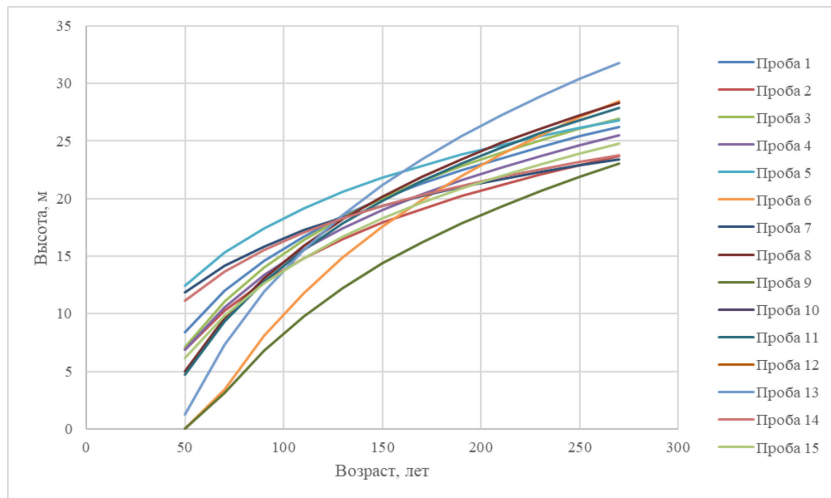


Рис. 2. Кривые хода роста по высоте еловых древостоев пробных площадей

Данная ситуация не является чем-то из ряда вон выходящих не только для древостоев Енисейского края. Рассматривая девственные ельники европейской части России В.Г. Стороженко [7] отмечал, что на близких по условиям роста территориям можно встретить участки леса, входящие в один биогеоценоз, но различающиеся по возрастным и динамическим параметрам. Он относит такое природное биоразнообразие к критериям определяющим устойчивость лесных сообществ.

Однако, несмотря на неоднозначность в процессах динамики древостоев, использование типологической основы, по сравнению с бонитетной при построении таксационных нормативов кажется более предпочтительным.

У бонитетной основы имеется существенный недостаток – в шкале М.М. Орлова заложено отсутствие прироста у древостоев по высоте, начиная со II класса бонитета и ниже, со 140 лет. Фактически же прирост разной интенсивности происходит. Однако при определении класса бонитета по средней высоте в спелых древостоях оказывается, что после прохождения кривой точки среднего возраста, ход роста начинает постепенно идти по линии более высокого класса бонитета, так как бонитетной шкале для всех последующих возрастов приведены не меняющиеся «вилки» высот.

Динамику высот в древостоях ели можно проследить с использованием «коэффициента напряженности роста», который еще называют «комплексным оценочным показателем» (КОП). Он рассчитывается как отношение высоты дерева, выраженной в сантиметрах, к площади поперечного сечения ствола на высоте 1,3 м, выраженной в сантиметрах.

Физический смысл комплексного оценочного показателя заключен в характеристике величины части древесного ствола, формирование которого обеспечено единицей площади поперечного сечения. Этот показатель предложен К.К. Высоцким [2; 11].

На рисунке 3 показано изменение этой характеристики у деревьев ели различного возраста.

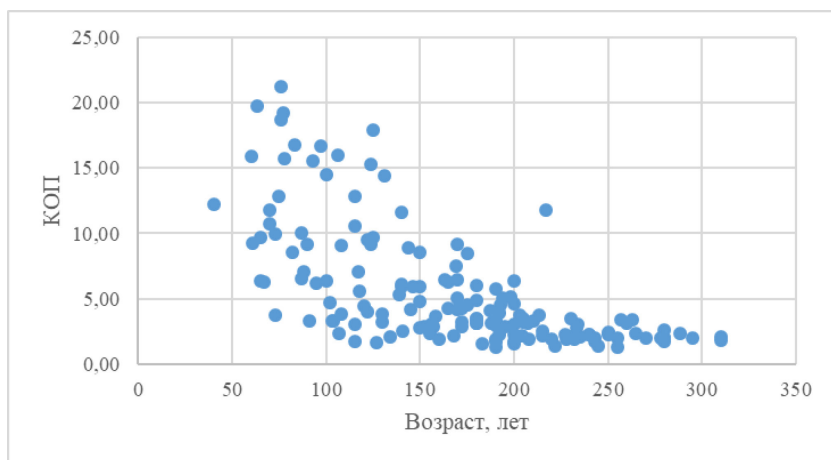


Рис. 3. Динамика коэффициента интенсивности роста деревьев ели

Исходя из графика, можно выделить три группы коэффициентов интенсивности роста деревьев ели в высоту. В первую группу входят коэффициенты деревьев, имеющих возраст до 150 лет. Группа отличается значительным варьированием показателя, в этот же возрастной промежуток наиболее четко проявляются индивидуальные свойства каждого дерева, его генетические особенности, влияние условий произрастания в пределах древостоев, влияние особенностей размещения, обеспечивающих возможности конкуренции за свет, минеральные вещества и т.п.

Вторая группа характеризуется средней изменчивостью признака и формируется из деревьев возраста 151-200 лет

И третья группа представлена деревьями, возраст которых превышает 200 лет. В этой группе изменчивость и величина коэффициентов интенсивности роста снижена до минимальных значений. Возраст деревьев приближен к возрасту естественного отпада.

Таким образом, можно констатировать, что спелые, низкопроизводительные древостои ели в суровых климатических условиях Енисейского края имеют ряд особенностей роста деревьев в высоту.

Прежде всего это находит отражение в том, что в пределах совокупности древостоев, относящихся к одной группе типов леса и даже к одному типу леса формируются несколько различающихся естественных рядов развития. Детализация периодов интенсивности роста деревьев ели и использование ее при разработке нормативов отражающих динамику таксационных показателей древостоев или динамику их товарной структуры в сочетании с кривыми хода роста в высоту может с одной стороны явиться элементом раскрывающим особенности процесса развития биогеоценоза, а с другой уточняющим содержание лесотаксационных нормативов.

Данное, обладающее новизной направление, позволит разработать более совершенные методики построения таблиц хода роста, в том числе для отдельных элементов леса сложных, смешанных насаждений.

Заключение

Еловые леса Енисейского края, формируясь в суровых горных условиях Средней Сибири, обладают рядом особенностей основными из которых являются низкая производительность и достаточно высокая полнота, иногда превышающая максимальные стандартные значения. Анализ особенностей роста еловых древостоев в высоту, установленные связи высот и диаметров деревьев в отдельных древостоях показали на наличие нескольких различающихся естественных рядов формирования древостоев.

Рассмотрение ряда коэффициентов интенсивности роста позволило выделить несколько периодов в величине этого показателя.

На основе полученных результатов, предлагается, при установлении особенностей вертикального формирования древостоев совместное рассмотрение хода роста и показателей интенсивности роста, что позволит детализировать процесс развития формации и более обоснованно выделить отдельные ряды естественного развития древостоев.

В заключение нельзя не отметить, что для специфических условий местопроизрастания древостоев ели на Енисейском крае требуется разработка собственной нормативной базы таксации.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем» проекта «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» (№ FEFE-2024-0029).

Список литературы

1. Балакир, М. В., & Машковский, В. П. (2011). Строение еловых насаждений искусственного происхождения по верхней высоте в условиях Беларуси. В *Леса Евразии — Брянский лес: Материалы XI Международной конференции молодых ученых* (с. 34–35). Москва: МГУЛ. EDN: <https://elibrary.ru/erfrln>
2. Высоцкий, К. К. (1962). *Закономерности строения смешанных древостоев*. Москва: Гослесбумиздат. Т. 177.
3. Дерюгин, А. А. (2021). Формирование еловых древостоев в парцеллярных структурах с одинаковой густотой предварительной генерации ели после рубки березняка. *Сибирский лесной журнал*, 2, 96–102. <https://doi.org/10.15372/SJFS20210209> EDN: <https://elibrary.ru/manmyu>
4. Орлов, М. М. (1929). *Лесная таксация* (3-е изд.). Ленинград: Лесн. хоз-во и лесн. пром-сть.
5. Стороженко, В. Г. (2022). Особенности горизонтальной структуры лесов еловых формаций европейской тайги России. *Лесной журнал*, 2, 39–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-39-49> EDN: <https://elibrary.ru/ddxaa>
6. Стороженко, В. Г. (2022). Структуры древесных фракций и объемы компонентов древесины еловых биогеоценозов тайги европейской России. *Сибирский лесной журнал*, 2, 29–40. <https://doi.org/10.15372/SJFS20220204> EDN: <https://elibrary.ru/yfuoiq>
7. Стороженко, В. Г. (2019). Коренные девственные ельники как эталоны биоразнообразия и устойчивости зональных формаций. *Хвойные бореальной зоны*, 37(1), 55–60. EDN: <https://elibrary.ru/yzcueh>
8. Усольцев, В. А., Цепордей, И. С., & Часовских, В. П. (2023). Высота древостоев ели (род *Picea*) как характеристика их продуктивности: климатические аспекты. *Хвойные бореальной зоны*, 41(5), 419–424. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-5-419-424> EDN: <https://elibrary.ru/quavti>
9. Фалалеев, Э. Н. (1964). *Пихтовые леса Сибири и их использование*. Москва: Лесная Промышленность. 167 с.

10. Цепордей, И. С. (2024). Изменение высоты деревьев и древостоев некоторых хвойных и лиственных видов в климатических градиентах Евразии. *Хвойные бореальной зоны*, 42(2), 45–52. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-45-52> EDN: <https://elibrary.ru/eujlgg>
11. Шевелев, С. Л., Шолохова, М. Ю., Михайлов, П. В., & др. (2019). Особенности использования комплексного оценочного показателя при характеристике формирования древостоев лиственницы сибирской. *Хвойные бореальной зоны*, 37(1), 61–67. EDN: <https://elibrary.ru/yzcuep>
12. Granström, A. (2001). Fire management for biodiversity in the European boreal forest. *Scandinavian Journal of Forest Research. Supplement*, 3, 62–69.
13. King, D. A. (1996). Allometry and life history of tropical trees. *Journal of Tropical Ecology*, 12, 25–44.
14. Lin, C., Tsogt, K., & Zandraabal, T. (2016). A decompositional stand structure analysis for exploring stand dynamics of multiple attributes of a mixed-species forest. *Forest Ecology and Management*, 378, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.022> EDN: <https://elibrary.ru/wromnl>
15. Lines, E. R., Zavala, M. A., Purves, D. W., et al. (2012). Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1017–1028. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00746.x> EDN: <https://elibrary.ru/rclcfkj>
16. Malhi, Y., Wood, D., Baker, T. R., et al. (2006). The regional variation of aboveground live biomass in old growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, 12, 1107–1138.
17. Nogueira, E. M., Nelson, B. W., & Fearnside, P. M., et al. (2008). Tree height in Brazil's "arc of deforestation": shorter trees in South and Southwest Amazonia imply lower biomass. *Forest Ecology and Management*, 255, 2963–2972.
18. Nordlind, E., & Östlund, L. (2003). Retrospective comparative analysis as a tool for ecological restoration: a case study in a Swedish boreal forest. *Forestry*, 76, 243–251. EDN: <https://elibrary.ru/iojpfx>
19. Paoli, G., Curran, L., & Slik, J. (2008). Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in Southwestern Borneo. *Oecologia*, 155, 287–299. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0906-9> EDN: <https://elibrary.ru/slzopx>
20. Shorohova, E., Kuuluvainen, T., Kangur, A., & Jõgiste, K. (2009). Natural stand structures, disturbance regimes and successional dynamics in the Eurasian boreal forests: a review with special reference to Russian studies. *Annals of Forest Science*, 66(2), 1–20. <https://doi.org/10.1051/forest/2008083> EDN: <https://elibrary.ru/lltdev>

21. Siitonen, J. (2001). Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms: Fennoscandian boreal forests as an example. *Ecological Bulletin*, 49, 11–41.

References

1. Balakir, M.V., & Mashkovsky, V.P. (2011). Structure of artificial spruce stands by upper height in Belarusian conditions. In *Forests of Eurasia — Bryansk Forest: Proceedings of the XI International Conference of Young Scientists* (pp. 34–35). Moscow: MGUL. EDN: <https://elibrary.ru/erfrln>
2. Vysotsky, K.K. (1962). *Regularities of mixed stands structure*. Moscow: Goslesbumizdat. Vol. 177.
3. Deryugin, A.A. (2021). Formation of spruce stands in parcel structures with the same density of preliminary spruce generation after birch stand cutting. *Siberian Journal of Forest Science*, 2, 96–102. <https://doi.org/10.15372/SJFS20210209> EDN: <https://elibrary.ru/manmyu>
4. Orlov, M.M. (1929). *Forest assessment*. 3rd ed. Leningrad: Lesn. hoz-vo i lesn. prom-st.
5. Storozhenko, V.G. (2022). Features of horizontal structure of forests of spruce formations in the European taiga of Russia. *Forest Journal*, 2, 39–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-39-49> EDN: <https://elibrary.ru/ddxaa>
6. Storozhenko, V.G. (2022). Structures of wood fractions and volumes of wood components in spruce biogeocenoses of the European Russian taiga. *Siberian Journal of Forest Science*, 2, 29–40. <https://doi.org/10.15372/SJFS20220204> EDN: <https://elibrary.ru/yfuoiq>
7. Storozhenko, V.G. (2019). Virgin primeval spruce forests as standards of biodiversity and stability of zonal formations. *Conifers of the Boreal Zone*, 37(1), 55–60. EDN: <https://elibrary.ru/yzcueh>
8. Usoltsev, V.A., Tsepordei, I.S., & Chasovskikh, V.P. (2023). Height of spruce stands (genus *Picea*) as a characteristic of their productivity: climatic aspects. *Conifers of the Boreal Zone*, 41(5), 419–424. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-5-419-424> EDN: <https://elibrary.ru/qoavti>
9. Falaleev, E.N. (1964). *Fir forests of Siberia and their use*. Moscow: Lesn. prom-st. 167 p.
10. Tsepordei, I.S. (2024). Changes in tree and stand height of some coniferous and deciduous species in climatic gradients of Eurasia. *Conifers of the Boreal Zone*, 42(2), 45–52. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-45-52> EDN: <https://elibrary.ru/eujlgg>
11. Shevelev, S. L., Sholokhova, M. Yu., Mikhailov, P. V., et al. (2019). Features of using a comprehensive evaluation indicator in characterizing the formation of

- Siberian larch stands. *Conifers of the Boreal Zone*, 37(1), 61–67. EDN: <https://elibrary.ru/yzcuep>
12. Granström, A. (2001). Fire management for biodiversity in the European boreal forest. *Scandinavian Journal of Forest Research. Supplement*, 3, 62–69.
 13. King, D. A. (1996). Allometry and life history of tropical trees. *Journal of Tropical Ecology*, 12, 25–44.
 14. Lin, C., Tsogt, K., & Zandraabal, T. (2016). A decompositional stand structure analysis for exploring stand dynamics of multiple attributes of a mixed-species forest. *Forest Ecology and Management*, 378, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.022> EDN: <https://elibrary.ru/wromnl>
 15. Lines, E. R., Zavala, M. A., Purves, D. W., et al. (2012). Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1017–1028. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00746.x> EDN: <https://elibrary.ru/rlcfkj>
 16. Malhi, Y., Wood, D., Baker, T. R., et al. (2006). The regional variation of aboveground live biomass in old growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, 12, 1107–1138.
 17. Nogueira, E. M., Nelson, B. W., & Fearnside, P. M., et al. (2008). Tree height in Brazil's "arc of deforestation": shorter trees in South and Southwest Amazonia imply lower biomass. *Forest Ecology and Management*, 255, 2963–2972.
 18. Nordlind, E., & Östlund, L. (2003). Retrospective comparative analysis as a tool for ecological restoration: a case study in a Swedish boreal forest. *Forestry*, 76, 243–251. EDN: <https://elibrary.ru/iojpx>
 19. Paoli, G., Curran, L., & Slik, J. (2008). Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in Southwestern Borneo. *Oecologia*, 155, 287–299. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0906-9> EDN: <https://elibrary.ru/slzopx>
 20. Shorohova, E., Kuuluvainen, T., Kangur, A., & Jõgiste, K. (2009). Natural stand structures, disturbance regimes and successional dynamics in the Eurasian boreal forests: a review with special reference to Russian studies. *Annals of Forest Science*, 66(2), 1–20. <https://doi.org/10.1051/forest/2008083> EDN: <https://elibrary.ru/lltdev>
 21. Siitonen, J. (2001). Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms: Fennoscandian boreal forests as an example. *Ecological Bulletin*, 49, 11–41.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Шевелев Сергей Леонидович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»
проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск,
660037, Российская Федерация
shewel341@yandex.ru*

Михайлов Павел Владимирович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»
проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск,
660037, Российская Федерация
mihaylov.p.v@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Sergey L. Shevelev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
shewel341@yandex.ru*

Pavel V. Mikhailov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
mihaylov.p.v@mail.ru*

Поступила 15.10.2024

После рецензирования 13.11.2024

Принята 05.12.2024

Received 15.10.2024

Revised 13.11.2024

Accepted 05.12.2024

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

PUBLIC HEALTH AND PREVENTIVE MEDICINE

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1216

EDN: NXRFOQ

UDC 616-005



Original article

PROSPECTS FOR A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF SCLEROSTIN, ARTERIAL CALCIFICATION AND STIFFNESS IN THE CONTEXT OF CORONARY HEART DISEASE

*I.A. Snimshchikova, M.O. Revyakina,
N.A. Kabina, E.V. Mityaeva*

Abstract

Background. Coronary heart disease is accompanied by increased calcification and vascular stiffness, which is associated with an increased risk of adverse cardiovascular events. This manuscript focuses on the contribution of sclerostin to the development of vascular calcification and arterial stiffness, which is a key aspect of coronary heart disease.

Purpose. To assess the possibility of developing a comprehensive approach to assessing the likelihood of vascular calcification, taking into account indicators of arterial stiffness and a marker of extraosseous calcification (sclerostin) to improve noninvasive diagnostics of cardiovascular risk.

Materials and methods. The study included patients with myocardial infarction and unstable angina. Arterial stiffness index and calcification were assessed taking into account coronary angiography data and 24-hour blood pressure monitoring. Serum sclerostin concentrations were measured using ELISA.

Results. An increase in sclerostin concentration was found in patients with coronary artery stenosis of more than 50% in combination with intravascular calcified atherosclerotic plaques. A strong correlation was found between serum sclerostin concentration and arterial stiffness index. Results on a significant increase in the arterial stiffness index against the background of coronary artery calcification were

obtained. The results of ROC analysis showed the possibility of using threshold value of arterial stiffness index in assessing the severity of coronary artery disease.

Conclusion. Understanding the relationship between sclerostin, calcification and vascular stiffness can help in the development of new strategies for the diagnosis, prevention and treatment of coronary artery disease.

Keywords: sclerostin; arterial stiffness; vascular calcification; coronary heart disease; myocardial infarction

For citation. Snimshchikova, I. A., Revyakina, M. O., Kabina, N. A., & Mityaeva, E. V. (2025). Prospects for a comprehensive assessment of sclerostin, arterial calcification and stiffness in the context of coronary heart disease. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 336-357. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1216>

Научная статья

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СКЛЕРОСТИНА, АРТЕРИАЛЬНОЙ КАЛЬЦИФИКАЦИИ И ЖЕСТКОСТИ В КОНТЕКСТЕ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА

*И.А. Снимицкова, М.О. Ревякина,
Н.А. Кабина, Е.В. Митяева*

Аннотация

Обоснование. Ишемическая болезнь сердца сопровождается повышенной кальцификацией и жесткостью сосудов, что ассоциировано с увеличением риска неблагоприятных сердечно-сосудистых событий. В этой статье особое внимание уделяется вкладу склеростина в развитие сосудистой кальцификации и артериальной жесткости, что является ключевым аспектом ИБС.

Цель. Оценка возможности разработки комплексного подхода к оценке вероятности кальцификации сосудов с учетом показателей артериальной жесткости и маркера внекостной кальцификации (склеростина) для улучшения неинвазивной диагностики сердечно-сосудистого риска.

Материалы и методы. В исследовании участвовали пациенты с инфарктом миокарда и нестабильной стенокардией. Оценивались показатели артериальной жесткости (ASI) и кальцификации с учетом данных коронароангиографии и суточного мониторингирования артериального давления. Измерение сывороточных концентраций склеростина проводилось методом ИФА.

Результаты. Установлено повышение концентрации склеростина у пациентов со стенозом коронарных артерий более 50% в сочетании с внутрисосудистым

судистыми кальцинированными атеросклеротическими бляшками. Выявлена прочная корреляционная зависимость сывороточной концентрации склеростина и ASI. Получены результаты о значительном повышении индекса артериальной жёсткости на фоне кальциноза коронарных артерий. Результаты ROC-анализа показали возможность использования порогового значения ASI в оценке тяжести течения ИБС.

Заключение. Понимание связи между склеростинном, кальцификацией и жесткостью сосудов может помочь в разработке новых стратегий диагностики, профилактики и лечения ИБС.

Ключевые слова: склеростин; артериальная жесткость; сосудистая кальцификация; ишемическая болезнь сердца; инфаркт миокарда

Для цитирования. Снимщикова, И. А., Ревякина, М. О., Кабина, Н. А., & Митяева, Е. В. (2025). Перспективы комплексной оценки склеростина, артериальной кальцификации и жесткости в контексте ишемической болезни сердца. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 336-357. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1216>

Introduction

Vascular calcification (VC) is a multifactorial pathological process that causes the progression of atherosclerosis, hypertension, diabetes mellitus, and also leads to the development of adverse cardiovascular events (ACEs) [7].

Meta-analysis of publications devoted to the assessment of coronary cardiovascular diseases (CVD) risk indicates an increase in the frequency of fatal and non-fatal cardiovascular events by 3-4 times in the presence of vascular calcification of any localization [19]. The most common sites of calcification deposition are the left coronary artery and the aortic arch [9; 11], while the features of their distribution and location in the arteries of the heart and main vessels can have different clinical manifestations and outcomes [9; 11]. Considering that VC is a slowly progressive process with a long asymptomatic course, the frequency of which increases significantly with age, reaching 80% by the age of 60–69 [9], it is necessary to develop screening methods aimed at early detection of calcification of the coronary arteries and aorta, especially in individuals with risk factors (arterial hypertension, hyperlipidemia, diabetes mellitus, etc.) to reduce the population burden of CVD.

Despite the fact that numerous clinical and epidemiological studies indicate the importance of vascular calcification as a pathomorphological indicator of CVD [6, 16, 23], and traditional imaging methods (computer tomography and computed tomography angiography) are successfully used to identify and assess the progression of vascular calcification; they are expensive, require special

equipment associated with radiation exposure to the patient, and do not always allow detection of the early stages of this pathological process.

At present time, the relationship between vascular calcification and increased arterial stiffness (AS) is studied [3; 22], as well as the possibility of using this indicator as a predictor of ACEs, along with VC.

However, numerous issues of diagnostics and a comprehensive understanding of the mechanisms responsible for AS and mineral dysregulation remain unresolved.

Significant progress in the study of pathological extraosseous calcification in the last two decades has been achieved due to the research of the role of the main multifunctional signaling pathways and molecular regulators that control the phenotypic modulation of vascular smooth muscle cells (VSMCs) in cardiometabolic diseases [15; 26].

Since canonical WNT signaling is a key regulator of bone metabolism, this signaling pathway has become one of the main areas of research in the area of pathological extraosseous calcification, which is involved in both the development of atherosclerosis and the process of myocardial and vascular remodeling [4; 8; 24].

In our previous study we demonstrated the importance of identifying sclerostin, on the one hand, as the main antagonist of the WNT signaling pathway, and on the other hand, as a regulator of bone tissue formation in acute forms of coronary heart disease [20].

In this regard, it was interesting to evaluate the possibility of developing an integrated approach to assessing the likelihood of calcification of vessels, taking into account indicators of arterial stiffness and a marker of extraosseous calcification (sclerostin) to improve non-invasive diagnosis of cardiovascular risk.

Materials and methods

This study was conducted at the cardiology departments (No. 1, No. 2) of the regional vascular center and the department of X-ray surgical methods of diagnostics and treatment of the State Health Institution of the Orel Regional Clinical Hospital (Russia).

A total of 58 patients admitted to the clinic for emergency indications with acute coronary syndrome were included in the study. According to clinical manifestations and the data of the spectrum of myocardial enzymes and electrocardiogram obtained in the emergency room, the patients were divided into 2 main categories: group 1 - with unstable angina ($n = 28$) and group 2 - with acute myocardial infarction ($n = 30$). The age of patients in group 1 was 49.14 ± 7.17 years, group 2 - 44.60 ± 8.57 years. No significant difference was found according to age ($p = 0.135$; method used: Student's t-test).

The distribution of patients in these groups was as follows: in group 1 - 16 men and 12 women, in group 2 - 28 and 2, respectively. Despite the apparent uneven distribution of patients in the groups according to gender, we were unable to identify statistically significant differences in patients ($p = 0.080$; method used: Fisher's exact test).

The diagnosis of patients with acute myocardial infarction (AMI) and unstable angina (UA) was established in accordance with the clinical guidelines of the Ministry of Health of the Russian Federation in the version current at the time of the study.

Sample collection

The scope of clinical examination of patients included determination of general blood test parameters, troponin levels in dynamics, cholesterol profile, C-reactive protein, electrolytes (potassium, sodium), glucose. General clinical laboratory tests were performed using the analyzers "Maxm Analyzer" (UK) and "Monarch chemistry system" (Italy).

Venous blood sampling (in volume of 5 ml) was carried out in patients on an empty stomach in the morning in the first 24 hours after hospitalization, subsequently the blood was centrifuged for 15 minutes at speed of 1500 rpm, the serum was aliquoted, frozen at temperature of -24°C and stored for 1 to 2 months without repeated defrosting cycles before use.

ELISA

The serum concentration of sclerostin was determined in each sample in two repeats by enzyme immunoassay (ELISA). Optical density measurements were performed on STAT FAX 2100 photometer (Awareness Technology, USA) using a set of reagents from Sunlong Biotech Co (China), according to the manufacturer's protocol.

Electrocardiogram

The electrocardiogram (ECG) was recorded according to the generally accepted method in 12 leads on the ECG-9803 Medinova Industrial Co., Ltd.

Echo-KG

Ultrasound examination of the heart was performed on Toshiba Aplio 500 expert class device.

Coronary angiography

Coronary angiography was performed using Philips angiography units. After receiving the results of angiography and a comprehensive assessment of the affected arterial bed, according to the indications, the patients underwent revascularization of the affected artery using balloon angioplasty with its subsequent stenting.

The normal anatomy of the left and right coronary arteries according to coronary angiography data is shown in Figures 1, 2.

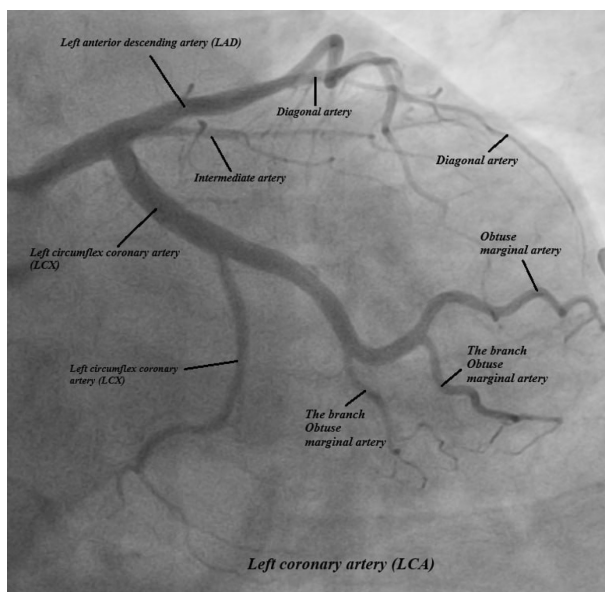


Figure 1. Coronary angiography of the left coronary artery (normal)

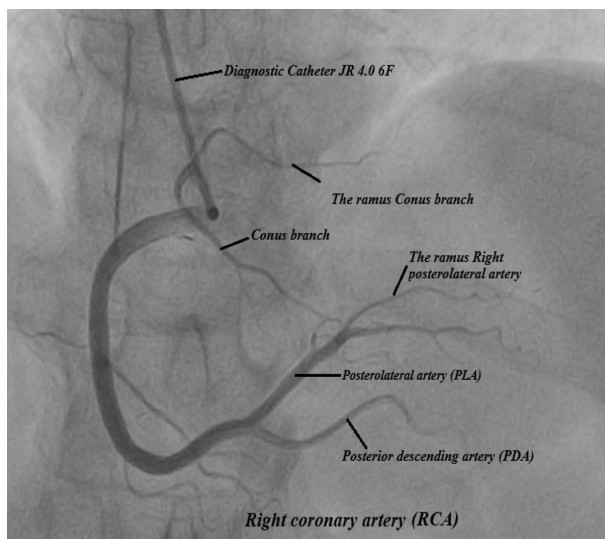


Figure 2. Coronary angiography of the right coronary artery (normal)

Arterial stiffness

For non-invasive assessment of the arterial stiffness index (ASI) we used the method of indirect assessment of the properties of the main arteries based on the results of daily blood pressure monitoring using Schiller BR-102 plus device and SCHILLER MT-300 Holter-BPR software (Switzerland)

Statistical data processing

Statistical analysis was performed by StatTech v. 4.6.1 program (Russia, 2024). Shapiro-Wilk test was used to assess quantitative indicators for compliance with a normal distribution (if the patients' number was less than 50). Data are presented as the absolute number (%) of patients, as mean value and mean absolute error ($M \pm m$).

In the absence of normal distribution, quantitative data were described using the median (Me) and the first and the third quartiles (Q1; Q3). Student's t-test was used for the comparison of two groups according to the quantitative indicator with normal distribution on condition of equality variances; Mann–Whitney U test – for the comparison of two groups according to the quantitative indicator with abnormal distribution.

Kruskal–Wallis test was used for the comparison of three groups, and Dunn's test with Holm's correction was used for post hoc comparison. Spearman's rank correlation coefficient was used to assess the direction and strength of the correlation between two quantitative indicators (if the distribution of indicators was abnormal).

Pearson correlation coefficient was used to assess the direction and strength of the correlation between two quantitative indicators (with normal distribution).

The Chaddock scale is used to interpret correlation strength between two quantitative indicators. All statistical comparisons were two-sided, and $p < 0.05$ was considered significant. To assess the diagnostic significance of quantitative characteristics in predicting a specific outcome, the ROC curve method was used.

Results

Analysis of clinical and laboratory data showed that there were no significant intergroup differences between the patients of the studied groups in almost all indicators, with the exception of creatine phosphokinase (CPK) and VLDL levels. Thus, the indicators of CPK released into the blood when the heart muscle is damaged, and serving as a marker for the identification of acute myocardial infarction, were 127.00 [113.00 – 171.50] units/l in patients of group 1, 215.00 [190.50 – 499.50] units/l in group 2 ($p = 0.006$; *method used: Mann U–test–Whit-*

ney), and the level of VLDL - 0.55 [0.41 – 0.79] mmol/l and 0.47 [0.38 – 0.63] mmol/l, respectively ($p < 0.05$; *method used: Mann–Whitney U test*).

Moreover, the indicators of the number of red blood cells, hemoglobin, bilirubin, total protein, alkaline phosphatase, creatinine, HDL, sodium and potassium were within the normal range for both studied groups.

At the same time, patients with unstable angina were twice as likely to have a history of atherosclerotic heart disease at the time of hospital admission.

It should be emphasized that body mass index (BMI), systolic and diastolic blood pressure, total cholesterol, leukocytes, ESR, aspartate aminotransferase, alanine aminotransferase, LDL of patients with myocardial infarction exceeded the reference values.

ECG results

Myocardial infarction (MI) with ST segment elevation was observed in 24 patients of group 2. Pathological Q wave on the ECG was observed in 16 patients with MI.

ECG changes in 50% of patients with UA were characterized by minor deviations from the norm (in the form of supraventricular extrasystole, flattening of the T wave), normal ECG was recorded in half of the cases.

Results of coronary angiography (CAG)

In patients with MI stenosis of the middle section of the right coronary artery was most common (in 24 patients out of 30) with its degree varying from 20% to complete occlusion in 6 patients of this group. Stenosis (from 30% to 75%) of the anterior interventricular branch was found in 18 patients and of the posterolateral branch (stenosis 30-50%) - in 6 patients. It should be noted that stenosis of the posterior interventricular artery was not registered in patients of the study group.

In CAG stenosis of the left coronary artery was found in 6 patients with MI (stenosis degree 30-50%), 60% stenosis of the diagonal artery was detected in 2 patients of this group. More than that, stenosis of the left anterior descending artery was diagnosed in 6 patients with MI, the severity of which varied from 35 to 75 %, narrowing of the intermediary artery was recorded in 4 patients (stenosis of I and V degrees, respectively).

An example of CAG of a 49-year-old male patient with acute myocardial infarction is shown in Figure 3.

It should be noted that in patients with MI single-vessel coronary bed lesion was found only in 8 patients out of 30, and two-vessel lesion - in the majority of patients (14 people). Special attention should be paid to the data on the identified critical lesion of the coronary bed (100% stenosis) in 2 patients with single-ves-

sel and in 2 patients with two-vessel lesion of the coronary arteries. Stenosis of three coronary arteries was observed at once in 6 patients and simultaneous stenosis of four arteries was observed in 2 patients with AMI.

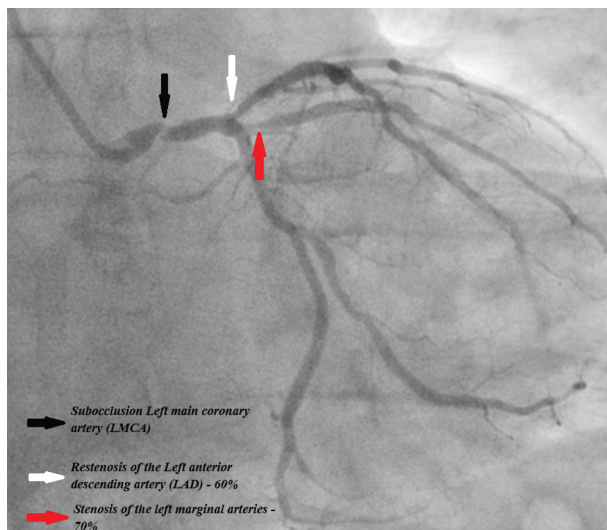


Figure 3. Variants of stenosis of the arteries of the left coronary artery basin.

The results of diagnostic CAG obtained in patients of group 1 did not allow us to identify signs of stenosis of the left coronary artery, diagonal branch, left anterior descending artery, intermediary artery, middle section of the right coronary artery, as well as the anterior interventricular and posterolateral branches of this artery.

It should be noted that in patients with unstable angina, stenosis of the anterior interventricular branch, disturbances of the lumen of the right coronary artery and the middle section of the circumflex branch of this artery were most often encountered.

Narrowing of one coronary artery was found in 8 patients, and two-vessel lesions - in 4 patients of this group. In addition, in 2 patients with UA, simultaneous narrowing of four coronary arteries of minor degree (stenosis) was registered (anterior descending artery; diagonal branch 1; obtuse marginal branch 1; posterior lateral branch).

A 53-year-old man with MI has calcification of the left main coronary artery and anterior interventricular artery visualized on CAG as a shadow (yellow oval in Figure 4).



Figure 4. Calcification of the left main coronary artery and anterior interventricular artery

Figure 5 shows calcified atherosclerotic plaque of the right interventricular branch of the left coronary artery (marked with a red circle) in a 56-year-old male patient with acute myocardial infarction.

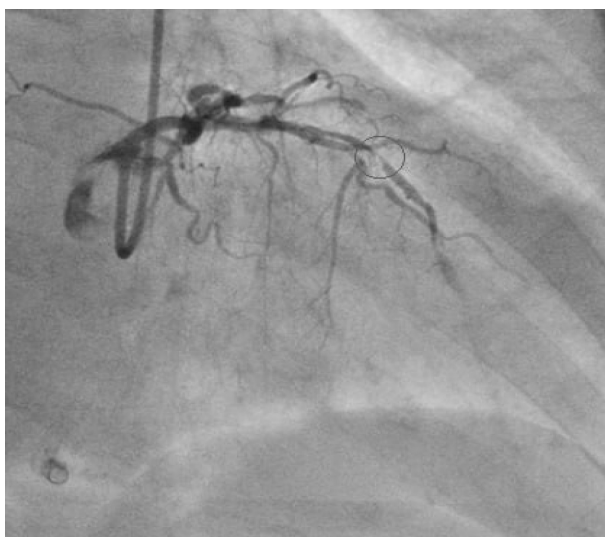


Figure 5. Calcified atherosclerotic plaque of the right interventricular branch of the left coronary artery

Results of determining serum sclerostin by ELISA

According to the results of the study the sclerostin level in patients with MI was 163 [148; 248] pg/ml, and in patients with UA - 224 [151 – 250] pg/ml ($p = 0.498$).

We performed an analysis of the serum level of sclerostin depending on the number of stenosed arteries, it was not possible to establish statistically significant differences ($p = 0.970$; *method used: Kruskal-Wallis test*). However, there is a tendency to decrease the concentration of sclerostin with an increase in the number of affected arteries according to CAG data (Table 1).

Table 1.

Serum sclerostin levels depending on the number of stenotic arteries

Categories	sclerostin (pg/ml)		p
	Me	$Q_1 - Q_3$	
no stenosis	229,00	150,00 – 250,00	0,970
stenosis of one artery	191,50	157,00 – 234,25	
stenosis of two arteries	154,00	151,75 – 268,50	
multivessel stenosis	150,00	145,00 – 215,00	

At the next stage of the analysis, we divided the patients into subgroups according to the severity of stenosis (degree of stenosis $\geq 50\%$ and $<50\%$), as a result of which we were unable to establish statistically significant differences ($p = 0.312$; *method used: Mann–Whitney U–test*). At the same time, it is worth noting a higher concentration of sclerostin in patients with degree of stenosis $\geq 50\%$ (Table 2).

Table 2.

Serum sclerostin levels depending on the degree of arterial stenosis

Categories	sclerostin (pg/ml)		p
	Me	$Q_1 - Q_3$	
degree of stenosis $<50\%$	156,50	148,50 – 226,75	0,312
degree of stenosis $\geq 50\%$	222,00	151,50 – 270,00	

Then having selected patients with degree of coronary artery stenosis $\geq 50\%$ with existing atherosclerotic plaques, we estimated the concentration of sclerostin depending on the type of plaques, taking into account their echogenicity and homogeneity (calcified (CAP) and non-calcified (Table 3).

As a result of assessing the concentration of sclerostin in the blood serum of patients with a degree of coronary artery stenosis $\geq 50\%$, depending on the type of atherosclerotic plaque, statistically significant differences were identified ($p < 0.01$; *method used: Mann–Whitney U test*).

Table 3.

Serum sclerostin level depending on the type of atherosclerotic plaque

Subgroup of patients	sclerostin (pg/ml)		p
	Me	$Q_1 - Q_3$	
Stenosis $\geq 50\%$ without CAP	168,00	150,00 – 187,00	< 0,01*
Stenosis $\geq 50\%$ with CAP	268,50	245,50 – 280,00	

Note: * – differences in indicators are statistically significant ($p < 0.05$)

Arterial stiffness index

The calculation indicators of the arterial stiffness index for the groups of examined patients are presented in Table 4.

Table 4.

Arterial stiffness index

Group of patients	arterial stiffness index — ASI		p
	Me	$Q_1 - Q_3$	
Group 1 (unstable angina)	7,75	7,00 – 9,75	0,001*
Group 2 (acute myocardial infarction)	10,00	9,95 – 11,00	

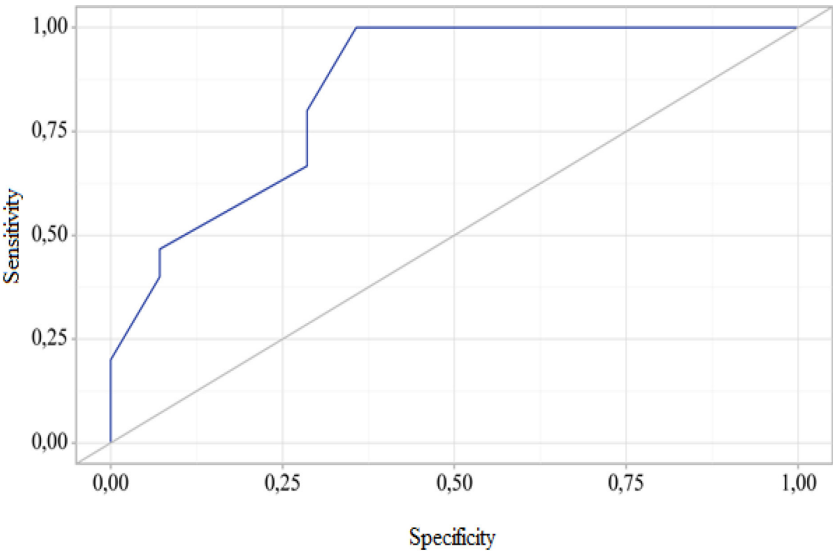


Figure 6. ROC curve characterizing the dependence of the probability of myocardial infarction and unstable angina on ASI

Correlation analysis of the relationship between serum sclerostin concentration and ASI allowed us to establish a highly statistically significant relationship ($p=0.838$; $p<0.05$). It is noteworthy that $ASI>10$ was recorded in patients with calcified arteries as well as an increase in this indicator with increasing age.

When assessing the dependence of the probability of acute myocardial infarction on ASI using ROC analysis, the following curve was obtained (Figure 6).

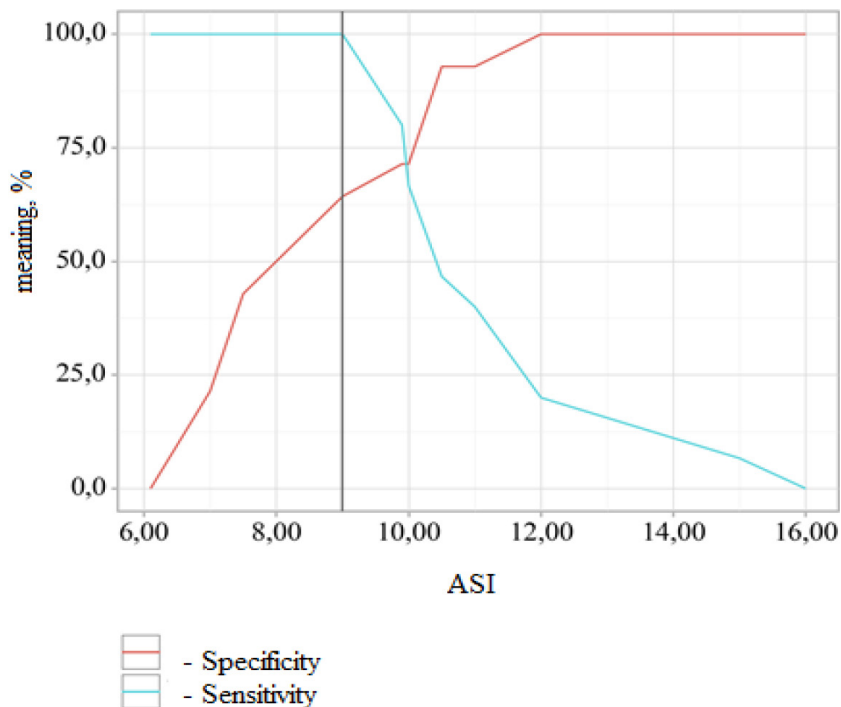


Figure 7. Analysis of sensitivity and specificity of the model depending on the ASI threshold values

Table 5.

ASI threshold values				
Threshold	Sensitivity (Se), %	Specificity (Sp), %	PPV	NPV
10,00	66,7	71,4	71,4	66,7
9,90	80,0	71,4	75,0	76,9
9,00	100,0	64,3	75,0	100,0
8,00	100,0	50,0	68,2	100,0

The area under the ROC curve was 0.850 ± 0.073 with 95% CI: 0.707 – 0.993. The resulting model was statistically significant ($p = 0.001$).

The ASI cut-off value, which corresponded to the highest Youden index value, was 9.000. Myocardial infarction was predicted at an ASI value higher than or equal to this value. The sensitivity and specificity of the model were 100.0% and 64.3%, respectively.

Discussion

Increasing clinical and experimental data over the past two decades have demonstrated a close relationship between vascular calcification and aging and cardiovascular disease [3; 21]. Much attention is currently paid to the relationship between vascular calcification and arterial stiffness in association with the microenvironment, as well as with the underlying signaling pathways regulating both vascular and bone calcification [3; 17; 25].

It is well documented that AF is closely associated with structural and functional changes in arterial elasticity, which include processes such as extracellular matrix remodeling, elastin degradation, excessive collagen deposition, glycosylation, etc., which are of critical importance for the subsequent development of CVD [3; 4]. While endothelial cells, fibroblasts, macrophages, etc. contribute to arterial stiffness, vascular smooth muscle cells are necessary for maintaining vascular homeostasis, including arterial elasticity. Vascular calcification, currently recognized as an active process similar to osteogenesis [3; 14], leads to the formation of the osteogenic phenotype of VSMCs under the influence of both various extracellular and intracellular procalcification factors [2; 5].

In previous studies we focused on the role of sclerostin, one of the main morphogenic WNT signaling that regulates mineral metabolism and extraosseous calcification in acute forms of coronary heart disease, demonstrating the feasibility of its study as a biomarker of ectopic calcification of heart valves and great vessels [20].

Considering the fact that the combined assessment of arterial stiffness and vascular calcification biomarkers can improve noninvasive assessment of cardiovascular risk, allowing stratification of patients into CVD risk groups for preventive treatment or more regular medical examination, we conducted a comparative comprehensive assessment of arterial stiffness, serum sclerostin and coronary artery calcification according to CAG data in patients of the study groups.

Our study did not reveal statistically significant differences in sclerostin concentrations in the blood serum of patients with acute myocardial infarction and unstable angina, however, a decrease in sclerostin levels was found against the

background of an increase in the number of stenotic coronary arteries. Although the reason for this result is not well understood, one of the probable mechanisms explaining this fact may be osteogenic differentiation of VSMC and their calcification against the background of increased demand for sclerostin.

Despite the rather contradictory results of studies assessing the relationship between serum sclerostin levels and vascular calcification, most researchers show a direct correlation with a high probability of vascular calcification and atherosclerosis [1; 6; 10; 13; 18]. This is consistent with our statistically significant data on the highest sclerostin concentrations in patients with coronary artery stenosis $\geq 50\%$ in combination with intravascular calcified atherosclerotic plaques.

At present, the question of the possibility of using serum sclerostin as a prognostic marker of adverse cardiovascular events and AF remains open, and the researches, made in this direction by many scientific teams, have not brought definite results [6, 18]. With the aggravation of clinical manifestations, ASI in the group of patients with myocardial infarction was significantly higher than in patients with unstable angina, which to a certain extent confirms the close relationship of ASI with coronary heart disease and its outcome, but requires further study.

The obtained results on the increase of the arterial stiffness index more than 10 against the background of coronary artery calcification may indicate a close relationship between vascular calcification and arterial stiffness and the possible formation of a vicious circle against the background of accelerated vascular calcification, an increase in AF, and, as a consequence, the development of ACEs, which is consistent with literature data [7].

In addition, the results obtained in our study on the increase in ASI with increasing patient age confirmed the existing data on vascular calcification as a marker of vascular aging and CVD risk.

In our study, we used ROC analysis to determine the diagnostic value of ASI in predicting myocardial infarction. The results of the ROC analysis showed that ASI can not only play a role in the predictive diagnosis of coronary heart disease, but also in assessing the severity of its course.

The threshold value of the ASI index at the cut-off point, which corresponded to the highest value of the Youden index, was 9.0. Taking this into account, the probability of unstable angina can be predicted at an ASI value below this value (the sensitivity and specificity of the model were 100.0% and 64.3%, respectively), and the ASI level above 9.0 can be used as a diagnostic marker of myocardial infarction, which is especially important in diagnostically complex expert cases.

Presenting our strong positive correlation between serum sclerostin concentration and ASI, it is possible to suggest that sclerostin plays an important role in this process via modulation and phenotypic switching of VSMC, which allows considering it as a therapeutic target and diagnostic biomarker in CVD, however, this requires additional clinical and laboratory studies.

We acknowledge several limitations of our study, including its cross-sectional nature, small sample size, and limited data describing vascular calcification and ASI. These limitations impact the establishment of a definitive causal relationship between sclerostin, ASI, and vascular calcification.

Furthermore, we did not use multivariate analysis to test parameters, thereby limiting our ability to make general statements regarding the associative data between the studied markers and vascular calcification.

Conclusion

Increased calcification and vascular stiffness are observed in coronary heart disease, which may lead to impaired blood flow and an increased risk of ACEs. Studies show that sclerostin may also affect vascular calcification, which is a key aspect of coronary heart disease. The use of multivariate analysis and the development of prognostic models to clarify the relationship between sclerostin, vascular stiffness and calcification will allow a better understanding of the pathophysiology of coronary heart disease and the development of more effective methods for screening diagnostics of cardiovascular diseases to stratify the risk of adverse outcomes at a pre-symptomatic or early stage of the pathological process. In addition, this may lead to the development of more effective strategies for the prevention and treatment of coronary heart disease, opening up new opportunities to improve the quality of life of patients.

Ethics committee conclusion. The study was carried out in accordance with GCP standards and the Declaration of Helsinki, the study protocol was approved by the local Ethics Committee of Orel State University named after I.S. Turgenev (Russia, Protocol No. 31 dated 06/27/2024).

Informed consent. All participants of the study signed informed consent for the use of their examination results for scientific purposes in an anonymous form.

Conflict of interest information. The authors declare no conflict of interest related to the publication of this manuscript.

Sponsorship information. The work was done at the Orel State University named after I.S. Turgenev (Russia) within the framework of the state assignment No. 075-00196-24-08 for 2024 and for the planning period of 2025

and 2026 since 08/23/2024, project № FSGN-2024-0014 (1024041900023-6-1.2.1;2.6.2;3.1.3;3.2.12;3.2.4).

Acknowledgments. The authors express their gratitude to all the staff of the cardiology departments (No. 1, No. 2) of the regional vascular center and the department of X-ray surgical methods of diagnostics and treatment of the Orel Regional Clinical Hospital (Russia).

References / Список литературы

1. Brandenburg, V. M., Kramann, R., Koos, R., Krüger, T., Schurgers, L., Mühlenthal, G., Hübner, S., Gladziwa, U., Drechsler, C., & Ketteler, M. (2013). Relationship between sclerostin and cardiovascular calcification in hemodialysis patients: a cross-sectional study. *BMC Nephrology*, 14, 219. <https://doi.org/10.1186/1471-2369-14-219> EDN: <https://elibrary.ru/gzbmxx>
2. Ceccherini, E., Cecchetti, A., Gisone, I., Persiani, E., Morales, M. A., & Vozi, F. (2022). Vascular Calcification: In Vitro Models under the Magnifying Glass. *Biomedicines*, 10(10), 2491. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10102491> EDN: <https://elibrary.ru/disuyh>
3. Chen, Y., Zhao, X., & Wu, H. (2020). Arterial Stiffness: A Focus on Vascular Calcification and Its Link to Bone Mineralization. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 40(5), 1078-1093. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.120.313131> EDN: <https://elibrary.ru/dtcvyk>
4. Demer, L. L., & Tintut, Y. (2008). Vascular calcification: pathobiology of a multifaceted disease. *Circulation*, 117(22), 2938-2948. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.743161> EDN: <https://elibrary.ru/mmgbvr>
5. Durham, A. L., Speer, M. Y., Scatena, M., Giachelli, C. M., & Shanahan, C. M. (2018). Role of smooth muscle cells in vascular calcification: implications in atherosclerosis and arterial stiffness. *Cardiovascular Research*, 114(4), 590-600. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvy010>
6. Figurek, A., & Spasovski, G. (2018). Is serum sclerostin a marker of atherosclerosis in patients with chronic kidney disease-mineral and bone disorder? *International Urology and Nephrology*, 50(10), 1863-1870. <https://doi.org/10.1007/s11255-018-1935-5> EDN: <https://elibrary.ru/oanvkD>
7. Gao, L., Lu, D., Xia, G., et al. (2021). The relationship between arterial stiffness index and coronary heart disease and its severity. *BMC Cardiovascular Disorders*, 21, 527. <https://doi.org/10.1186/s12872-021-02350-6> EDN: <https://elibrary.ru/hlxrmh>
8. Golledge, J., & Thanigaimani, S. (2022). Role of Sclerostin in Cardiovascular Disease. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 42(7), e187-e202. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.122.317635> EDN: <https://elibrary.ru/jtlerh>

9. Gui, Z., Shao, C., Zhan, Y., Wang, Z., & Li, L. (2024). Vascular calcification: High incidence sites, distribution, and detection. *Cardiovascular Pathology*, 72, 107667. <https://doi.org/10.1016/j.carpath.2024.107667> EDN: <https://elibrary.ru/qzdifq>
10. Hampson, G., Edwards, S., Conroy, S., Blake, G. M., Fogelman, I., & Frost, M. L. (2013). The relationship between inhibitors of the Wnt signalling pathway (Dickkopf-1(DKK1) and sclerostin), bone mineral density, vascular calcification and arterial stiffness in post-menopausal women. *Bone*, 56(1), 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2013.05.010>
11. Hata, Y., Mochizuki, J., Okamoto, S., Matsumi, H., & Hashimoto, K. (2022). Aortic calcification is associated with coronary artery calcification and is a potential surrogate marker for ischemic heart disease risk: A cross-sectional study. *Medicine*, 101(29), e29875. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000029875> EDN: <https://elibrary.ru/yhytxe>
12. Kadioğlu, A., & Bahadır, S. (2022). Breast arterial calcifications as an indicator of atherosclerotic cardiovascular disease: comparative analysis of coronary computed tomography scoring systems and carotid intima-media thickness. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 12(1), 457-469. <https://doi.org/10.21037/qims-21-98> EDN: <https://elibrary.ru/yyftdo>
13. Koos, R., Brandenburg, V., Mahnken, A. H., Schneider, R., Dohmen, G., Autschbach, R., Marx, N., & Kramann, R. (2013). Sclerostin as a potential novel biomarker for aortic valve calcification: an in-vivo and ex-vivo study. *The Journal of Heart Valve Disease*, 22(3), 317-325.
14. Lee, S. J., Lee, I. K., & Jeon, J. H. (2020). Vascular Calcification-New Insights Into Its Mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(8), 2685. <https://doi.org/10.3390/ijms21082685> EDN: <https://elibrary.ru/joqymx>
15. Mack, C. P. (2011). Signaling mechanisms that regulate smooth muscle cell differentiation. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 31(7), 1495-1505. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.110.221135>
16. Mozos, I., Malainer, C., Horbańczuk, J., Gug, C., Stoian, D., Luca, C. T., & Atanasov, A. G. (2017). Inflammatory Markers for Arterial Stiffness in Cardiovascular Diseases. *Frontiers in Immunology*, 8, 1058. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.01058>
17. Ortega, M. A., De Leon-Oliva, D., Gimeno-Longas, M. J., Boaru, D. L., Fraile-Martinez, O., García-Montero, C., de Castro, A. V., Barrena-Blázquez, S., López-González, L., Amor, S., García-Honduvilla, N., Buján, J., Guijarro, L. G., Castillo-Ruiz, E., Álvarez-Mon, M. Á., Albillos, A., Álvarez-Mon, M., Diaz, R., & Saez, M. A. (2024). Vascular Calcification: Molecular Networking,

- Pathological Implications and Translational Opportunities. *Biomolecules*, 14(3), 275. <https://doi.org/10.3390/biom14030275> EDN: <https://elibrary.ru/tbtxgc>
18. Popovic, D. S., Mitrovic, M., Tomic-Naglic, D., Icin, T., Bajkin, I., Vukovic, B., Benc, D., Zivanovic, Z., Kovacev-Zavasic, B., & Stokic, E. (2017). The Wnt/ β -catenin Signalling Pathway Inhibitor Sclerostin is a Biomarker for Early Atherosclerosis in Obesity. *Current Neurovascular Research*, 14(3), 200-206. <https://doi.org/10.2174/1567202614666170619080526> EDN: <https://elibrary.ru/yhxvlc>
19. Rennenberg, R. J., Kessels, A. G., Schurgers, L. J., van Engelshoven, J. M., de Leeuw, P. W., & Kroon, A. A. (2009). Vascular calcifications as a marker of increased cardiovascular risk: a meta-analysis. *Vascular Health and Risk Management*, 5(1), 185-197. <https://doi.org/10.2147/vhrm.s4822> EDN: <https://elibrary.ru/nakwvx>
20. Snimshchikova, I. A., & Plotnikova, M. O. (2023). Role of morphogenic proteins of the WNT signaling pathway in coronary artery disease. *Medical Immunology (Russia)*, 25(4), 985-990. <https://doi.org/10.15789/1563-0625-ROM-2835> EDN: <https://elibrary.ru/ppgrow>
21. Sutton, N. R., Malhotra, R., St Hilaire, C., Aikawa, E., Blumenthal, R. S., Gackebach, G., Goyal, P., Johnson, A., Nigwekar, S. U., Shanahan, C. M., Towler, D. A., Wolford, B. N., & Chen, Y. (2023). Molecular Mechanisms of Vascular Health: Insights From Vascular Aging and Calcification. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 43(1), 15-29. <https://doi.org/10.1161/ATV-BAHA.122.317332> EDN: <https://elibrary.ru/jscdmh>
22. Toussaint, N. D., Lau, K. K., Strauss, B. J., Polkinghorne, K. R., & Kerr, P. G. (2008). Associations between vascular calcification, arterial stiffness and bone mineral density in chronic kidney disease. *Nephrology, Dialysis, Transplantation*, 23(2), 586-593. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfm660> EDN: <https://elibrary.ru/ixuljd>
23. van der Toorn, J. E., Bos, D., Arshi, B., Leening, M. J. G., Vernooij, M. W., Ikram, M. A., Ikram, M. K., & Kavousi, M. (2021). Arterial calcification at different sites and prediction of atherosclerotic cardiovascular disease among women and men. *Atherosclerosis*, 337, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2021.10.009> EDN: <https://elibrary.ru/bogovk>
24. Wang, X.-R., Yuan, L., Zhang, J.-J., Hao, L., & Wang, D.-G. (2017). Serum sclerostin values are associated with abdominal aortic calcification and predict cardiovascular events in patients with chronic kidney disease stages 3-5D. *Nephrology*, 22(4), 286-292. <https://doi.org/10.1111/NEP.12813>
25. Yang, S., Zeng, Z., Yuan, Q., Chen, Q., Wang, Z., Xie, H., & Liu, J. (2023). Vascular calcification: from the perspective of crosstalk. *Molecular Biomedicine*, 4(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s43556-023-00146-y> EDN: <https://elibrary.ru/vivgbl>

26. Yu, Q., Li, W., Xie, D., Zheng, X., Huang, T., Xue, P., Guo, B., Gao, Y., Zhang, C., Sun, P., Li, M., Wang, G., Cheng, X., Zheng, Q., & Song, Z. (2018). PI3K γ promotes vascular smooth muscle cell phenotypic modulation and transplant arteriosclerosis via a SOX9-dependent mechanism. *EBioMedicine*, 36, 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2018.09.013>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Снимщикова Ирина Анатольевна, ведущий научный сотрудник лаборатории новых медицинских технологий, заведующий кафедрой иммунологии и специализированных клинических дисциплин, директор Медицинского института, доктор медицинских наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская, 95, г. Орёл, 302026, Российская Федерация
snimshikova@mail.ru

Ревякина Мария Олеговна, старший научный сотрудник лаборатории новых медицинских технологий, доцент кафедры иммунологии и специализированных клинических дисциплин, кандидат медицинских наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская, 95, г. Орёл, 302026, Российская Федерация
revyakina_masha@mail.ru

Кабина Наталья Александровна, старший преподаватель кафедры фармакологии, клинической фармакологии и фармации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

*ул. Комсомольская, 95, г. Орёл, 302026, Российская Федерация
apt53boss@mail.ru*

Митяева Екатерина Вячеславовна, доцент кафедры внутренних болезней, кандидат медицинских наук
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская, 95, г. Орёл, 302026, Российская Федерация
orel_rel@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Irina A. Snimshchikova, Leading Researcher of the Laboratory of New Medical Technologies, Head of the Department of Immunology and Specialized Clinical Disciplines, Director of the Medical Institute, Doctor of Medical Sciences, Professor
*Orel State University named after I.S. Turgenev
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
snimshikova@mail.ru
SPIN-code: 2728-3520
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4258-963X>
ResearcherID: X-6716-2019
Scopus Author ID: 57194214547*

Maria O. Revyakina, Senior Researcher, Laboratory of New Medical Technologies, Associate Professor, Department of Immunology and Specialized Clinical Disciplines, Candidate of Medical Sciences
*Orel State University named after I.S. Turgenev
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
revyakina_masha@mail.ru
SPIN-code: 4921-7530
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1593-5290>
Scopus Author ID: 57326361600*

Natalia A. Kabina, Senior Lecturer, Department of Pharmacology, Clinical Pharmacology and Pharmacy
*Orel State University named after I.S. Turgenev
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation*

apt53boss@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6915-9035>

Ekaterina V. Mityaeva, Associate Professor of the Department of Internal Medicine, PhD in Medicine

Orel State University named after I.S. Turgenev

95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation

orel_rel@mail.ru

SPIN-code: 9917-8471

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9964-7549>

ResearcherID: LRC-5828-2024

Scopus Author ID: 57204703234

Поступила 13.11.2024

После рецензирования 13.12.2024

Принята 16.12.2024

Received 13.11.2024

Revised 13.12.2024

Accepted 16.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1139

EDN: LOSGJF

УДК 613.88:171



Научная статья

РЕПРОДУКТИВНОЕ ЗДОРОВЬЕ СЕЛЬСКОЙ МОЛОДЕЖИ РОССИИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ЦЕННОСТЕЙ

*Р.В. Чвалун, А.Х. Маламатов, А.Н. Коноплева,
С.С. Асатрян, Ю.Г. Лесных*

Аннотация

Обоснование. Проблемы репродуктивного здоровья молодежи являются одними из наиболее актуальных направлений исследований в области изучения социальных проблем современного поколения. **Цель исследования** – дать характеристику репродуктивному здоровью сельской молодежи через призму ценностей на примере юга России для совершенствования демографической политики региона. На основе краткого анализа публикаций наукоемкой базы Scopus обоснована актуальность и теоретические аспекты исследования. В эмпирической части исследования проведен опрос 427 человек методом группового раздаточного анкетирования.

Материалы и методы. Изучение репродуктивного здоровья сельской молодежи через призму ценностей проведено в апреле-мае 2024 года с привлечением студенческой молодежи Ставропольского государственного аграрного университета. Опрос проведен методом группового раздаточного анкетирования. Участие в анкетировании осуществлялось на добровольных началах и на основе анонимности.

Полученные результаты. Выявленные ключевые ценности сельской молодежи: приверженность принятию взвешенных решений, ответственность, правдивость, искренность, воспитанность и самостоятельность; большинство участников опроса планируют иметь детей. Отмечается высокий уровень информированности молодежи в вопросах сексуальных отношений, что в целом коррелирует с ключевыми ценностями социальной группы, в которой проведено исследование.

Заключение. Проведенное исследование репродуктивного здоровья сельской молодежи через призму ценностей показывает, что большинство участников опроса планируют иметь детей.

Ключевые слова: репродуктивное здоровье; молодежь; репродуктивное поведение; ценности сельской молодежи

Для цитирования. Чвалун, Р. В., Маламатов, А. Х., Коноплева, А. Н., Асатрян, С. С., & Лесных, Ю. Г. (2025). Репродуктивное здоровье сельской молодежи России через призму ценностей. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 358-379. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1139>

Original article

YOUNG PEOPLE'S REPRODUCTIVE HEALTH IN RURAL AREAS OF RUSSIA: RESEARCH THROUGH THE PRISM OF VALUES

*R.V. Chvalun, A.Kh. Malamатов, A.N. Konopleva,
S.S. Asatryan, Ju.G. Lesnykh*

Abstract

Background. Issues of youth reproductive health are among the most pressing research directions in the contemporary study of social problems affecting young people. The **purpose** of study is to characterize the reproductive health of rural youth through the prism of values using the example of southern Russia to improve the demographic policy of the region. We substantiated the relevance and theoretical aspects of the research based on a brief analysis of the publications in Scopus. In the empirical part of the study, a survey of 427 people was conducted using a group handout questionnaire.

Materials and methods. The study of the young people's reproductive health through the prism of values was conducted in April-May 2024 with the involvement of students from Stavropol State Agrarian University. The survey was conducted using a group handout questionnaire. Participation in the survey was carried out on a voluntary and anonymous basis.

Results. The identified key values of rural youth are commitment to making informed decisions, responsibility, truthfulness, sincerity, good manners and independence; most of the survey participants plan to have children; there is a high level of awareness among young people about sexual relations, which generally correlates with the key values of the social group in which the study was conducted.

Conclusion. The conducted research on the young people's reproductive health through the prism of values shows that the majority of the survey participants plan to have children.

Keywords: reproductive health; youth; reproductive behaviour; young people's values

For citation. Chvalun, R. V., Malamatov, A. Kh., Konopleva, A. N., Asatryan, S. S., & Lesnykh, Ju. G. (2025). Young people's reproductive health in rural areas of Russia: Research through the prism of values. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 358-379. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1139>

Введение

Вопросы репродуктивного здоровья молодежи относятся к числу наиболее актуальных исследовательских направлений в современной практике изучения социальных проблем молодежи. Репродуктивное здоровье – это состояние физического, психического здоровья и социального благополучия человека, определяющее способность к воспроизводству потомства. Многочисленные исследования подтверждают актуальность и многоаспектность изучаемого вопроса – рассмотрение репродуктивного здоровья сельской молодежи через призму ценностей данной социальной группы.

Авторы статьи Н. Bittleston, J.S. Hocking, M. Temple-Smith, L. Sanci, J.L. Goller, J. Coombe проводят статистический анализ данных по результатам опроса 1887 человек [1]. В качестве аргумента для проведения исследования авторы выдвигают тезис о том, что молодежь является приоритетной группой в области охраны сексуального и репродуктивного здоровья.

Системные мировые проблемы в социально-экономической сфере и здравоохранении отражаются, в том числе, на репродуктивном здоровье молодежи. Так, например, авторы статьи [2] приводят результаты сравнительного анализа ответов молодых людей с ВИЧ и без него, которые свидетельствуют, что 28% ВИЧ-инфицированных пропустили профилактический прием во время карантина из-за COVID-19. Ухудшение качества профилактических мероприятий, направленных на репродуктивное здоровье среди групп риска негативно отражается в целом на репродуктивном здоровье молодежи. О негативных последствиях пандемии COVID-19 не только в области экономики, но и в социальных отраслях (медицина, образование и т.д.) говорят авторы статьи [6]. Комплекс проблем отразился и на репродуктивных возможностях населения, в том числе молодежи. Восстановление после пандемии требует новых более действенных инструментов поддержки репродуктивного здоровья молодежи и исследований в данной области. Актуальна оценка не только физиологических аспектов влияния пандемии, но и социально-психологических изменений, состояния ценностного ядра населения, нацеленность на воспроизводство здорового потомства.

Авторы статьи по результатам проведенного исследования показывают системные преграды к решению вопросов репродуктивного здоровья в молодежной и подростковой среде [3]. Снижение числа обращений за помощью связано с недостаточным вниманием и учетом психологических особенностей возраста в процессе оказания медицинских и профилактических услуг в области репродуктивного здоровья молодежи. Авторы предлагают вырабатывать новые алгоритмы работы с обращениями за помощью, максимально упрощая доступность таких услуг.

О необходимости усиления мер, направленных на комплексное обеспечение сексуального и репродуктивного здоровья, борьбу с вирусом иммунодефицита человека (ВИЧ) и охрану психического здоровья в странах Африки говорят авторы статьи [4]. Ими проведен обзор исследований с 2001 по 2021 года в базе данных PubMed, которые затрагивают различные аспекты репродуктивного здоровья подростков и молодых людей в возрасте от 10 до 24 лет. Авторы статьи приходят к выводу, что проблема репродуктивного здоровья не сводится к физическим состояниям, а связана с психосоциальными факторами и правами человека, что находит корреляцию с нашей задачей исследования репродуктивного здоровья сельской молодежи через призму ценностей и подтверждает его актуальность. Многоцелевые адресные мероприятия должны стать основой решения проблем репродуктивного здоровья молодежи, в том числе в сочетании с новой стимулирующей системой оказания услуг «Карта лояльности» [5].

Еще один систематический обзор литературы, затрагивающий область нашего исследования, проведен авторами статьи A.J. Mason-Jones, P. Nicholson [7]. Ученые выделяют 2 ключевые проблемы: структурное насилие и маргинализация. По мнению авторов, проблемы сексуального и репродуктивного здоровья молодых людей, имеют отношение к европейскому гуманитарному кризису. Принимая исследовательскую логику, хотелось бы отметить, что молодые люди, на которых ориентировано наше исследование, находятся вполне в благополучных условиях в отличие от приведенных данных [9]. Вместе с тем, вопросы общечеловеческих, гуманитарных ценностей нельзя рассматривать в отрыве от репродуктивного здоровья молодежи, так как ценности формируют жизненное целеполагание и дальнейшие действия в границах социальных норм современного общества.

Вопросы сохранения сексуального здоровья особенно остро стоят в определенных социальных группах молодежи. В исследовании [8] показана особая значимость адресной работы среди молодых людей, занимающихся сексом с мужчинами, молодых секс-работников, молодых наркоманов,

трансгендеров, бездомных и других уязвимых категорий молодых людей. Главный вывод исследовательской группы состоит в необходимости признания обществом многообразия молодежи и привлечения к нему внимания для улучшения доступа к услугам, защищающим их здоровье и права человека. Таким образом, по нашему мнению, авторы обращаются к социальным истокам проблем сексуального и репродуктивного здоровья молодежи.

В значительной части исследований рассматривается вопрос оказания помощи в обеспечении сексуального и репродуктивного здоровья молодых людей [10-12; 15; 17; 20]. Отмечается, что необходимо устранить препятствия, в силу которых молодые люди покидают места предоставления услуг. Такая ситуационная реакция на проблемы не устраняет их причин, поэтому мы видим в ряде выводов по результатам исследований крайне важное предложение – разрабатывать политику, программы и далее предоставлять услуги, направленные на сохранение сексуального и репродуктивного здоровья молодежи. В этой связи хотелось бы отметить, что разработка политики и программ в области репродуктивного здоровья молодежи, по нашему мнению, должна основываться на социальном, культурном контексте региона, учитывать национальные, религиозные традиции относительно сохранения репродуктивного здоровья. Ценности, транслируемые молодым поколениям в конкретной социальной среде через базовые институты общества, формируют дальнейшее репродуктивное поведение молодежи, связанное с созданием семьи, ответственностью за продолжение рода, значимостью здоровья рожденных детей в системе ценностей молодой семьи и другие смежные проблемы.

Вопросы репродуктивного здоровья тесно связаны с сексуальным поведением молодежи. Авторы статьи John Godwin, Gabrielle Szabo, Justine Sass, Josephine Sauvarin отмечают, что возраст вступления в половую жизнь остается прежним. Вместе с тем, молодые люди вступают в брак позже, а число внебрачных контактов растет [13]. По мнению авторов, благоприятная правовая и политическая среда является важной основой для усилий по улучшению сексуального и репродуктивного здоровья молодежи. Разработанные правовые нормы в области сексуального и репродуктивного поведения основаны на международных рекомендациях и обязательствах (включая широко ратифицированную Конвенцию о правах ребенка) и способствуют повышению самостоятельности в принятии решений молодыми людьми, в том числе в области сексуального и репродуктивного здоровья. Большую роль в обеспечении трансляции правовых норм и возможностей поддержки молодежи в области сексуального и репродуктивного здоровья играет здра-

воохранение и образование. Авторы статьи D. Braeken, N. Otoo-Oyortey, G. Serour указывают, что медики, педагоги и правозащитники должны оказывать экстренную помощь подросткам в сложных ситуациях [14].

Информационная просветительская работа в области репродуктивного здоровья должна идти, прежде всего в малообеспеченных слоях населения [16]. Этот тезис активно поддерживают исследователи [18; 19]. Отмечается, что отсутствие информации объясняется культурными и моральными причинами, т.е. носят социальный характер. В значительной части исследований последних лет мы видим, что информированные молодые люди демонстрируют более защитное поведение, чем неосведомленные. Следовательно, эту работу надо развивать с большей ориентацией на малообеспеченные слои населения.

Проведенный факторный анализ в исследовании ответов 1117 участников дал возможность сформулировать актуальную модель для измерения сексуальных и репродуктивных прав и возможностей для подростков и молодежи [21]. Структурными элементами факторной модели стали: комфортное общение с партнером; выбор партнеров, брак и дети; поддержка родителей; сексуальная безопасность; любовь к себе; ощущение будущего; и сексуальное удовольствие. Представленная модель играет важное значение для осуществления мониторинга репродуктивного и сексуального здоровья подростков и молодежи. Разработка авторов может служить основой для совершенствования механизмов организационной и правовой поддержки молодежи в сфере репродуктивного и сексуального здоровья.

В целом проведенный теоретический анализ научных источников базы Скопус подтверждает актуальность темы исследования и показывает ряд важных аспектов, которые далее рассматриваются в эмпирической части исследования.

Цель исследования – дать характеристику репродуктивному здоровью сельской молодежи через призму ценностей на примере юга России для совершенствования демографической политики региона.

Материалы и методы

Изучение репродуктивного здоровья сельской молодежи через призму ценностей проведено в апреле-мае 2024 года с привлечением студенческой молодежи Ставропольского государственного аграрного университета. Направлениями подготовки выбраны именно аграрные – агрономия, ветеринария, зоотехния, защита растений и другие, где большинство студентов очной формы прибыли на обучение из сельской местности и являются представителями постоянно проживающего населения сельских

территорий юга России. В обработку взяты анкеты 427 человек, постоянно проживавших в сельских населенных пунктах до поступления в вуз. Погрешность выборки составляет 4%. Опрос проведен методом группового раздаточного анкетирования. Участие в анкетировании осуществлялось на добровольных началах и на основе анонимности.

Инструментарий исследования разработан с учетом теоретического обзора, представленного в статье. Выделены 4 информационных блока анкеты: социально-демографическая характеристика; ценности молодежи с позиции ориентиров личностного развития и поведения в социуме; репродуктивное здоровье; репродуктивное поведение. В ценностном блоке анкеты использована 5-балльная шкала, где 1 балл – ценность не имеет значения для респондента, 5 баллов – ценность имеет очень большое значение для респондента. Участники опроса могли поставить любое целое число от 1 до 5 в соответствие с уровнем значимости названных ценностей.

Для статистической обработки данных использовалась компьютерная программа SPSS Statistics (версия 27). В описательной статистике результатов исследования переменные были упорядочены по величине их средних значений (в порядке убывания). Для описания количественных данных использовались средние арифметические и средние квадратические отклонения ($M \pm SD$).

Результаты

Репродуктивное здоровье логически связано с репродуктивным поведением, которое определяется как система действий и отношений, опосредующих рождение определенного числа детей или отказ от деторождения, регулирующий биологическими, экономическими, психологическими и социальными факторами. Так, видами или компонентами репродуктивного поведения являются: непосредственно репродуктивное, направленное на деторождение, а также абортное и контрацептивное, задача которых – регулирование сроков и числа рождений (или их отсутствие).

Репродуктивное поведение – система действий и отношений, опосредующих принятие решения о рождении или отказе от рождения ребенка в браке или вне брака. Различают три основных типа репродуктивного поведения: многодетное (потребность в 5 и более детях), среднететное (потребность в 3–4 детях) и малодетное (потребность в 1–2 детях).

В ходе опроса, проведенного в студенческой среде аграрного университета, определено отношение сельской молодежи к вопросам репродуктивного здоровья и поведения. Значимость изучения мнений именно этой категории

респондентов определяется тем, что выпускники системы высшего аграрного образования пополняют социальную группу сельской молодежи и являются в значительной своей части лидерами мнений в силу уровня образования и социально-профессиональной позиции в сельском сообществе.

В опросе приняли участие 427 человек, из которых 45,4% респондентов мужского пола и 54,6% респондентов женского пола. Средний возраст участников опроса составил $18,7 \pm 1,3$ лет. Две трети респондентов еще проживают в родительской семье или с близкими родственниками – с родителями, родственниками (братья, сестры, дедушки, бабушки и другие). И треть респондентов проживает с соседями, друзьями (18,6%) или самостоятельно (14,4%). Таким образом, можно сказать, что большая часть участников опроса в своем возрасте (18-19 лет) имеют возможность наблюдать семейный опыт и модель репродуктивного поведения, сохранять репродуктивное здоровье в соответствии с предписаниями норм традиционной семьи на юге России.

Проживание с родителями и близкими родственниками, эмоциональный контакт дает возможность участникам опроса обсуждать свои проблемы и переживания с родителями: 27,8% респондентов делятся практически всеми переживаниями; некоторыми переживаниями делятся, некоторыми – нет 49,5% респондентов; никогда не делятся 13,4% и не стали отвечать определенно 9,3% респондентов. Таким образом, можно сказать, что семья играет важную роль в жизни молодых людей для решения текущих жизненных проблем, получения опыта и напутствия.

Семья в числе главных социальных институтов общества наряду с образованием задает ценностные ориентации молодому поколению. В ходе опроса респондентам был представлен перечень ценностей личностного развития. Данные оценки значимости ценностей – средний балл по 5-балльной шкале приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Оценка значимости ценностей личностного развития участниками опроса

Ценности личностного развития	Средний балл по 5-балльной шкале	Среднее квадратическое отклонение
1. Красота природы и искусства	3,91	0,94
2. Жизненная мудрость (зрелость суждений и здравый смысл, достигаемые жизненным опытом)	4,45	0,84
3. Уверенность в себе (внутренняя гармония, свобода от внутренних противоречий, сомнений)	4,57	0,86

4. Познание (возможность расширения своего образования, кругозора, общей культуры, интеллектуальное развитие)	4,42	0,89
5. Любовь (духовная и физическая близость с любимым человеком)	4,10	1,08
6. Здоровье (физическое и психическое)	4,70	0,61
7. Развлечения (приятное, необременительное времяпрепровождение, отсутствие забот)	4,33	0,76
8. Активная деятельная жизнь (постоянное действие, полнота и эмоциональная насыщенность жизни)	4,12	0,83
9. Общественное призвание (уважение окружающих)	3,65	1,17
10. Продуктивная жизнь (максимально полное использование своих возможностей, сил и способностей)	4,26	0,92
11. Счастье других (благополучие, развитие и совершенствование других людей, всего народа, человечества в целом)	3,73	1,11
12. Материально обеспеченная жизнь	4,52	0,80
13. Наличие близких и верных друзей	4,57	0,88
14. Счастливая семейная жизнь	4,43	1,11
15. Развитие (работа над собой, постоянное физическое и духовное совершенствование)	4,52	0,80
16. Свобода (самостоятельность, независимость в суждениях и поступках)	4,69	0,67
17. Интересная работа	4,51	0,83
18. Творческая самореализация	4,26	1,06

Топ-7 наиболее значимых для сельской молодежи ценностей с точки зрения личностного развития:

- здоровье (физическое и психическое) – $4,70 \pm 0,62$ баллов по пятибалльной шкале;

- свобода (самостоятельность, независимость в суждениях и поступках) – $4,69 \pm 0,66710$ баллов по пятибалльной шкале;

- уверенность в себе (внутренняя гармония, свобода от внутренних противоречий, сомнений) – $4,57 \pm 0,86491$ баллов по пятибалльной шкале;

- наличие близких и верных друзей – $4,57 \pm 0,88$ баллов по пятибалльной шкале;

- развитие (работа над собой, постоянное физическое и духовное совершенствование) – $4,52 \pm 0,80484$ баллов по пятибалльной шкале;

- материально обеспеченная жизнь – $4,52 \pm 0,80$ баллов по пятибалльной шкале;

– интересная работа – $4,51 \pm 0,83$ баллов по пятибалльной шкале.

Такое ценностное ядро позволяет говорить о хороших условиях для формирования репродуктивного здоровья сельской молодежи.

В таблице 2 представлены результаты оценки ценностей личности с точки зрения проживания в конкретном социуме.

Таблица 2.

Оценка значимости ценностей личности с точки зрения жизни в обществе

Ценности личности с точки зрения жизни в социуме	Баллы по 5-балльной шкале	Среднее квадратическое отклонение
1. Эффективность в делах (трудолюбие, продуктивность в работе)	4,24	0,86
2. Воспитанность (хорошие манеры)	4,54	0,82
3. Аккуратность (чистоплотность), умение содержать в порядке вещи, порядок в делах	4,30	1,06
4. Независимость (способность действовать самостоятельно, решительно)	4,53	0,72
5. Жизнерадостность (чувство юмора)	4,42	0,96
6. Самоконтроль (сдержанность, самодисциплина)	4,43	0,88
7. Честность (правдивость, искренность)	4,58	0,73
8. Исполнительность (дисциплинированность)	4,29	0,96
9. Твердая воля (умение настоять на своем, не отступать перед трудностями)	4,29	0,85
10. Терпимость (к взглядам и мнениям других, умение прощать другим их ошибки и заблуждения)	4,22	0,88
11. Непримируемость к недостаткам в себе и других	3,11	1,27
12. Высокие запросы (высокие требования к жизни и высокие притязания)	3,44	1,17
13. Смелость в отстаиваниях своего мнения, взглядов	4,46	0,87
14. Широта взглядов (умение понять чужую точку зрения, уважать иные вкусы, обычаи, привычки)	4,49	0,77
15. Ответственность (чувство долга, умение держать свое слово)	4,62	0,68
16. Образованность (широта знаний, высокая общая культура)	4,39	0,92
17. Чуткость (заботливость)	4,26	1,00
18. Рационализм (умение здраво и логично мыслить, принимать обдуманные решения)	4,66	0,64

Топ-5 наиболее значимых для сельской молодежи ценностей с точки зрения жизни в социуме:

- рационализм (умение здраво и логично мыслить, принимать обдуманные решения) – $4,66 \pm 0,64$ баллов по пятибалльной шкале;
- ответственность (чувство долга, умение держать свое слово) – $4,62 \pm 0,68379$ баллов по пятибалльной шкале;
- честность (правдивость, искренность) – $4,58 \pm 0,73$ баллов по пятибалльной шкале;
- воспитанность (хорошие манеры) – $4,54 \pm 0,82$ баллов по пятибалльной шкале;
- независимость (способность действовать самостоятельно, решительно) – $4,53 \pm 0,72$ баллов по пятибалльной шкале.

Важными применительно сохранения репродуктивного здоровья и поведения является приверженность принятию взвешенных решений, ответственность, правдивость, искренность, воспитанность и самостоятельность.

Большинство участников опроса задумывались над созданием семьи (61,9%). Уже состоят в браке 2,1% респондентов. 1,0% на момент опроса успели развестись. 21,6% – не задумывались над этим вопросом и 13,4% – не стали давать определенный ответ.

Мнения респондентов существенно разнятся относительно наиболее оптимального возраста для создания семьи:

- 16-20 лет указали 5,2% участников опроса;
 - 21-25 лет указали 50,5% участников опроса;
 - 26-30 лет указали 28,9% участников опроса;
 - 30-40 лет указали 9,3% участников опроса;
 - после 40 лет – нет ответов с таким вариантом;
 - возраст не имеет значения – нет ответов с таким вариантом;
 - создавать семью нет необходимости – указали 6,2% участника опроса.
- 51,5% респондентов думали о рождении детей, 3,1% сказали, что уже имеют ребенка; пока не думали о рождении детей 36,1% респондентов. 9,2% респондентов не смогли сказать определенно.

Большинство участников опроса ориентированы на малодетное (1-2 ребенка) репродуктивное поведение: хотели бы иметь одного ребенка 17,5% респондентов и двоих детей 39,2% респондентов, что в целом составляет 56,7% от общего числа участников опроса. На среднететное (3-4 ребенка) репродуктивное поведение ориентированы 14,4% респондентов. На многодетное (5 и более детей) ориентированы 3,1% респондентов. Не

хотят иметь детей вообще 12,4% респондентов и затруднились ответить определенно – 13,4%.

По результатам опросов мы провели ранжирование значимости условий для вступления в брак. Для вступления в брак обязательным условием, по мнению подавляющего большинства респондентов, является взаимная любовь (отметили 92,8%) – этот вариант ответа на первом месте. На втором месте – стабильная заработная плата (отметили 58,8%). На третьем месте – обеспеченность материальными благами (отметили 53,6%); на четвертом месте – здоровье партнеров (отметили 46,4%). Важными, но не решающими являются независимость от родителей (отметили 30,9%); поддержка выбора супруга в семье, среди родственников (27,8%); профессия (наличие, престижность) (23,7%); наличие своего дела (отметили 20,6%). И 6,2% указали, что не рассматривают обязательных условий для вступления в брак.

В целом по результатам опроса мы видим высокий уровень информированности молодежи в вопросах сексуальных отношений: хорошо информированы 51,5% респондентов; в целом информированы, но в некоторых вопросах разбираются слабо 28,9% респондентов; информированы только в отдельных областях 6,2% респондентов; слабо информированы 4,1% респондентов; затруднились дать определенный ответ 9,3% респондентов.

Среди тематики просветительских лекций в области сексуальных отношений участники опроса заинтересовались вопросами физиологии сексуальных отношений (33,0%); информацией о контрацепции (предупреждение нежелательной беременности) (27,8%); обзором заболеваний, передающиеся половым путем (24,7%); половой неприкосновенностью личности (20,6%); патологиями сексуального влечения (15,5%); вопросами искусственного прерывания беременности (аборты) (12,4%).

По мнению 44,3% участников опроса в школах, колледжах и вузах занятия нужны занятия по сексуальному просвещению. Скорее нужны – сказали 27,8% участников опроса. 8,2% считают, что такие занятия скорее не нужны и 12,4% отметили вариант – не нужны. Не смогли высказать определенного мнения 7,2%.

Таким образом, в целом по результатам эмпирической части исследования мы видим позитивную картину:

– выявленные ключевые ценности сельской молодежи в развитии личности и взаимодействии с социумом дают стабильную основу для высокого уровня репродуктивного здоровья сельской молодежи: приверженность принятию взвешенных решений, ответственность, правдивость, искренность, воспитанность и самостоятельность;

- большинство участников опроса планируют иметь детей: 1-2 ребенка – 56,7%, 3-4 ребенка – 14,4%, 5 и более детей – 3,1%;
- для вступления в брак обязательным условием, по мнению подавляющего большинства респондентов, является взаимная любовь (отметили 92,8%);
- отмечается высокий уровень информированности молодежи в вопросах сексуальных отношений;
- среди интересующей тематики просветительских лекций наибольший интерес вызвали вопросы физиологии и контрацепции, что в целом коррелирует с ключевыми ценностями социальной группы, в которой проведено исследование – приверженность принятию взвешенных решений, ответственность, правдивость, искренность, воспитанность и самостоятельность.

Широкая дискуссия идет относительно качества репродуктивного здоровья молодежи в российском сегменте преимущественно социологического знания. Действительно, рассматривать вопросы репродуктивного здоровья в отрыве от социального контекста неверно. В этой связи хотелось бы подчеркнуть актуальность нашего исследования, проведенного именно среди представителей коренных сельских жителей с традиционным укладом семейной жизни, социальным опытом и традиционными ценностями юга России. В целом результаты оценки репродуктивного здоровья молодежи в нашем исследовании положительные. В то время как исследователь Варина Е.Д. в своей статье «Проблемы формирования ценностного отношения молодежи к репродуктивному здоровью» приводит пример результатов опроса 2016 г. среди студентов ярославских вузов, согласно которому, подавляющее большинство студентов плохо информированы в области своего репродуктивного здоровья. Всего 10 % опрошенных знали, что такое репродуктивное здоровье, большинство студентов не знают о существовании социального здоровья: только 28 % представителей точных наук ответили на вопрос [22]. В статье подчеркивается необходимость организации просветительской работы в студенческой молодежной среде. Такой сравнительный вывод показывает актуальность информационного повода для привлечения внимания молодежи к положительным практикам, традициям и ценностям сельских территорий в области сохранения репродуктивного здоровья и поведения населения.

В статье Ю.Ю. Шурыгиной мы видим более позитивную картину в сфере репродуктивного здоровья молодежи. Так в приведенных результатах анонимного анкетирования показано, что репродуктивное здоровье студенческой молодежи значительно лучше, чем молодежи в целом: отсрочен сексуальный дебют, практически нет заболеваний, передаваемых

половым путем, девушки почти не делают абортов [23]. Таким образом, образование как социальный институт играет существенную роль в сохранении репродуктивного здоровья молодежи через ценностные ориентации данной социальной группы, нормативное поле и корпоративные культурные традиции университетского сообщества в России. Образование, наряду с общественным здравоохранением и семьей играют ключевую роль в сохранении репродуктивного здоровья молодежи и организации просветительской работы в подростковой и молодежной среде.

Заключение

Проведенное исследование репродуктивного здоровья сельской молодежи через призму ценностей показывает высокую актуальность затронутой предметной области.

Результаты могут быть использованы в совершенствовании демографической, молодежной политики, разработке управленческих решений в области общественного здравоохранения и образования.

Заключение комитета по этике. Опрос проведен на принципах анонимности в соответствии с этикой организации социологических исследований. Персональные данные или отдельные мнения участников опроса не упоминаются. В анализе использованы обобщенные данные (цифровая база данных), которые обработаны в программном пакете SPSS Statistics program (version 27).

Информированное согласие. Не применимо для массовых социологических исследований, проведенных на условиях анонимности.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Информация о спонсорстве. Исследование проведено при поддержке ФГБОУ ВО Ставропольского ГАУ, участника федеральной программы «Приоритет-2030» в рамках внутреннего гранта университета.

Список литературы

1. Bittleston, H., Hocking, J. S., Temple-Smith, M., Sanci, L., Goller, J. L., & Coombe, J. (2024). What sexual and reproductive health issues do young people want to discuss with a doctor, and why haven't they done so? Findings from an online survey. *Sexual & Reproductive Healthcare*, 40, 100966. <https://doi.org/10.1016/j.srhc.2024.100966> EDN: <https://elibrary.ru/gerozm>

2. Giovenco, D., Pettifor, A., Itzikowitz, G., Chung, S., Qayiya, Y., Kågesten, A. E., Ekström, A. M., & Bekker, L.-G. (2023). Access to sexual and reproductive health services among South African young people living with and without HIV during the COVID-19 pandemic. *Contraception*, 126, 110119. <https://doi.org/10.1016/j.contraception.2023.110119>
3. Arije, O., Hlungwani, T., & Madan, J. (2022). “They will judge you more like a parent instead of like a health practitioner”: Perceptions and preferences of young people regarding sexual and reproductive health services in Southwest Nigeria. *Dialogues in Health*, 1, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.dialog.2022.100051>
4. Musindo, O., Jafry, S., Nyamiobo, J., Becker, K. D., Gellatly, R., Maloy, C., Lozano-Ruiz, A., Romero-Gonzalez, B., Kola, L., Merali, Z., Chorpita, B. F., & Kumar, M. (2023). Mental health and psychosocial interventions integrating sexual and reproductive rights and health, and HIV care and prevention for adolescents and young people (10-24 years) in sub-Saharan Africa: a systematic scoping review. *eClinicalMedicine*, 57, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.101835>
5. Hensen, B., Phiri, M., Schaap, A., Floyd, S., Simuyaba, M., Mwenge, L., Sigande, L., Belemu, S., Shanaube, K., Simwinga, M., Fidler, S., Hayes, R., Ayles, H., & Yathu, Y. (2021). “For us, by us”: Design of a cluster-randomised trial of the impact of community-based, peer-led comprehensive sexual and reproductive health services for adolescents and young people aged 15 to 24 in Lusaka, Zambia. *Contemporary Clinical Trials*, 110, 106568. <https://doi.org/10.1016/j.cct.2021.106568> EDN: <https://elibrary.ru/bpraoa>
6. Bassey, A. E., James, E. N., & Miteu, G. D. (2022). Are youth-friendly reproductive health services accessible for young people with disabilities during the COVID-19 pandemic in Nigeria? *Annals of Medicine and Surgery*, 84, 104856. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.104856>
7. Mason-Jones, A. J., & Nicholson, P. (2018). Structural violence and marginalisation. The sexual and reproductive health experiences of separated young people on the move. A rapid review with relevance to the European humanitarian crisis. *Public Health*, 158, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2018.03.009>
8. Stackpool-Moore, L., Bajpai, D., Caswell, G., Crone, T., Dewar, F., Gray, G., Kyendikuwa, A., Mellin, J., Miller, A., Morgan, F., Orza, L., Stevenson, J., Westerhof, N., Wong, F., Yam, E., & Ziemann, B. (2017). Linking Sexual and Reproductive Health and Rights and HIV Services for Young People: The Link Up Project. *Journal of Adolescent Health*, 60(2, Suppl. 2), S3-S6. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2016.11.008>

9. Ivashova, V., Skabayeva, G., Platonova, A., Kuperbayeva, A., & Sambetkulovala, N. (2023). Transdisciplinary methods in socio-economic and environmental research. *E3S Web of Conferences*, 458, 06006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345806006> EDN: <https://elibrary.ru/aaxntd>
10. Braeken, D., & Rondinelli, I. (2012). Sexual and reproductive health needs of young people: Matching needs with systems. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 119(Suppl. 1), S60-S63. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2012.03.019>
11. Hobcraft, G., & Baker, T. (2006). Special needs of adolescent and young women in accessing reproductive health: Promoting partnerships between young people and health care providers. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 94(3), 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2006.04.024>
12. Hendrixson, A. (2014). Beyond bonus or bomb: upholding the sexual and reproductive health of young people. *Reproductive Health Matters*, 22(43), 125-134. [https://doi.org/10.1016/S0968-8080\(14\)43765-0](https://doi.org/10.1016/S0968-8080(14)43765-0)
13. Godwin, J., Szabo, G., Sass, J., & Sauvarin, J. (2014). Righting the mismatch between law, policy and the sexual and reproductive health needs of young people in the Asia-Pacific Region. *Reproductive Health Matters*, 22(44), 137-147. [https://doi.org/10.1016/S0968-8080\(14\)44808-0](https://doi.org/10.1016/S0968-8080(14)44808-0)
14. Braeken, D., Otoo-Oyortey, N., & Serour, G. (2007). Access to sexual and reproductive health care: Adolescents and young people. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 98(2), 172-174. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2007.04.016>
15. Gonsalves, L., & Hindin, M. J. (2017). Pharmacy provision of sexual and reproductive health commodities to young people: a systematic literature review and synthesis of the evidence. *Contraception*, 95(4), 339-363. <https://doi.org/10.1016/j.contraception.2016.12.002>
16. Hindin, M. J., & Kalamar, A. M. (2016). Detailed Methodology for Systematic Reviews of Interventions to Improve the Sexual and Reproductive Health of Young People in Low- and Middle-Income Countries. *Journal of Adolescent Health*, 59(3, Suppl.), S4-S7. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2016.07.009>
17. Fatusi, A. O. (2016). Young People's Sexual and Reproductive Health Interventions in Developing Countries: Making the Investments Count. *Journal of Adolescent Health*, 59(3, Suppl.), S1-S3. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2016.06.016>
18. Sundby, J. (2006). Young people's sexual and reproductive health rights. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 20(3), 355-368. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2005.12.004>

19. Dorney, E., Black, K. I., Haas, M., Street, D., & Church, J. (2024). The preferences of people in Australia to respond and engage with advertisements to promote reproductive health: Results of a discrete choice experiment. *Preventive Medicine Reports*, 40, 102657. <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2024.102657>
20. Pettersson, J., & Baroudi, M. (2024). Exploring barriers and strategies for improving sexual and reproductive health access for young men in Sweden: Insights from healthcare providers in youth clinics. *Sexual & Reproductive Healthcare*, 39, 100942. <https://doi.org/10.1016/j.srhc.2023.100942>
21. Upadhyay, U. D., Danza, P. Y., Neilands, T. B., Gipson, J. D., Brindis, C. D., Hindin, M. J., Foster, D. G., & Dworkin, S. L. (2021). Development and Validation of the Sexual and Reproductive Empowerment Scale for Adolescents and Young Adults. *Journal of Adolescent Health*, 68(1), 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2020.05.031>
22. Варина, Е. Д. (2022). Проблемы формирования ценностного отношения молодежи к репродуктивному здоровью. *Молодой ученый*, 21(416), 125-126. URL: <https://moluch.ru/archive/416/92274/> EDN: <https://elibrary.ru/ilqocs>
23. Шурыгина, Ю. Ю. (2010). Репродуктивное здоровье студенческой молодежи. *Вестник Бурятского государственного университета*, (12), 182-184. <https://elibrary.ru/naxrub>

References

24. Bittleston, H., Hocking, J. S., Temple-Smith, M., Sanci, L., Goller, J. L., & Coombe, J. (2024). What sexual and reproductive health issues do young people want to discuss with a doctor, and why haven't they done so? Findings from an online survey. *Sexual & Reproductive Healthcare*, 40, 100966. <https://doi.org/10.1016/j.srhc.2024.100966> EDN: <https://elibrary.ru/gerozm>
25. Giovenco, D., Pettifor, A., Itzikowitz, G., Chung, S., Qaiyya, Y., Kågesten, A. E., Ekström, A. M., & Bekker, L.-G. (2023). Access to sexual and reproductive health services among South African young people living with and without HIV during the COVID-19 pandemic. *Contraception*, 126, 110119. <https://doi.org/10.1016/j.contraception.2023.110119>
26. Arije, O., Hlungwani, T., & Madan, J. (2022). "They will judge you more like a parent instead of like a health practitioner": Perceptions and preferences of young people regarding sexual and reproductive health services in Southwest Nigeria. *Dialogues in Health*, 1, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.dialog.2022.100051>
27. Musindo, O., Jafry, S., Nyamiobo, J., Becker, K. D., Gellatly, R., Maloy, C., Lozano-Ruiz, A., Romero-Gonzalez, B., Kola, L., Merali, Z., Chorpita, B. F.,

- & Kumar, M. (2023). Mental health and psychosocial interventions integrating sexual and reproductive rights and health, and HIV care and prevention for adolescents and young people (10-24 years) in sub-Saharan Africa: a systematic scoping review. *eClinicalMedicine*, 57, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.101835>
28. Hensen, B., Phiri, M., Schaap, A., Floyd, S., Simuyaba, M., Mwenge, L., Sigande, L., Belemu, S., Shanaube, K., Simwinga, M., Fidler, S., Hayes, R., Ayles, H., & Yathu, Y. (2021). "For us, by us": Design of a cluster-randomised trial of the impact of community-based, peer-led comprehensive sexual and reproductive health services for adolescents and young people aged 15 to 24 in Lusaka, Zambia. *Contemporary Clinical Trials*, 110, 106568. <https://doi.org/10.1016/j.cct.2021.106568> EDN: <https://elibrary.ru/bpraoa>
29. Bassey, A. E., James, E. N., & Miteu, G. D. (2022). Are youth-friendly reproductive health services accessible for young people with disabilities during the COVID-19 pandemic in Nigeria? *Annals of Medicine and Surgery*, 84, 104856. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.104856>
30. Mason-Jones, A. J., & Nicholson, P. (2018). Structural violence and marginalisation. The sexual and reproductive health experiences of separated young people on the move. A rapid review with relevance to the European humanitarian crisis. *Public Health*, 158, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2018.03.009>
31. Stackpool-Moore, L., Bajpai, D., Caswell, G., Crone, T., Dewar, F., Gray, G., Kyendikuwa, A., Mellin, J., Miller, A., Morgan, F., Orza, L., Stevenson, J., Westerhof, N., Wong, F., Yam, E., & Ziemann, B. (2017). Linking Sexual and Reproductive Health and Rights and HIV Services for Young People: The Link Up Project. *Journal of Adolescent Health*, 60(2, Suppl. 2), S3-S6. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2016.11.008>
32. Ivashova, V., Skabayeva, G., Platonova, A., Kuperbayeva, A., & Sambetkulova, N. (2023). Transdisciplinary methods in socio-economic and environmental research. *E3S Web of Conferences*, 458, 06006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345806006> EDN: <https://elibrary.ru/aaxntd>
33. Braeken, D., & Rondinelli, I. (2012). Sexual and reproductive health needs of young people: Matching needs with systems. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 119(Suppl. 1), S60-S63. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2012.03.019>
34. Hobcraft, G., & Baker, T. (2006). Special needs of adolescent and young women in accessing reproductive health: Promoting partnerships between young people and health care providers. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 94(3), 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2006.04.024>

35. Hendrixson, A. (2014). Beyond bonus or bomb: upholding the sexual and reproductive health of young people. *Reproductive Health Matters*, 22(43), 125-134. [https://doi.org/10.1016/S0968-8080\(14\)43765-0](https://doi.org/10.1016/S0968-8080(14)43765-0)
36. Godwin, J., Szabo, G., Sass, J., & Sauvarin, J. (2014). Righting the mismatch between law, policy and the sexual and reproductive health needs of young people in the Asia-Pacific Region. *Reproductive Health Matters*, 22(44), 137-147. [https://doi.org/10.1016/S0968-8080\(14\)44808-0](https://doi.org/10.1016/S0968-8080(14)44808-0)
37. Braeken, D., Otoo-Oyortey, N., & Serour, G. (2007). Access to sexual and reproductive health care: Adolescents and young people. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 98(2), 172-174. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2007.04.016>
38. Gonsalves, L., & Hindin, M. J. (2017). Pharmacy provision of sexual and reproductive health commodities to young people: a systematic literature review and synthesis of the evidence. *Contraception*, 95(4), 339-363. <https://doi.org/10.1016/j.contraception.2016.12.002>
39. Hindin, M. J., & Kalamar, A. M. (2016). Detailed Methodology for Systematic Reviews of Interventions to Improve the Sexual and Reproductive Health of Young People in Low- and Middle-Income Countries. *Journal of Adolescent Health*, 59(3, Suppl.), S4-S7. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2016.07.009>
40. Fatusi, A. O. (2016). Young People's Sexual and Reproductive Health Interventions in Developing Countries: Making the Investments Count. *Journal of Adolescent Health*, 59(3, Suppl.), S1-S3. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2016.06.016>
41. Sundby, J. (2006). Young people's sexual and reproductive health rights. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 20(3), 355-368. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2005.12.004>
42. Dorney, E., Black, K. I., Haas, M., Street, D., & Church, J. (2024). The preferences of people in Australia to respond and engage with advertisements to promote reproductive health: Results of a discrete choice experiment. *Preventive Medicine Reports*, 40, 102657. <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2024.102657>
43. Pettersson, J., & Baroudi, M. (2024). Exploring barriers and strategies for improving sexual and reproductive health access for young men in Sweden: Insights from healthcare providers in youth clinics. *Sexual & Reproductive Healthcare*, 39, 100942. <https://doi.org/10.1016/j.srhc.2023.100942>
44. Upadhyay, U. D., Danza, P. Y., Neilands, T. B., Gipson, J. D., Brindis, C. D., Hindin, M. J., Foster, D. G., & Dworkin, S. L. (2021). Development and Validation of the Sexual and Reproductive Empowerment Scale for Adolescents and Young Adults. *Journal of Adolescent Health*, 68(1), 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2020.05.031>

45. Varina, E. D. (2022). Problems of forming young people's value attitude towards reproductive health. *Young Scientist*, 21(416), 125-126. URL: <https://moluch.ru/archive/416/92274/> EDN: <https://elibrary.ru/ilqocs>
46. Shurygina, Yu. Yu. (2010). Reproductive health of student youth. *Bulletin of Buryat State University*, (12), 182-184. <https://elibrary.ru/naxrub>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Чвалун Роза Владимировна, кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет»

пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация

chvalun_roza@mail.ru

Маламатов Ахмед Харабиевич, доктор технических наук, профессор института педагогики, психологии и физкультурно-спортивного образования

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова»

ул. Ченышевского, 173, г. Нальчик, 360004, Российская Федерация
akhmed_malamatov@mail.ru

Коноплева Анна Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент института педагогики, психологии и физкультурно-спортивного образования

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова»

ул. Ченышевского, 173, г. Нальчик, 360004, Российская Федерация
konopleva_75@mail.ru

Асатрян Светлана Сергеевна, кандидат социологических наук, доцент, доцент кафедры социологии
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
sasatrian@ncfu.ru

Лесных Юлия Георгиевна, доктор экономических наук, профессор, зав кафедрой педагогики и психологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»
ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Российская Федерация
pedagog-psihol@kubsau.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Roza V. Chvalun, Candidate of Philological Sciences, Associate Professor of the Department of Foreign Languages
Stavropol State Agrarian University
12, Zootekhnicheskii Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation
chvalun_roza@mail.ru
SPIN-code: 9536-7566
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4924-5482>
Researcher ID: C-5146-2013
Scopus Author ID: 57214667035

Akhmed Kh. Malamатов, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Institute of Pedagogy, Psychology and Physical Culture and Sports Education
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevskaya Str., Nalchik, 360004, Russian Federation
akhmed_malamatov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-4920>

Anna N. Konopleva, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Pedagogy, Psychology and Physical Culture and Sports Education
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
173, Chernyshevskaya Str., Nalchik, 360004, Russian Federation

konopleva_75@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1997-4505>

Svetlana S. Asatryan, Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Sociology
North Caucasus Federal University
1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation
sasatryan@ncfu.ru

Juliya G. Lesnykh, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department
of Pedagogy and Psychology
Kuban State Agrarian University
13, Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation
pedagog-psihol@kubsau.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1997-4505>

Поступила 05.09.2024

После рецензирования 08.11.2024

Принята 23.12.2024

Received 05.09.2024

Revised 08.11.2024

Accepted 23.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1184

EDN: ODIRHU

УДК 614.3:633.491



Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ КАРТОФЕЛЯ, ВЫРАЩЕННОГО НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ, РАБОТАЮЩИХ ПО ТРАДИЦИОННОЙ И ОРГАНИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИЯМ

В.В. Закревский, А.А. Подорванов

Аннотация

Обоснование. Картофель потребляется во всём мире и следует за рисом, пшеницей и кукурузой в качестве продовольственной культуры для потребления человеком. Картофель – один из основных продуктов, широко используемый в питании населения Российской Федерации, благодаря своей доступности и высокой пищевой ценности. Его пищевые достоинства определяются сбалансированным соотношением наиболее важных питательных веществ (витаминов, макро- и микроэлементов, крахмала, белка и антиоксидантов). Качество белка картофеля выше, чем у любого другого интенсивно потребляемого растительного белка. Согласно данным Росстата, потребление картофеля на душу населения в России оценивается на уровне 84 кг в год, тогда как утвержденная Минздравом РФ норма потребления составляет 90 кг в год на человека. При этом исследования показали, что фенотипы сельскохозяйственных культур, в том числе картофеля, при выращивании по традиционной и органической технологиям могут иметь отличия не только в урожайности и устойчивости к болезням, но и по показателям пищевой ценности.

Цель. Сравнить физико-химические показатели картофеля, произведённого сельхозпредприятиями по традиционной и органической технологиям и дать оценку его пищевой ценности и безопасности.

Материалы и методы. Объектами исследования были образцы традиционного и органического картофеля пяти сортов: «Карелия», «Бернина»,

«Колетте», «Коломбо», «Ред Скарлет», выращенные на сельскохозяйственных предприятиях Ленинградской и Новгородской областей.

В исследуемых пробах проводили определение физико-химических показателей. Испытания проводились на базе ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской области». Статистическая обработка данных осуществлялась в программе MS Excel 2016.

Результаты. Впервые данные физико-химического анализа проб 5 (пяти) сортов картофеля, произведённого по традиционной и органической технологиям сельхозпредприятиями Северо-Западного региона РФ, позволили подтвердить его безопасность по наличию ряда ксенобиотиков. Установлено, что показатели пищевой ценности исследуемых сортов картофеля, помимо технологии выращивания, находятся в зависимости и от других факторов производства.

В качестве примера приведём сорт «Коломбо», выращенный по традиционной технологии и содержащий калия в 2 раза больше, по сравнению с аналогичным сортом, произведённым в условиях органического производства (Новгородская область).

Заключение. Результаты проведённого исследования позволяют дать объективную оценку показателей безопасности по ряду ксенобиотиков в картофеле, произведённом в условиях традиционной и органической технологий. Показатели безопасности находятся в пределах допустимого уровня, закреплённого законодательством РФ. Установлено, что пищевая ценность картофеля, произведённого органическим способом, находилась в зависимости от выбора сорта, места произрастания и по некоторым показателям не превышала аналогичные данные оценки картофеля, выращенного по традиционной технологии. Дополнительно нами выявлен ряд проблем гигиенического характера по возделыванию овощной продукции с помощью органической технологии.

Ключевые слова: картофель; органическая пищевая продукция; органическое производство; пищевая ценность; безопасность; традиционные и органические технологии; физико-химические показатели

Для цитирования. Закревский, В. В., & Подорванов, А. А. (2025). Сравнительная оценка пищевой ценности и безопасности картофеля, выращенного на сельскохозяйственных предприятиях, работающих по традиционной и органической технологиям. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 380-396. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1184>

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF NUTRITIONAL VALUE AND SAFETY OF POTATOES GROWN ON AGRICULTURAL ENTERPRISES USING CONVENTIONAL AND ORGANIC TECHNOLOGIES

V.V. Zakrevskii, A.A. Podorvanov

Abstract

Background. Potatoes are consumed worldwide and rank after rice, wheat, and maize as a food crop for human consumption. Potato is one of the main products widely used in the diet of the population of the Russian Federation due to its availability and high nutritional value. Its nutritional benefits are determined by a balanced ratio of the most important nutrients (vitamins, macro- and microelements, starch, protein and antioxidants). The quality of potato protein is higher than that of any other intensively consumed plant protein. According to the Federal Service for State Statistics (Rosstat), potato consumption per capita in Russia is estimated at 84 kg per year, while the consumption norm approved by the Ministry of Health of the Russian Federation is 90 kg per person per year. Moreover, studies have shown that the phenotypes of crops, including potatoes, when grown using conventional and organic technologies can have differences not only in yield and disease resistance, but also in nutritional value.

Purpose. To compare physicochemical parameters of potatoes produced by agricultural enterprises under conventional and organic technologies and to evaluate their nutritional value and safety.

Materials and methods. The subjects of the study were samples of conventional and organic potatoes of five varieties: “Karelia”, “Bernina”, “Colette”, “Colombo”, “Red Scarlett”, grown on agricultural enterprises in the Leningrad and Novgorod regions. Physicochemical indicators were determined in the studied samples. Tests were conducted at the FBUZ “Center for Hygiene and Epidemiology in St. Petersburg and the Leningrad Region”. Statistical processing of the data was carried out using MS Excel 2016.

Results. For the first time the data of physicochemical analysis of samples of 5 (five) potato varieties produced by conventional and organic technologies by agricultural enterprises of the North-West region of the Russian Federation, allowed to

confirm its safety in the presence of a number of xenobiotics. It was found that the indicators of nutritional value of the studied potato varieties, in addition to cultivation technology, are dependent on other factors of production. As an example, let us take the variety “Colombo”, grown under conventional technology and containing potassium 2 times more, compared with a similar variety produced under organic production conditions (Novgorod region).

Conclusion. The results of the study allow us to give an objective assessment of safety indicators for a number of xenobiotics in potatoes produced under conventional and organic technologies. Safety indicators are within the permissible level, fixed by the legislation of the Russian Federation. It was found that the nutritional value of potatoes produced by organic method, was depending on the choice of variety, place of growth and for some indicators did not exceed the similar assessment data of potatoes grown under conventional technology. In addition, we have identified a number of hygienic problems on cultivation of vegetable products with the help of organic technology.

Keywords: potatoes; organic food; organic production; nutritional value; safety; conventional and organic technologies; physicochemical indicators

For citation. Zakrevskii, V. V., & Podorvanov, A. A. (2025). Comparative assessment of nutritional value and safety of potatoes grown on agricultural enterprises using conventional and organic technologies. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 380-396. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1184>

Введение

Одно из основных направлений государственной политики Российской Федерации – «обеспечение качества пищевой продукции как важнейшей составляющей укрепления здоровья, увеличения продолжительности и повышения качества жизни населения, содействие и стимулирование роста спроса и предложения на более качественные пищевые продукты» [16, с. 4]. Исследованиями учёных доказано, что органические продукты в рационе питания человека более эффективны и полезны для здоровья по сравнению с традиционными. Органические продукты способствуют уменьшению «влияния на организм загрязняющих веществ» [18; 21; 23; 25] и обеспечивают более «высокую пищевую ценность» [26; 27].

Сельскохозяйственная продукция, выращенная по органической технологии, в частности, картофель, красный перец, капуста, содержит на 10-20% больше витамина С, биофлавоноидов, других антиоксидантных веществ по сравнению с овощами, произведённым по традиционной тех-

нологии [22; 5, с. 42]. Кроме того, органические продукты содержат более низкий показатель пестицидов, нитратов, токсичных металлосоединений, микотоксинов [19; 24]. Зарубежные исследователи указывают на содержание нитратов и кадмия в 1,5 – 2 раза меньше в органическом картофеле по сравнению с произведённым традиционным способом [22]. Мнения учёных тождественны также в отношении более низкого содержания ксенобиотиков в продукции органического производства. Что же касается показателей биологической и пищевой ценности органических овощей и фруктов, то их оценка противоречива.

Картофель является одной из важных продовольственных культур в мире, популярным продуктом питания населения, отличающимся многообразием сортов, вкусов, уникальным химическим составом, содержащим не только углеводы, но и витамины, микроэлементы, пектиновые вещества и др., благотворно влияющие на организм человека [6; 14; 20].

Помимо его полезных свойств и качеств, картофель может легко приспособляться к природно-климатическим зонам произрастания, что указывает на улучшение селекции и появление новых сортов. Большой научный и практический потенциал представляют 525 отечественных сортов картофеля, 303 из которых входят в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений, культивируемых в 12 почвенно-климатических российских регионах [1]. Интерес российских учёных вызывают исследования и зарубежных селекционеров.

Картофель как продовольственная культура и основной продукт питания населения различных природно-климатических зон имеет значительный статус в современном мире. Российская Федерация занимает второе место в мире по площади, занятой картофелем, и третье место – по валовым сборам. Картофель, отличаясь «большой пластичностью, адаптивностью и высокой потенциальной продуктивностью» [13, с. 7], отвечает современным требованиям здорового питания. Так, с учётом химического состава и энергетической ценности, в Рекомендациях по рациональным нормам потребления пищевых продуктов указана норма потребления картофеля – «не менее 90 кг на человека в год» [9].

Указанное выше делает актуальным исследования пищевой ценности разных сортов картофеля, выращенных в Северо-Западном регионе РФ с использованием как традиционной, так и органической технологии.

Цель исследования – сравнить физико-химические показатели картофеля, произведённого сельхозпредприятиями по традиционной и органической технологиям и дать оценку его пищевой ценности и безопасности.

Материалы и методы исследования

Проведён анализ пяти сортов картофеля, выращенного в крестьянских фермерских хозяйствах (далее – КФХ) Ленинградской и Новгородской областей [4]. КФХ «НОВА РУССА» выращивает сорта «Карелия», «Бернина», «КоLETTE» на основе органической технологии. ИП ГКФХ Короткова Ю.П. (сорт «Коломбо») и АО «Племенной завод ПРИНЕВСКОЕ» (сорт «Ред Скарлет») выращивают продукты по традиционным технологиям. Все вышеназванные сорта урожая 2023 г. были в технической степени зрелости. Эти сорта выбраны в связи с их выращиванием в Северо-Западном регионе.

Определение витамина С и калия (К) проводилось согласно Руководству по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов [15, с. 69, 85], железа (Fe) – согласно ГОСТ 30178-2012. Определение цинка (Zn) осуществлялось в соответствии с МУК 4.1.991-00 «Методика выполнения измерений массовой доли меди и цинка в пищевых продуктах и продовольственном сырье методом электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии». Определение алюминия (Al) – согласно ГОСТ 31671-2012 «Продукты пищевые. Определение следовых элементов. Подготовка проб методом минерализации при повышенном давлении».

Определение свинца (Pb) и кадмия (Cd) выполнялось согласно ГОСТ EN14083-2013 «Продукты пищевые. Определение следовых элементов. Определение свинца, кадмия, хрома и молибдена с помощью атомно-абсорбционной спектрометрии с атомизацией в графитовой печи с предварительной минерализацией пробы при повышенном давлении». Определение мышьяка проводилось в соответствии с ГОСТ 31707-2012 «Продукты пищевые. Определение следовых элементов. Определение общего мышьяка и селена методом атомно-абсорбционной спектрометрии с генерацией гидридов с предварительной минерализацией пробы под давлением», ртути (Hg) – согласно ГОСТ Р53183-2008 «Продукты пищевые. Определение следовых элементов. Определение ртути методом атомно-абсорбционной спектрометрии холодного пара с предварительной минерализацией пробы под давлением».

Определение ГХЦГ, ДДТ – согласно ГОСТ 30349-96 «Плоды, овощи и продукты их переработки. Методы определения остаточных количеств хлорорганических пестицидов».

Определение нитратов осуществлялось согласно МУ 5048-89, п. 2. Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства.

Определение удельной активности стронция-90 проводилось согласно ГОСТ 32163-2013 «Продукты пищевые. Метод определения содержания стронция Sr-90», удельной активности цезия-137 – согласно ГОСТ 32161-2013 «Продукты пищевые. Метод определения содержания цезия Cs-137».

Оборудование: анализатор ртути Mercur DUO Plus (Германия), атомно-абсорбционный спектрометр «ZEE nit 650» (Германия), атомно-абсорбционный спектрометр «ZEE nit 650P» (Германия), атомно-абсорбционный спектрометр ContrAA-600 (Германия), спектрометр атомно-абсорбционный «NovAA 350» (Германия), газовый хроматограф «Кристалл 5000.2» (Россия), анализатор жидкостный лабораторный Эксперт-001-3(0.1) с электродами (Россия).

Все контрольные измерения производились в условиях повторяемости. Статистический контроль проводился в программе MS Excel 2016. Различия считали статистически значимым при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Специалисты санитарно-химической лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской области» и авторы данной статьи произвели анализ сортов картофеля, выращенного в КФХ. Образцы картофеля исследовались на наличие в них пестицидов, нитратов, свинца, мышьяка, кадмия, ртути, удельной активности цезия-137, стронция-90, ряда нутриентов при помощи стандартных методов контроля [4, с. 70].

В ходе исследования образцов картофеля урожая 2023 г., выращенного в условиях органической технологии, установлено «количественное содержание пестицидов, токсичных металлов соединений и нитратов во много раз ниже допустимого уровня $\leq 0,1$ » по сравнению с образцами традиционного производства [4, с. 70-71]. Такие показатели убеждают в высокой пищевой ценности и безопасности картофеля органического с аналогичной культурой, произведённой по традиционной технологии.

Пищевая ценность картофеля во многом зависит от содержания в нём витамина С и калия. В свою очередь, эти показатели напрямую связаны с сортом, климатом произрастания, а при исследовании с применением стандартных методов могут давать широкую выборку. Несмотря на то, что по сравнению с другими овощными культурами картофель «не является основным источником витамина С» [2], тем не менее, одним из самых востребованных и почти ежедневно потребляемых продуктов питания российского населения [6]. В сочетании с железом витамин С усиливает полезность картофеля для организма с нутрициологических позиций.

Таблица 1.

**Содержание ксенобиотиков в картофеле урожая 2023 г., выращенного
по органической и традиционной технологиям в КФХ**

Показатели	Новгородская обл.				Ленинград- ская обл.	Допу- сти- мый уро- вень
	органический			тради- цион- ный	традицион- ный	
	Сорт	Карелия	Бернина	Колетте	Коломбо	Ред Скарлет
Пестициды, мг/кг:						
ДДТ и его метаболиты		<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	£0,1
ГХЦГ (α, β, γ-изо- меры		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	£0,1
Токсичные элементы, мг/кг:						
Свинец		<0,04	<0,1	<0,04	<0,04	£0,5
мышьяк		<0,01	<0,01	<0,015	<0,01	£0,2
Кадмий		<0,01	<0,01	<0,01	<0,019	£0,03
Ртуть		<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	£0,02
Нитраты, мг/кг		<30	<30	<30	<33	£250
Удельная активность:						
цезий, Бк/кг(л)		<5	<5	<5	<5	80
стронций, Бк/кг(л)		<5	<5	<5	<5	40

Известно, что средний диапазон содержания витамина С в картофеле равен 20 мг/100 г [17]. Исходя из этого, мы пришли к выводу о том, что этому показателю соответствуют в целом все исследуемые сорта картофеля. Однако при сравнении результатов сорт «Карелия» (органическая технология) показал меньшее содержание витамина С – $10,8 \pm 1,5$ мг/100 г, а сорт «Коломбо» (традиционная технология) – больший, равный $16,4 \pm 0,14$ мг/100 г (табл. 2). При этом содержание железа в традиционном и органическом картофеле не имеет существенных различий, составляя в разных сортах органического картофеля от $1,26 \pm 0,21$ мг/100 г до $1,28 \pm 0,22$ мг/100 г, а в традиционных сортах от $1,24 \pm 0,21$ мг/100 г до $1,26 \pm 0,21$ мг/100 г. (табл. 2).

Польза калия как важнейшего микроэлемента для организма человека убедительно доказана многочисленными научными исследованиями. Калий регулирует водно-солевой баланс и, во многом, отвечает за сердечный ритм. Примерно 98% этого микроэлемента содержится внутри клеток организма. Помимо этого, калий жизненно необходим для нормальной работы мышечной ткани (в том числе мышцы сердца) [3; 10; 11].

Наши исследования по содержанию калия в картофеле показали следующее. Наименьшее содержание калия оказалось в органическом сорте картофеля «Колетте» – 238 ± 39 мг/100 г, а самое высокое – в традиционном сорте «Коломбо» – 561 ± 74 мг/100 г. (табл. 2). Согласно справочнику химического состава российских пищевых продуктов, среднее значение калия в картофеле 568 мг/100 г. [17].

В ходе исследования были получены новые данные относительно содержания цинка в сортах картофеля, выращенного на основе органической и традиционной технологий. Цинк является важным и жизненно необходимым элементом, участвующим с помощью цинкосодержащего гормона (инсулина) в углеводном обмене организма человека. Во взаимодействии с цинком активен витамин А. Цинк участвует в формировании костей, «влияет на вкус и обоняние», оказывает «антивирусное и антитоксическое действие» [12].

Наше исследование показало, что содержание цинка в картофеле, выращенном по органической и традиционной технологиям, имело существенные различия. Так, в разных сортах органического картофеля они составляли – от $0,42 \pm 0,15$ мг/100 г до $0,97 \pm 0,34$ мг/100 г, а в традиционных сортах – от $0,40 \pm 0,14$ мг/100 г до $0,41 \pm 0,14$ мг/100 г. (табл. 2). Наибольшее содержание цинка определялось в органическом картофеле сорта «Бернина» – $0,97 \pm 0,34$ мг/100 г, а самое низкое – в традиционном сорте «Коломбо» – $0,40 \pm 0,14$ мг/100 г (табл. 2). Среднее значение цинка в картофеле $0,36$ мг/100 г. [17].

Таблица 2.

Показатели пищевой ценности картофеля урожая 2023 г., выращенного по органической и традиционной технологиям в КФХ

Показатели	Новгородская обл.				Ленинградская обл.	
	Органический			традици- онный	традиционный	
	Сорт	Карелия	Бернина			Колетте
Калий		271,2±81,4	241±40	238±39	561±74	280±44
Витамин С, мг%		10,8±1,5	14,6±3,1	15,8±3,3	16,4±3,4	12,9±2,7
Алюминий, мг%		0,10±0,03	0,12±0,04	0,17±0,05	0,06±0,02	0,08±0,02
Железо, мг%		1,26±0,21	1,26±0,21	1,28±0,22	1,26±0,21	1,24±0,21
Цинк, мг%		0,42±0,15	0,97±0,34	0,44±0,16	0,40±0,14	0,41±0,14

В ходе лабораторного анализа образцов пяти сортов картофеля, выращенных по двум видам сельскохозяйственных технологий, мы обна-

ружили проблемы, возникающие в процессе производства растительной органической продукции.

Внимательное изучение законодательных документов ЕС и РФ показало, что они «не предусматривают конкретные расстояния от источников загрязнения до возделываемых пашен и нормирование разрешённых средств защиты растений (далее – СЗР) в органической пищевой продукции» [5, с. 43]. Серьёзную озабоченность вызывает зависимость от импорта семян и некоторых компонентов производства, не используемых в России. Остро стоит вопрос о дозировке и корректном применении биопестицидов производителями. Разрешённые при производстве органической растительной продукции препараты на основе пиретринов и ротенона, спиносад, азадирахтин и др., практически не находят применения фермерскими хозяйствами Северо-Западного региона из-за сложности их приобретения [7]. Следовательно, не может совершенствоваться методическая база исследования органической продукции. Вместе с тем, расширение границ органического производства в России с применением СЗР и современных методов исследования пищевой ценности сельскохозяйственных продуктов позволят в будущем определять концентрации «от минимальных до максимальных значений» как показатель их безопасности для здоровья человека [4, с. 70].

Сравнивая севообороты органического и традиционного земледелия, отметим, что агротехнологии достижения высоких урожаев сельхозпродуктов пока не разработаны в полной мере. Известно, что при выращивании органических продуктов запрещается использование синтетических минеральных удобрений, химических препаратов защиты растений, широко применяемых при традиционной технологии выращивания. Но, как показала практика, даже строгое соблюдение правил органического производства не всегда сохраняет продукты от «остатков пестицидов и других ксенобиотиков в пищевых продуктах». Необходимо учитывать также факторы «общего загрязнения окружающей среды» [4, с. 70]. В отчётных документах Роспотребнадзора на сегодняшний день не предусмотрены методы исследования органической пищевой продукции «по санитарно-химическим, паразитологическим, микробиологическим показателям и удельной активности радиоактивных веществ» [4, с. 71]. Действительно, на российский рынок поступает небольшое количество выращенной органической продукции крестьянских фермерских хозяйств, следовательно, разработка и внедрение в практику инновационных методов исследования СЗР рассматривается как экономически очень затратный процесс. Органи-

ческое производство в мире и в России развивается, польза органических продуктов питания для здоровья населения неоспорима, благодаря их пищевой ценности и безопасности [8]. Помимо этого, производство органических продуктов служит сохранности окружающей природной среды [5].

Заключение

Получены данные, характеризующие пищевую ценность по содержанию аскорбиновой кислоты, калия, железа, цинка, алюминия в трёх сортах картофеля, выращенного по органической технологии, и двух сортах – по традиционной, в КФХ Северо-Западного региона. Исследования показали, что традиционный сорт «Коломбо», выращенный в Новгородской области, содержит наибольший уровень калия, витамина С в комплексе с подобным уровнем биодоступного железа. Однако содержание цинка в данном образце оказалось самым низким по сравнению с сортами картофеля, выращенными по органической технологии, но не ниже значений, указанных в Справочнике [17]. Содержание цинка в сорте «Бернина», произведённом по органической технологии, хотя статистически незначимо, но в 2,4 раза превышало содержание его в сортах «Коломбо» и «Ред Скарлет», выращенных по традиционной технологии. Содержание витамина С, железа, алюминия в сортах картофеля, выращенных по органической и традиционной технологиям, не имело существенных различий.

Проведённое исследование позволило также установить, что все исследованные сорта как органического, так и традиционного картофеля по показателям безопасности соответствуют нормативным показателям.

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

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарности. Авторы научной статьи выражают большую благодарность Яковлевой Ульяне Николаевне, заведующей отделом гигиены питания ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской области».

Список литературы

1. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том 1. Сорта растений (официальное издание). URL: <https://gossortrf.ru/register/gosudarstvennyy-reestr-seleksionnykh>

- dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/?arrFilter_pf[CULTURE_NAME]=картофель&arrFilter_pf%
2. Елисеева, Т., Мироненко, А. (2018). Витамин С (аскорбиновая кислота) описание, польза и где содержится. *Журнал здорового питания и диетологии*, (4), 33-44.
 3. Елисеева, Т., Мироненко, А. (2020). Калий (K, potassium) - описание, влияние на организм, лучшие источники. *Журнал здорового питания и диетологии*, (13), 59-70.
 4. Закревский, В. В., Подорванов, А. А., Яковлева, У. Н. (2024). Гигиенические особенности производства органической растительной пищевой продукции и контроля за ней надзорными органами. В *Актуальные вопросы профилактической медицины, организации здравоохранения и обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: факторы, технологии, оценка рисков*. Нижний Новгород: Медиаль, 68-73. EDN: <https://elibrary.ru/vkbnpa>
 5. Закревский, В. В., Мелешкова, И. В., Кордюкова, Л. В., Подорванов, А. А. (2021). Органические продукты питания - актуальное направление сельскохозяйственного производства. *Экология и развитие общества*, 2-3(36), 38-45. EDN: <https://elibrary.ru/jbllibk>
 6. Капитонова, Э. К. (2015). Ода картофелю. *Медицинские новости*, (10), 42-45. EDN: <https://elibrary.ru/vkxrpj>
 7. Методические указания МУК 4.1.1434-03 "Определение остаточных количеств Спинозина А и Спинозина Д в воде, почве, плодах огурца, яблок, перца, клубнях картофеля и капусте методом высокоэффективной жидкостной хроматографии".
 8. Мишура, Н. П. (2022). *Перспективные технологии производства органической овощной продукции: аналит. обзор*. М., 72 с.
 9. Об утверждении рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых веществ и продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания: приказ Министерства здравоохранения РФ от 19.08.2016 №614. (2022). URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71385784>
 10. Погожева, А. В., Коденцова, В. М. (2020). О рекомендуемом потреблении и обеспеченности населения калием и магнием. *РМЖ*, (3), 8-12. EDN: <https://elibrary.ru/tvhhyz>
 11. Погожева, А. В., Коденцова, В. М., Шарафетдинов, Х. Х. (2022). Роль магния и калия в профилактическом и лечебном питании. *Вопросы питания*, 5(543), 29-42. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-5-29-42> EDN: <https://elibrary.ru/ilcwfo>

12. Сальникова, Е. В. (2012). Цинк - эссенциальный микроэлемент (обзор). *Вестник ОГУ*, 10(146), 170-172. EDN: <https://elibrary.ru/pxfmrh>
13. Симаков, Е. А., Логинов, Ю. П., Симакова, Т. В. (2023). *Урожайность и качество семенных клубней сортов картофеля в условиях Западной Сибири: монография*. Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 154 с.
14. Симакова, Т. В. (2007). *Совершенствование элементов технологии выращивания картофеля в лесостепной зоне Северного Зауралья*: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09. Тюмень, 174 с. EDN: <https://elibrary.ru/noybrz>
15. Скурихин, И. М., Тутельян, В. А. (1998). *Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов*. М.: Медицина, 240 с. EDN: <https://elibrary.ru/smcmaf>
16. Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года (2016). Утверждена распоряжением Правительства РФ от 29.06.2016 № 1364-р.
17. Химический состав российских пищевых продуктов: справочник / под ред. И. М. Скурихина, В. А. Тутельяна. (2008). М.: ДеЛи принт, 155 с.
18. Hughner, R. S. (2007). Who are organic food consumers? A compilation and review of why people purchase organic food. *J. Consum. Behav.*, 6, 94-110. <https://doi.org/10.1002/cb.210>
19. Hurtado-Barroso, S. (2019). Organic food and the impact on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(4), 704-714. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1394815>
20. King, J. C., Slavin, J. L. (2013). White potatoes, human health, and dietary guidance. *Adv Nutr*, 4(3), 393-401. <https://doi.org/10.3945/an.112.003525>
21. Magnusson, M. K. (2003). Choice of organic foods is related to perceived consequences for human health and to environmentally friendly behaviour. *Appetite*, 40, 109-117. [https://doi.org/10.1016/S0195-6663\(03\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S0195-6663(03)00002-3)
22. Rembialkowska, E. (1998). A comparison of selected parameters of potatoes health quality from ecologically oriented and conventional farms. *Rocz. Panstw. Zakl. Hig.*, 49(2), 159-167.
23. Schifferstein, H. N. J., & Oude Ophuis, P. A. M. (1998). Health-related determinants of organic food consumption in the Netherlands. *Food Quality and Preference*, 9, 119-133. [https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(97\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(97)00044-X)
24. Smith-Spangler, C. (2012). Are organic foods safer or healthier than conventional alternatives? A systematic review. *Annals of Internal Medicine*, 157(5), 348-366. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-157-5-201209040-00007>
25. Torjusen, H., Sangstad, L., O'Doherty Jensen, K., & Kjaernes, U. (2004). *European consumers' conceptions of organic food: A review of available research*. Oslo: National Institute for Consumer Research, 148 p.

26. Willer, H., & Lernoud, J. (2018). *The world of organic agriculture: Statistics and emerging trends 2018*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick; IFOAM – Organics International, Bonn. Version 1.3 (February 20).
27. Williams, P. R., & Hammitt, J. K. (2001). Perceived risks of conventional and organic produce: pesticides, pathogens, and natural toxins. *Risk Analysis*, 21, 319-330. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.212114>

References

1. State Register of Selection Achievements Permitted for Use. Volume 1. Plant Varieties (official publication). URL: [https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektcionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/?arrFilter_pf\[CULTURE_NAME\]=картофель&arrFilter_pf%2](https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektcionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/?arrFilter_pf[CULTURE_NAME]=картофель&arrFilter_pf%2)
2. Eliseeva, T., & Mironenko, A. (2018). Vitamin C (ascorbic acid): description, benefits, and sources. *Journal of Healthy Nutrition and Dietetics*, (4), 33-44.
3. Eliseeva, T., & Mironenko, A. (2020). Potassium (K, potassium): description, effects on the body, best sources. *Journal of Healthy Nutrition and Dietetics*, (13), 59-70.
4. Zakrevsky, V. V., Podorvanov, A. A., & Yakovleva, U. N. (2024). Hygienic features of organic plant food production and supervision by regulatory authorities. In *Current Issues of Preventive Medicine, Healthcare Organization and Ensuring Sanitary and Epidemiological Well-being of the Population: Factors, Technologies, Risk Assessment*. Nizhny Novgorod: Media, 68-73. EDN: <https://elibrary.ru/vkbnpa>
5. Zakrevsky, V. V., Meleshkova, I. V., Kordyukova, L. V., & Podorvanov, A. A. (2021). Organic food products: a current direction in agricultural production. *Ecology and Development of Society*, 2-3(36), 38-45. EDN: <https://elibrary.ru/jblibk>
6. Kapitonova, E. K. (2015). Ode to Potato. *Medical News*, (10), 42-45. EDN: <https://elibrary.ru/vkxpqj>
7. Methodical Guidelines MUK 4.1.1434-03 “Determination of Residual Amounts of Spinosin A and Spinosin D in Water, Soil, Cucumber Fruits, Apples, Peppers, Potato Tubers, and Cabbage Using High-Performance Liquid Chromatography”.
8. Mishura, N. P. (2022). Promising Technologies for Organic Vegetable Production: Analytical Review. Moscow, 72 p.
9. On Approval of Recommendations for Rational Norms of Food Substance and Product Consumption Meeting Modern Requirements of Healthy Nutrition: Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 19.08.2016 №614 (2022). URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71385784>

10. Pogozheva, A. V., & Kodentsova, V. M. (2020). On recommended intake and population's provision with potassium and magnesium. *RMJ*, (3), 8-12. EDN: <https://elibrary.ru/tvhhzy>
11. Pogozheva, A. V., Kodentsova, V. M., & Sharafetdinov, Kh. Kh. (2022). The role of magnesium and potassium in preventive and therapeutic nutrition. *Voprosy Pitania*, 5(543), 29-42. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-5-29-42> EDN: <https://elibrary.ru/ilcwfo>
12. Salnikova, E. V. (2012). Zinc — an essential trace element (review). *Vestnik OGU*, 10(146), 170-172. EDN: <https://elibrary.ru/pxfmrh>
13. Simakov, E. A., Loginov, Yu. P., & Simakova, T. V. (2023). *Yield and quality of potato seed tubers in Western Siberia conditions: monograph*. Tyumen: Northern Cis-Urals State Agricultural University, 154 p.
14. Simakova, T. V. (2007). *Improvement of potato cultivation technology elements in the forest-steppe zone of Northern Cis-Urals: PhD thesis*. Tyumen, 174 p. EDN: <https://elibrary.ru/noybrz>
15. Skurikhin, I. M., & Tutelyan, V. A. (1998). *Guide to methods for analyzing food quality and safety*. Moscow: Medicine, 240 p. EDN: <https://elibrary.ru/smcmaf>
16. *Strategy for improving food quality in the Russian Federation until 2030* (2016). Approved by RF Government Decree No. 1364-r dated 29.06.2016.
17. *Chemical composition of Russian food products: reference book* (2008). (Eds.) I. M. Skurikhin, V. A. Tutelyan. Moscow: DeLi print, 155 p.
18. Hughner, R. S. (2007). Who are organic food consumers? A compilation and review of why people purchase organic food. *J. Consum. Behav.*, 6, 94-110. <https://doi.org/10.1002/cb.210>
19. Hurtado-Barroso, S. (2019). Organic food and the impact on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(4), 704-714. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1394815>
20. King, J. C., Slavin, J. L. (2013). White potatoes, human health, and dietary guidance. *Adv Nutr*, 4(3), 393-401. <https://doi.org/10.3945/an.112.003525>
21. Magnusson, M. K. (2003). Choice of organic foods is related to perceived consequences for human health and to environmentally friendly behaviour. *Appetite*, 40, 109-117. [https://doi.org/10.1016/S0195-6663\(03\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S0195-6663(03)00002-3)
22. Rembialkowska, E. (1998). A comparison of selected parameters of potatoes health quality from ecologically oriented and conventional farms. *Rocz. Panstw. Zakl. Hig.*, 49(2), 159-167.
23. Schifferstein, H. N. J., & Oude Ophuis, P. A. M. (1998). Health-related determinants of organic food consumption in the Netherlands. *Food Quality and Preference*, 9, 119-133. [https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(97\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(97)00044-X)

24. Smith-Spangler, C. (2012). Are organic foods safer or healthier than conventional alternatives? A systematic review. *Annals of Internal Medicine*, 157(5), 348-366. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-157-5-201209040-00007>
25. Torjusen, H., Sangstad, L., O'Doherty Jensen, K., & Kjaernes, U. (2004). *European consumers' conceptions of organic food: A review of available research*. Oslo: National Institute for Consumer Research, 148 p.
26. Willer, H., & Lernoud, J. (2018). *The world of organic agriculture: Statistics and emerging trends 2018*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick; IFOAM – Organics International, Bonn. Version 1.3 (February 20).
27. Williams, P. R., & Hammitt, J. K. (2001). Perceived risks of conventional and organic produce: pesticides, pathogens, and natural toxins. *Risk Analysis*, 21, 319-330. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.212114>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Закревский Виктор Вениаминович, доктор мед. наук, доцент, заведующий кафедрой гигиены питания

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Кирочная, 41, г. Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация
Viktor.Zakrevskii@szgmu.ru

Подорванов Антон Андреевич, ассистент кафедры гигиены питания, аспирант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Кирочная, 41, г. Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация
Anton.Podorvanov@szgmu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Zakrevskii, Professor, Head of the Department of Hygiene of Nutrition

*North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov
41, Kirochnaya Str., Sankt-Petersburg, 191015, Russian Federation*

Viktor.Zakrevskii@szgmu.ru

SPIN-code: 4606-3139

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-2986>

Anton A. Podorvanov, Assistant of the Department of Hygiene of Nutrition, PhD-student

*North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov
41, Kirochnaya Str., Sankt-Petersburg, 191015, Russian Federation*

Anton.Podorvanov@szgmu.ru

SPIN-code: 6130-1367

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1634-1779>

Поступила 23.10.2024

После рецензирования 28.11.2024

Принята 05.12.2024

Received 23.10.2024

Revised 28.11.2024

Accepted 05.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1445

EDN: RJDUBX

УДК 614.256 + 34.04



Научная статья

ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ И ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОКАЗАНИЯ ВОЕННОСЛУЖАЩИМ (СОТРУДНИКАМ) МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ ПО ОНКОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОФИЛЮ

*П.Ю. Наумов, А.В. Дубинин,
А.А. Утюганов, Р.В. Зеленукин*

Аннотация

Обоснование. На современном этапе в России медицинская помощь онкологическим больным обеспечивается скоординированной системой государственных и муниципальных медицинских организаций, а также ведомственным компонентом оказания медицинской помощи. Основными задачами медицинского обеспечения по онкологическому профилю является профилактика, диагностика, лечение и реабилитация пациентов, страдающих злокачественными новообразованиями. Целью исследования явилось комплексное познание нормативного правового регулирования оказания военнослужащим (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю и проблем реализации регуляционной функции в данной области социального взаимодействия.

Цель исследования. В работе изучаются и обосновываются организационные основы и проблемы нормативного правового регулирования оказания медицинской помощи военнослужащим (сотрудникам) по онкологическому профилю, отмечается социальная и гуманистическая значимость разрешения, выявленных проблем.

Материалы и методы. С точки зрения сравнительно правового подхода, авторы используют методы сравнения, аналогии, обобщения и синтеза, а также приемы комплексного подхода, которые позволили изучить имеющиеся федеральные и ведомственные нормативные правовые акты в сопоставлении с проблемными вопросами, имеющимися на данный момент, в сфере регулирования оказания медицинской помощи военнослужащим (сотрудникам) по онкологическому профилю.

Результаты. В работе рассматриваются содержательные основы нормативного правового регулирования оказания военным (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю и проблемные вопросы такого регулирования. Актуальность проведенного исследования обусловлена увеличением на постоянной основе количества онкологических больных, среди которых имеются и военнослужащие (сотрудники) Росгвардии. Онкологические заболевания сопровождаются высокой летальностью указанной патологии среди пациентов. Повышение качества, полноты, доступности и эффективности оказания медицинской помощи онкологическим больным требует и совершенствования нормативного правового регулирования указанного направления деятельности.

Выводы. На основе концептуализации правовых основ и проблемных аспектов оказания медицинской помощи военным (сотрудникам) по онкологическому профилю в работе предлагается рассмотреть вопросы совершенствования организации диспансерного наблюдения военнослужащих (сотрудников) в связи со злокачественными новообразованиями, а также представлены предложения по изменению перечня страховых случаев в отношении военнослужащих (сотрудников).

Ключевые слова: восстановление здоровья; медицинская помощь; качество жизни; диспансерное наблюдение; медицинское обеспечение; заболевания; злокачественные новообразования; экспертиза временной нетрудоспособности; военно-врачебная экспертиза; реабилитация

Для цитирования. Наумов, П. Ю., Дубинин, А. В., Утюганов, А. А., & Зелепукин, Р. В. (2025). Организационно-правовые аспекты и проблемы регулирования оказания военным (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 397-423. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1445>

Original article

ORGANIZATIONAL AND LEGAL ASPECTS AND PROBLEMS OF REGULATION OF PROVIDING ONCOLOGICAL CARE TO MILITARY SERVICEMEN (EMPLOYEES)

P.Yu. Naumov, A.V. Dubinin, A.A. Utyuganov, R.V. Zelepukin

Abstract

Background. At the present stage in Russia, oncological care is provided by a coordinated system of state and municipal medical organizations, as well as a de-

partmental component of medical care. The main objectives of medical care in the oncological profile are prevention, diagnosis, treatment and rehabilitation of patients suffering from malignant neoplasms. The purpose of the study was to comprehensively understand the normative legal regulation of the provision of medical care to military personnel (employees) in the oncological profile and the problems of implementing the regulatory function in this area of social interaction.

Purpose. The work studies and substantiates the organizational foundations and problems of normative legal regulation of the provision of medical care to military personnel (employees) in the oncological profile, notes the social and humanistic significance of resolving the identified problems.

Materials and methods. From the point of view of a comparative legal approach, the authors use methods of comparison, analogy, generalization and synthesis, as well as methods of an integrated approach, which made it possible to study existing federal and departmental regulatory legal acts in comparison with problematic issues currently available in the field of regulation of medical care. assistance to military personnel (employees) in the oncological profile.

Results. The work examines the substantive basis of the normative legal regulation of the provision of medical care to military personnel (employees) in the oncological profile and problematic issues of such regulation. The relevance of the study is due to the constant increase in the number of cancer patients, among whom there are military personnel (employees) of the Russian Guard. Oncological diseases are accompanied by a high mortality rate of this pathology among patients. Improving the quality, completeness, accessibility and efficiency of providing medical care to cancer patients also requires improving the legal regulation of this area of activity.

Conclusion. Based on the conceptualization of the legal foundations and problematic aspects of providing medical care to military personnel (employees) on an oncological profile, the work proposes to consider issues of improving the organization of dispensary observation of military personnel (employees) in connection with malignant neoplasms, and also presents proposals for changing the list of insurance cases in relation to military personnel (employees).

Keywords: health care; primary health care; dispensary observation; medical support; diseases; malignant neoplasms; military medical examination; rehabilitation

For citation. Naumov, P. Yu., Dubinin, A. V., Utyuganov, A. A., & Zelepukin, R. V. (2025). Organizational and legal aspects and problems of regulation of providing oncological care to military servicemen (employees). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 397-423. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1445>

Введение

В России ежегодно растет число взрослых, страдающих онкологическими заболеваниями. Данная тенденция связана не только с ухудшением состояния здоровья населения, но и с совершенствованием профилактики, диагностики, лечения болезней такого профиля и организации диспансеризации взрослого населения и детей. Президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин в 2022 году обращал внимание Правительства страны на вопросы борьбы с онкологическими заболеваниями, обратив внимание на повышение доступности и эффективности лечения различных патологий.

Согласно исследованию «Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году», проведенному в Московском научно-исследовательском онкологическом институте имени П.А. Герцена – филиале «НМИЦ радиологии» Минздрава России, в 2022 году в России впервые было выявлено 624 835 случаев злокачественных новообразований, в том числе у мужчин более 283 тысяч и у женщин более 341 тысячи, что составляет 4,3% от общей численности населения за 2022 год. Прирост показателя по сравнению с 2021 годом составил 7,6%. Распространенность онкологий в 2022 году составила 2 758,3 случая на 100 тысяч населения, что выше уровня 2012 года (2 091,9) на 31,9% [8]. Стоит заметить, что от действий медицинского персонала, оказывающего доврачебную помощь, от качественно проведенной диспансеризации, внимательного сбора анамнеза зависит своевременное направление пациента к профильному специалисту, а это в свою очередь гарантирует положительный результат лечения. В 2022г за юридической и психологической помощью, правильной маршрутизацией онкопациента в межрегиональное общественное движение «Движение против рака» обратились более пяти тысяч пациентов, большая часть обращений (74%) связана с правовыми аспектами [37].

Печальная тенденция, когда онкобольной остается один на один со своей проблемой. Так, занимаясь поиском соблюдения своих прав, к сожалению, больной онкологией пациент вынужден, помимо прохождения жизненно необходимых процедур, тратить силы, время и энергию на поиск на сторонних интернет-ресурсах юридически подтвержденной информации о положенной ему медицинской помощи. Данная тенденция основана на отсутствии закрепленной в организации маршрутизации при обращении онкобольного пациента за первичной медицинской помощью по профилю заболевания. В связи с чем необходимо обязательно проводить мониторинг нормативно-правовой базы по онкологическому профилю [23];

24; 25; 29; 30]. Статистики по онкобольшим за 2023 год на момент подготовки статьи не имеется, при этом только за полгода на вышеназванный ресурс обратились уже более 3812 человек. С ростом обращений растут и затраты на медицинскую помощь, получаемую онкопациентами, так, в федеральный бюджет на 2024-2026 гг. заложены расходы на медицинскую помощь онкопациентам в размере более 430 миллиардов рублей [17; 38].

Учитывая распространенность заболевания и его прогрессивное развитие у заболевших, в частности у военнослужащих и сотрудников, одной из значимых государственных задач следует выделить оказание онкобольшим пациентам законодательно установленной медицинской помощи по различным видам и формам, а также предупреждению заболеваний и организации медицинского обеспечения. Естественно, оказание медицинской помощи онкобольшим военнослужащим и сотрудникам правоохранительных органов предъявляет всё новые требования к ее эффективной организации. не теряя актуальности рассматриваемой проблематики [11; 16].

На данный момент, помимо штатного состава военнослужащих Вооруженных Сил Российской Федерации, к личному составу военнослужащих относятся: военнослужащие войск национальной гвардии Российской Федерации (Росгвардии), ФСБ России, ФСО, МЧС России, военные добровольческие формирования Минобороны России, воинские подразделения новых субъектов и личный состав мобилизованных в различные органы в 2022 году [14].

Произведенные исследования и проанализированная статистика подтверждают наблюдающуюся тенденцию к росту числа онкологических заболеваний среди населения, включающих в себя также и злокачественные новообразования. Охватывая все сферы общества, онкологические заболевания распространяются также и на военнослужащих Вооруженных Сил и иных войск, воинские формирования и органы данного социального института. В настоящее время назрела необходимость произвести нормативно-правовое регулирование, актуализировав его в направлении оказания военнослужащим (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю [2; 3; 4] не могут не коснуться военнослужащих (сотрудников) как одной из социальных структур.

Система оказания онкологической помощи гражданам в Российской Федерации состоит из федерального и регионального, а также ведомственного компонента. В соответствии с Конституцией Российской Федерации в совместном ведении Российской Федерации и субъектов Российской Федерации находится координация вопросов здравоохранения, в том числе

обеспечение оказания доступной и качественной медицинской помощи, сохранение и укрепление общественного здоровья, создание условий для ведения здорового образа жизни, формирования культуры ответственного отношения граждан к своему здоровью [1; 13].

Органы местного самоуправления в соответствии с Федеральным законом от 21 ноября 2011 г. № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» обеспечивают в пределах своей компетенции организацию и доступность медицинской помощи. При этом региональные системы здравоохранения не оказывают военнослужащим помощи по онкологическому профилю, за исключением платной (договорной) основы в соответствии с заключенными государственными контрактами или договорами в порядке взаиморасчета между распорядителями бюджетных средств.

Заметим, что с 2019 года начал действовать федеральный проект «Борьба с онкологическими заболеваниями», включенный в национальный «Здравоохранение», целью которого является повышение доступности и качества медицинской помощи онкобольным пациентам, внедрение на практике усовершенствованных методов диагностики и лечения, открытие новых центров амбулаторной онкологической помощи. Всего с начала действия проекта, на конец 2022 года были открыты 479 Центров амбулаторной онкологической помощи (ЦАОП) в 81 субъекте страны. Проектом предполагается дальнейшее открытие еще 540 центров [39]. Согласно данному федеральному проекту в 2024 году будет завершено переоснащение медицинским оборудованием более чем 160 организаций.

Рассмотрим ведомственную структуру оказания онкологической помощи. Она организуется в соответствующих амбулаторно-поликлинических и госпитальных медицинских организациях Минобороны Росгвардии, ФСБ России, ФСО России, МЧС России, а также медицинских подразделениях (батальонах, ротах, медицинских пунктах, госпитальных судах). Для Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации большим достижением следует считать создание на базе Главного военного клинического госпиталя войск национальной гвардии Российской Федерации (город Балашиха) в 2019 году онкологического отделения противоопухолевой лекарственной терапии. Благодаря этому стало возможным проводить мероприятия по осуществлению непосредственно в организации современной специализированной медицинской помощи по онкологическому профилю. Онкологическое отделение госпиталя успешно функционирует и в настоящее время, позволяя оказывать медицинскую помощь военнослужащим с новообразованиями различной локализации [40].

Таким образом, основной задачей исследования явилось последовательное изучение и выявление реальных характеристик организационно-правовых основ и проблемных аспектов нормативного правового регулирования оказания военным (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю.

Материалы и методы

Для обоснования характеристик, сущности и структуры организационно-правовых основ и проблемных аспектов нормативного правового регулирования оказания военным (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю авторами применен сравнительно-правовой подход и входящие в его структуру методы сравнения, аналогии, обобщения и синтезирования, системный подход, для применения которого характерно использование структурного, функционального, генетического и иных видов анализа и синтеза, а также обобщения и движения от абстрактного к конкретному. Внедрение в познавательные операции приемов комплексного подхода позволило оценить законодательство различного уровня в единстве с иными нормами, регулирующими оказание военным (сотрудникам) медицинской помощи.

Научно-информационной, теоретико-методологической и практической основой проведения настоящего исследования выступили научные практические и теоретические исследования, анализ статистических данных по онкологическому профилю, а также разработки ведущих авторов в области медицинского права и правового регулирования медицинской деятельности [1-4; 18; 28-31]. Исследуемое явление в области оказания военным (сотрудникам) медицинской помощи, позволяет глубже рассмотреть организацию медицинского обеспечения, процесс проведения медико-психологической реабилитации, судебно-медицинской, военно-врачебной и врачебно-летней экспертизы.

Основная часть

Анализируя причины роста числа онкопациентов, исследователи этого вопроса связывают образующуюся тенденцию с совершенствованием доврачебной помощи, оптимизацией диагностики и учета, неуклонным ростом сопутствующих хронических заболеваний у лиц, находящихся в группе риска. [26; 32; 33]. Сегодня диагностические возможности позволяют выявлять онкологические заболевания на ранних стадиях. В период пандемии коронавирусной инфекции создалось ложное впечатление о

положительной тенденции, основанной на снижении числа заболевших, но это связано лишь с отсутствием необходимых исследований в указанный период.

Ежегодный прирост больных с впервые установленным диагнозом злокачественного новообразования также растет [20; 21; 22]. На это влияет ранняя диагностика, выявленная в ходе диспансеризации или профессиональных осмотров врачами первого звена, направившими пациента на первичную консультацию к онкологу, за что им полагается денежное поощрение.

В то же время многие ученые придерживаются другой точки зрения, рассматривая основополагающей причиной бытовые факторы, ухудшение экологического состояния в регионах, отводя улучшению в диагностике и совершенствованию учета лишь второстепенное значение [35].

Обратившись к статистическим данным, напомним, что 20 лет назад в нашей стране более половины впервые выявленных злокачественных новообразований диагностировали на поздних стадиях заболевания, когда лечение становилось уже малоэффективным или вовсе безрезультатным [36].

Несомненно, позднее выявление заболевания является одной из главных проблем в эффективности проводимого медицинского лечения. Так, выявление онкологического процесса на поздних стадиях заболевания имеет прямое влияние на результативность проводимых терапевтических мероприятий, размер материальных затрат на оказываемую медицинскую помощь и лекарственное сопровождение течения заболеваний, уровень выживаемости в течение одного и пяти лет с момента диагностики онкозаболевания, поддерживающую терапию, определяющую качество жизни онкопациентов. В последние 10 лет отмечается тенденция к снижению показателя смертности в первый год диагностики заболевания. По последним данным уровень летальности онкологических больных составляет 24,8%, в то время как в 2013 г. этот уровень был 25,3%, а в 1999 г. и вовсе 36,2% [34].

Синкретической, нормативной правовой и информационной основой оказания военнослужащим (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю выступают предписания статьи 41 Конституции Российской Федерации, положения статей 16, 26 Федерального закона от 27 мая 1998 г. № 76-ФЗ «О статусе военнослужащих», статьи 17.1 Федерального закона от 31 мая 1996 г. № 61-ФЗ «Об обороне», статьи 25 Федерального закона от 21 ноября 2013 г. № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации», статьи 28 Федерального закона от 3 июля 2016 г. № 226-ФЗ «О войсках национальной гвардии Российской Федерации», статьи 11 Федерального закона от 19 июля 2011 г. №

247-ФЗ «О социальных гарантиях сотрудникам органов внутренних дел Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», нормы постановлений Правительства Российской Федерации от 26 сентября 1994 г. № 1093 «О порядке возмещения расходов, связанных с оказанием медицинской помощи, санаторно-курортным лечением и отдыхом военнослужащих ...» (в отношении военнослужащих), от 31 декабря 2004 г. № 911 «О порядке оказания медицинской помощи, санаторно-курортного обеспечения и осуществления отдельных выплат некоторым категориям военнослужащих, сотрудников правоохранительных органов и членам их семей, а также отдельным категориям граждан, уволенных с военной службы», от 15 декабря 2018 г. № 1563 «О порядке оказания сотрудникам органов внутренних дел Российской Федерации, отдельным категориям граждан Российской Федерации, уволенных со службы в органах внутренних дел, органах по контролю за оборотом наркотических средств и психотропных веществ, членам их семей и лицам, находящимся на их иждивении, медицинской помощи и обеспечения их санаторно-курортным лечением», от 24 апреля 2019 г. № 491 «О порядке медицинского обеспечения сотрудников, имеющих специальные звания и проходящих службу в учреждениях и органах уголовно-исполнительной системы Российской Федерации, таможенных органах Российской Федерации и федеральной противопожарной службе Государственной противопожарной службы, отдельных категорий граждан Российской Федерации, уволенных со службы в указанных учреждениях и органах, федеральной противопожарной службе Государственной противопожарной службы, членов их семей и лиц, находящихся на их иждивении, в медицинских организациях уголовно-исполнительной системы Российской Федерации, Федеральной таможенной службы, Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий или Министерства внутренних дел Российской Федерации» [9].

Системообразующей нормативной основой в отношении оказания гражданам медицинской помощи по онкологическому профилю является часть 1 статьи 43 Федерального закона от 21 ноября 2011 г. № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации», согласно которой гражданам, страдающим социально значимыми заболеваниями, и гражданам, страдающим заболеваниями, представляющими опасность для окружающих, оказывается медицинская помощь и обеспечивается диспансерное наблюдение в соответствующих медицинских организациях.

В соответствии с пунктом 6 Перечня социально-значимых заболеваний, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2004 г. № 715 злокачественные новообразования (код заболеваний по МКБ-10 С 00-С 97) включены в перечень социально-значимых заболеваний, что дает право пациентам, страдающим ими на получение медицинской помощи и постановку на диспансерный учет в соответствующих (профильных) медицинских учреждениях, в том числе федерального уровня и созданных в каждом регионе (онкологические центры) [6]. Военнослужащим эта помощь, оказывается по территориальному принципу.

При отсутствии по месту военной службы или месту жительства ведомственных медицинских организаций и (или) при отсутствии в них отделений соответствующего профиля, специалистов или специального медицинского оборудования, а также в экстренных или неотложных случаях медицинская помощь военнослужащим оказывается в медицинских организациях государственной и муниципальной систем здравоохранения в порядке, установленном постановлением Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2004 г. № 911 «О порядке оказания медицинской помощи, возмещения расходов на ее оказание, проведение медицинских осмотров, диспансеризации, санаторно-курортного обеспечения и осуществления отдельных выплат некоторым категориям военнослужащих, сотрудников правоохранительных органов и членам их семей, а также отдельным категориям граждан, уволенных с военной службы».

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2004 г. № 911 расходы медицинских организаций по оказанию медицинской помощи военнослужащим возмещаются указанным медицинским организациям на основании договоров.

Стоит заметить, что продолжает действовать и другой нормативно-правовой акт – постановление Правительства Российской Федерации от 26 сентября 1994 г. № 1093 «О порядке возмещения расходов, связанных с оказанием медицинской помощи, санаторно-курортным лечением и отдыхом военнослужащих и граждан, уволенных с военной службы, санаторно-курортным лечением членов их семей, а также медико-психологической реабилитацией военнослужащих».

Также медицинская помощь на договорной основе может быть оказана на основании заключенных государственных контрактов в соответствии с Федеральным законом от 5 апреля 2013 г. № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд».

Важным элементом функционирования системы оказания военнослужащим (сотрудникам) медицинской помощи по онкологическому профилю является организация лекарственного обеспечения лечения названных заболеваний. В целях повышения социальной защищенности военнослужащих и граждан, призванных на военные сборы постановлением Правительства России от 27 марта 2015 № 282 «Об утверждении Правил обеспечения военнослужащих и граждан, призванных на военные сборы, лекарственными препаратами для медицинского применения, медицинскими изделиями в фармацевтических организациях при отсутствии по месту военной службы или месту жительства военнослужащих либо по месту прохождения военных сборов гражданами, призванными на военные сборы, медицинских, военно-медицинских подразделений, частей и организаций федеральных органов исполнительной власти, в которых федеральным законом предусмотрена военная служба», устанавливают порядок бесплатного обеспечения военнослужащих лекарственными препаратами и медицинскими изделиями в фармацевтических организациях при отсутствии по месту военной службы или месту жительства военнослужащих военно-медицинских организаций.

Бесплатный отпуск лекарственных препаратов и медицинских изделий военнослужащим при амбулаторном лечении осуществляется фармацевтическими организациями по рецептам, выданным врачами медицинских организаций.

Отпуск лекарств военнослужащим (сотрудникам) для медицинского применения регулируется также Порядком отпуска лекарственных препаратов, утвержденным приказом Минздрава России от 11 июля 2017 г. № 403н «Об утверждении правил отпуска лекарственных препаратов для медицинского применения, в том числе иммунобиологических лекарственных препаратов, аптечными организациями, индивидуальными предпринимателями, имеющими лицензию на фармацевтическую деятельность».

Следует обратить внимание на правовое регулирование применения таблетированных противоопухолевых препаратов, есть проблема в использовании таких препаратов амбулаторно в рамках обязательного медицинского страхования.

Пациентам, страдающим онкологическими заболеваниями, оказываются в основном первичная медико-санитарная, скорая, специализированная или высокотехнологичная медицинская помощь [15].

Учитывая агрессивность развития онкологических заболеваний, при обнаружении у пациентов онкологии на последних стадиях для облегче-

ния страданий пациенту оказывается паллиативная медицинская помощь, но на данный момент у нас в стране нет закреплённого понятия выражения «стоимость года сохранённой жизни».

Заметим, что у военно-медицинских (ведомственных) организаций, оказывающих паллиативную медицинскую помощь, как правило, отсутствует лицензия на осуществление такого вида работ, в связи с чем возникают вопросы при маршрутизации таких пациентов в медицинские организации муниципальной или государственной системы здравоохранения. В этой связи стоит отметить, что План мероприятий («дорожная карта») «Повышение качества и доступности паллиативной медицинской помощи» до 2024 года, утвержденный Правительством России 28 июля 2020 г. № 6551п-П12, который преследует задачи совершенствования нормативно-правового регулирования и гармонизации нормативных правовых актов Российской Федерации и субъектов Российской Федерации, регулирующих организацию оказания паллиативной медицинской помощи, включая порядок взаимодействия медицинских организаций, организаций социального обслуживания и общественных объединений, иных некоммерческих организаций, осуществляющих свою деятельность в сфере охраны здоровья, не содержит в себе указаний о взаимодействии с военно-медицинскими организациями Вооруженных Сил, иных войск воинских формирований и органов.

Действующее в настоящее время «Методические рекомендации по организации паллиативной помощи», утвержденные Минздравсоцразвития России 22 сентября 2008 г. № 7180-РХ), в которых нашли свое отражение многие вопросы оказания паллиативной медицинской помощи (в том числе и онкологическим больным) таких норм также не содержат.

В 2018 году всех, кто проходил военную службу (службу) в Минобороны России, войсках национальной гвардии, МВД, МЧС, ФСБ, ФСИН, ФСО, ФТС, СВР, ГФС и Главном управлении специальных программ, обязали (при их наличии) сдать медицинские полисы для приостановки их действий, в соответствии с Федеральным законом от 29 июля 2018 года № 268-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившим силу абзаца одиннадцатого части второй статьи 16 Федерального закона «Об индивидуальном (персонифицированном) учете в системе обязательного пенсионного страхования». Этот закон направлен на исключение медицинского страхования граждан, которым названный полис для получения бесплатной медицинской помощи не требуется, а именно военнослужащих и приравненных к

ним в оказании медицинской помощи категории граждан: военнослужащих и сотрудников войск национальной гвардии, сотрудников Министерства внутренних дел Российской Федерации, Федеральной таможенной службы, МЧС России, Федеральной службы исполнения наказаний и других силовых ведомств, расходы на лечение которых обеспечиваются из федерального бюджета. В течение месяца с начала работы военнослужащие и имеющие специальное звание сотрудники перечисленных ведомств должны были сдать ставший недействительным полис обязательного медицинского страхования в страховые организации или территориальному фонду обязательного медицинского страхования.

В соответствии с разделом II приложения № 1 к Программе государственных гарантий бесплатного оказания гражданам медицинской помощи на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2023 г. № 2353 за счет федерального бюджета (в том числе при отсутствии полиса обязательного медицинского страхования) военнослужащим и сотрудникам может быть оказана высокотехнологичная медицинская помощь, организуемая в соответствии с приказом Минздрава России от 2 декабря 2014 г. № 796н «Об утверждении Положения об организации оказания специализированной, в том числе высокотехнологичной, медицинской помощи» и приказом Минздрава России от 2 октября 2019 г. № 824н «Об утверждении Порядка организации оказания высокотехнологичной медицинской помощи с применением единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения». Военнослужащим и сотрудникам в рамках названных документов высокотехнологичная медицинская помощь может быть оказана федеральными медицинскими организациями на основании рекомендаций врачебной комиссии по талонам, выделяемым региональным органом в области здравоохранения по месту прохождения военной службы (службы).

Известно, что медицинская помощь по видам, условиям, формам и профилям оказывается на основании порядков, стандартов и с учетом клинических рекомендаций. Рассмотрим их подробнее. Касаемо оказания медицинской помощи при онкологических заболеваниях следует отметить, что основным нормативным правовым актом в этой области является приказ Минздрава России от 19 февраля 2021 г. № 116н «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи взрослому населению при онкологических заболеваниях».

Онколог в своей повседневной работе руководствуется клиническими рекомендациями Ассоциации онкологов, которым ранее не уделялось

должного внимания. Благодаря юридически значимым изменениям в законодательстве, с правовой точки зрения, на сегодня это одна из основ для оказания медицинской помощи.

При этом имеют место расхождения между клиническими рекомендациями, стандартами и основами норм по обязательному медицинскому страхованию, а также финансовая несостоятельность региональной системы здравоохранения, в которых повышенное количество больных онкологией, из-за чего снижается эффективность оказания медицинской помощи в соответствии с клиническими рекомендациями, ввиду ее несостоятельности, но это уже выходит за рамки правового поля.

Наполнение стандартов по онкопрофилю требует дополнений, также существует неоднозначность трактовок указанных в клинических рекомендациях, т.к. они составлялись не только врачами-онкологами.

Пунктом 12 Порядка оказания медицинской помощи при онкологических заболеваниях диагноз онкологического заболевания устанавливается врачом-специалистом на основе результатов диагностических исследований, включающих, в том числе проведение цитологической и (или) гистологической верификации диагноза, за исключением случаев, когда взятие биопсийного и (или) пункционного материала не представляется возможным.

Названный Порядок также устанавливает проведение для определения тактики обследования и лечения рекомендует врачу-онкологу организовывать врачебные консультации и консилиумы врачей, в том числе с использованием телемедицинских технологий. При изменении метода лечения проведение онкологического консилиума обязательно.

Проблемным вопросом организации оказания медицинской помощи военнослужащим (сотрудникам) при онкологических заболеваниях является то, что приказ Минздрава России от 4 июня 2020 г. № 548н «Об утверждении порядка диспансерного наблюдения за взрослыми с онкологическими заболеваниями» не распространяется на исследуемую категорию граждан, при этом отдельного порядка диспансерного наблюдения в отношении военнослужащих (сотрудников) не принято.

При наличии онкологических заболеваний, которые успели существенно повлиять на общее состояние здоровья, военнослужащий (сотрудник) может быть освидетельствован для решения вопроса о дальнейшем прохождении военной и иной службы [18; 19; 27; 28]. Постановлением Правительства России 4 июля 2013 г. № 565 «Об утверждении Положения о военно-врачебной экспертизе» регулируется порядок проведения медицинского обследования и освидетельствования военнослужащих (со-

трудников) в рамках проведения военно-врачебной экспертизы в целях определения категории годности к военной службе (службе), определения причинной связи увечий (заболеваний) и решения иных вопросов [5]. Так, военнослужащие, проходящие военную службу по призыву, после хирургического лечения, цитостатической, лучевой терапии или комбинированного лечения освидетельствуются по пункту «а» или «б» в зависимости от результатов лечения и распространения злокачественного процесса. Злокачественным новообразованиям полностью или частично посвящены статьи 8, 9 и 70 Расписания болезней, которое является приложением к Положению о военно-врачебной экспертизе [10; 12].

Военнослужащим, проходящим военную службу по контракту и освидетельствуемым в связи с предстоящим увольнением с военной службы по достижении предельного возраста и по организационно-штатным мероприятиям, заключение выносится по пункту «а» независимо от локализации, стадии и распространенности злокачественного процесса, а также времени начала заболевания.

Основания для увольнения военнослужащего по состоянию здоровья установлены Федеральным законом от 28 марта 1998 г. № 53-ФЗ «О воинской обязанности и военной службе». Они указаны в статье 51 названного закона в качестве самостоятельных оснований: так военнослужащий подлежит увольнению с военной службы по подпункту «в» пункта 1 – в связи с признанием военно-врачебной комиссией не годным к военной службе; подпункту «г» пункта 1 – в связи с признанием военно-врачебной комиссией ограниченно годным к военной службе военнослужащего, проходящего военную службу по контракту на воинской должности ниже прапорщика; подпункту «б» пункта 3 – по инициативе (волеизъявлению) военнослужащего (офицера, прапорщика (мичмана)).

Аналогичные могут быть уволены и сотрудники, проходящие федеральную государственную службу иных видов на основании норм о регулировании соответствующего вида федеральной государственной службы.

Заключение

Проблема онкологических заболеваний не теряет своей актуальности в связи с высоким распространением и тенденцией к «молодости» заболеваний, оставаясь приоритетной для современного общества. Исследования, проводимые по заболеваниям онкологического профиля, рассматриваются общественностью как одни из наиболее важных проблем современного мира. Проанализировав статистические данные, полученные независимо

ми источниками в России и странах мира, отражающие уровень летальности на годовом и пятилетнем периоде с момента первичной диагностики заболевания, приходим к выводу, что главными факторами снижения летального исхода является скрининг и ранняя диагностика заболевания, налаженная система доврачебной помощи, выявляющая симптомы заболевания еще до похода к профильному врачу, своевременное лечение, прямо влияющее на его эффективность.

Во многих высокоразвитых странах созданы специальные медицинские организации, занимающиеся разработкой и организацией скрининговых исследований, на основе которых проводится анализ проведенных исследований и статистика заболеваний во временном выражении. Скрининг как способ доклинической диагностики рака обуславливает экономическую целесообразность развития скрининговых программ [7; 8].

Также актуальным вопросом для организации и осуществления медицинской помощи военнослужащим (сотрудникам) страдающим онкологическими заболеваниями является лечение и диспансерное наблюдение в соответствующих профильных медицинских организациях, оказывающих медицинскую помощь пациентам со злокачественными новообразованиями. Для этого возможно предусмотреть механизм прикрепления таких военнослужащих (сотрудников) к названным центрам путем направления списков в соответствующий онкологический диспансер (центр), который имеется в регионе со стороны военных округов, территориальных органов и воинских частей. Соответствующие положения должны быть закреплены в правилах оказания военнослужащим медицинской помощи, а также нормативных правовых актах Минздрава России и силовых ведомств. В этом контексте предлагается установить основания, порядок и условия распространения на военнослужащих норм оказания медицинской помощи взрослому населению при онкологических заболеваниях, установленных Минздравом России, и их включение в порядок маршрутизации онкобольных, принимаемых на уровне субъектов РФ. Разрешение этого направления позволит обеспечить взаимосвязь между законодательными и ведомственными актами, определяющими порядок оказания различных видов медицинской помощи военнослужащим по профилю «онкология» [31].

Поскольку злокачественные новообразования относятся к социально-значимым заболеваниям, учитывая высокий уровень смертности населения и снижение продолжительности жизни заболевших, а также увеличения количества пациентов с данной нозологией федеральному законодателю следует рассмотреть вопрос о внесении заболеваний он-

кологического профиля в перечень страховых случаев, предусмотренных статьей 4 Федерального закона от 28 марта 1998 г. № 52-ФЗ «Об обязательном государственном страховании жизни и здоровья военнослужащих, граждан, призванных на военные сборы, лиц рядового и начальствующего состава органов внутренних дел Российской Федерации, Государственной противопожарной службы, сотрудников учреждений и органов уголовно-исполнительной системы, сотрудников войск национальной гвардии Российской Федерации, сотрудников органов принудительного исполнения Российской Федерации». В настоящее время возникновение злокачественных новообразований к страховым случаям не относится, однако, включение их в такой перечень позволит существенно увеличить объем социальных гарантий военнослужащему (сотруднику) в силу социальной значимости вопросов, связанных с профилактикой и лечением заболеваний онкологического профиля. Следует рассмотреть вопрос и направления военнослужащих (сотрудников) при возникновении у них онкологических заболеваний на медико-психологическую реабилитацию, поскольку установление подобного диагноза влияет не только на общее состояние здоровья, но и на психологическое состояние личного состава.

Список литературы

1. Большакова, В. М., Холиков, И. В., Наумов, П. Ю. (2022). Медицинское обеспечение судебной системы Российской Федерации. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(1), 103-127. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-1-103-127>. EDN: <https://elibrary.ru/fxanco>
2. Бухтияров, И. В., Холиков, И. В., Большакова, В. М., Наумов, П. Ю. (2023). Опыт концептуализации военных аспектов медицинского права (обсуждение главы 14 учебника «Медицинское право России»). *Медицина труда и промышленная экология*, 63(1), 67-73. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-1-67-73>. EDN: <https://elibrary.ru/fwiguf>
3. Гаврилов, С. О., Глебов, И. Н., Чукин, С. Г. и др. (2022). Право в точке бифуркации: обсуждение концептуального исследования военных проблем международного права. *Государство и право*, (12), 59-67. <https://doi.org/10.31857/S102694520023301-2>. EDN: <https://elibrary.ru/xhovfe>
4. Гайдамашко, И. В., Наумов, П. Ю., Дьячков, А. А. (2023). Потенциал монографии «Военное право» в обучении будущего военного юриста и развитии его личности. *Государство и право*, (5), 68-79. <https://doi.org/10.31857/S102694520025198-8>. EDN: <https://elibrary.ru/rciftx>

5. Ганишев, А. В., Коньков, А. В. (2015). Методологические аспекты военно-врачебной экспертизы в органах внутренних дел Российской Федерации. *Медицинский вестник МВД*, (3), 8-14. EDN: <https://elibrary.ru/trlmaf>
6. Глушаченко, С. Б., Зелепукин, Р. В. (2023). Военно-правовые знания для будущих работников сферы транспорта (рецензия на трёхтомную монографию «Военное право»). *Мир транспорта*, 21(1), 134-137. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-21-1-16>. EDN: <https://elibrary.ru/wilxld>
7. Голивец, Т. П., Коваленко, Б. С. (2015). Анализ мировых и российских тенденций онкологической заболеваемости в XXI веке. *Научный результат. Серия Медицина и фармация*, 1(4), 125-131. <https://doi.org/10.18413/2313-8955-2015-1-4-125-131>. EDN: <https://elibrary.ru/vofhgb>
8. Каприн, А. Д., Старинский, В. В., Шахзадова, А. О. (ред.) (2022). Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году. МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 239 с.
9. Мохов, А. А. (2017). Медицинское право России как учебная дисциплина в системе подготовки юристов. *Юридическое образование и наука*, (5), 3-7. <https://doi.org/10.18572/1813-1190-2017-5-3-7>. EDN: <https://elibrary.ru/yrqdsb>
10. Наумов, П. Ю., Большакова, В. М., Землин, А. И., Холиков, И. В. (2021). Концептуальные аспекты производства медицинских экспертиз при обжаловании в судебном порядке заключений по итогам проведения военно-врачебной экспертизы. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(6), 283-306. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-6-283-306>. EDN: <https://elibrary.ru/jyszqr>
11. Наумов, П. Ю., Землин, А. И., Утюганов, А. А. (2022). Актуальные вопросы трансформации норм права о заболеваниях, представляющих опасность для окружающих. *Актуальные проблемы государства и права*, 6(4), 532-539. <https://doi.org/10.20310/2587-9340-2022-6-4-532-539>. EDN: <https://elibrary.ru/mczixo>
12. Наумов, П. Ю., Холиков, И. В. (2023). Характеристика правовых основ проведения военно-врачебной экспертизы в войсках национальной гвардии Российской Федерации. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(1), 474-493. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-1-474-493>. EDN: <https://elibrary.ru/qiglaf>
13. Наумов, П. Ю., Баранова, Н. Н., Холиков, И. В., Купцов, С. А. (2023). Комплексное исследование правовых основ и проблемных вопросов оказания первой помощи военнослужащим (военнослужащими). *Медицина катастроф*, (3), 57-64. <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2023-3-57-64>. EDN: <https://elibrary.ru/lqloac>

14. Наумов, П. Ю. (2023). Социальные функции частных военных компаний в условиях трансформации современного миропорядка. *Пути к миру и безопасности*, (2), 207-218. <https://doi.org/10.20542/2307-1494-2023-2-207-218>. EDN: <https://elibrary.ru/gytvqq>
15. Наумов, П. Ю., Шепель, Р. Н., Холиков, И. В. (2023). Оказание военнoслужащим первичной медико-санитарной помощи: правовое регулирование и проблемные аспекты. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 22(S9), 46-56. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3885>. EDN: <https://elibrary.ru/dsonxg>
16. Наумов, П. Ю., Захарцев, С. И., Холиков, И. В., Большакова, В. М. (2023). Ценность права и правовые ценности в глобализующемся мире (Аксиологический обзор книги «Государство и право: права человека и мировой порядок, основанный на верховенстве права»). *Государство и право*, (9), 64-72. <https://doi.org/10.31857/S102694520024304-5>. EDN: <https://elibrary.ru/xeaqeb>
17. Наумова, Л. Ю., Наумов, П. Ю., Пятилышнова, О. М., Гибизов, А. С. (2019). Особенности правового регулирования возмещения расходов за оказание услуг военнoслужащим войск национальной гвардии Российской Федерации высокотехнологичной медицинской помощи. *Право в Вооруженных Силах - Военно-правовое обозрение*, (10), 77-82. EDN: <https://elibrary.ru/edkcwk>
18. Николаев, К. Н., Зубрицкий, В. Ф., Колтович, А. П. и др. (2018). Профилактика венозных тромбоэмболических осложнений при боевой огнестрельной травме. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*, (9), 82-86. <https://doi.org/10.17116/hirurgia2018090182>. EDN: <https://elibrary.ru/ylruix>
19. Новиков, Н. С., Наумов, П. Ю., Утюганов, А. А. (2022). Физическое и психическое здоровье военнoслужащих как социально-правовая ценность. *Актуальные проблемы государства и права*, 6(3), 450-458. <https://doi.org/10.20310/2587-9340-2022-6-3-450-458>. EDN: <https://elibrary.ru/nbecsk>
20. Огнерубов, Н. А. (2015). Клиническое значение биологических вариантов рака молочной железы. *Молекулярная медицина*, (2), 31-35. EDN: <https://elibrary.ru/tppedn>
21. Огнерубов, Н. А., Огнерубова, И. Н. (2017). Злокачественный приапизм. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*, 22(1), 171-174. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2017-22-1-171-174>. EDN: <https://elibrary.ru/ygsiwl>
22. Огнерубов, Н. А., Ежова, Е. Н. (2022). Соматические мутации при колоректальном раке: опыт региона. *Consilium Medicum*, 24(5), 291-296. <https://doi.org/10.26442/20751753.2022.5.201796>. EDN: <https://elibrary.ru/eggimo>

23. Огнерубов, Н. А., Зелепукин, Р. В., Поддубная, И. В. (2022). Риск дискриминации российских граждан при оказании медицинской помощи за рубежом как тенденция сферы здравоохранения. *Современная онкология*, 24(2), 260-263. <https://doi.org/10.26442/18151434.2022.2.201706>. EDN: <https://elibrary.ru/fjkeor>
24. Огнерубов, Н. А., Зелепукин, Р. В. (2021). Организация оказания медицинской помощи по профилю «онкология» пациентам за пределами территорий их страхования в условиях изменения нормативной регламентации. *Consilium Medicum*, 23(12), 986-990. <https://doi.org/10.26442/20751753.2021.12.201269>. EDN: <https://elibrary.ru/sagxfr>
25. Огнерубов, Н. А. (2024). Эффективность сопроводительной терапии адеметионином при проведении противоопухолевой лекарственной терапии. *Consilium Medicum*, 26(6), 351-361. <https://doi.org/10.26442/20751753.2024.6.202857>. EDN: <https://elibrary.ru/ydygzu>
26. Поляков, В. Г., Мень, Т. Х. (2008). Заболеваемость злокачественными новообразованиями детей России в 1990-2005 гг. *Российский онкологический журнал*, (2), 30-33. EDN: <https://elibrary.ru/jscmw6>
27. Савенков, А. Н., Кудашкин, А. В. (2021). Военное право: постановка проблемы и пути решения. *Государство и право*, (4), 7-34. <https://doi.org/10.31857/S102694520014362-9>. EDN: <https://elibrary.ru/pyjjql>
28. Сергеев, Ю. Д., Милушин, М. И. (2003). О теоретических основах и концепции национального медицинского права. *Юридическое образование и наука*, (4), 29-34. EDN: <https://elibrary.ru/opprnp>
29. Холиков, И. В., Милованович, А., Наумов, П. Ю. (2022). Динамика функционирования международного права в условиях трансформации современного миропорядка: постнеклассический подход. *Журнал российского права*, 26(11), 132-148. <https://doi.org/10.12737/jrl.2022.122>. EDN: <https://elibrary.ru/abblm>
30. Холиков, И. В., Наумов, П. Ю., Большакова, В. М. и др. (2022). Федеральный государственный контроль (надзор) за соблюдением законодательства в области обеспечения безопасности объектов топливно-энергетического комплекса: новый этап регулирования и правоприменения. *Уголь*, (10), 66-71. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022106671>. EDN: <https://elibrary.ru/lcnqt>
31. Холиков, И. В., Большакова, В. М., Наумов, П. Ю., Зелепукин, Р. В. (2022). Ценности и смыслы главного судебного акта XX века: аксиологические концепты книги А.Н. Савенкова «Нюрнберг: Приговор во имя Мира» (Материалы дискуссии). *Государство и право*, (10), 51-62. <https://doi.org/10.31857/S1026945200217887>. EDN: <https://elibrary.ru/imtjuc>

32. Чиссов, В. И., Старинский, В. В., Александрова, Л. М. и др. (2006). Отраслевая программа «Разработка высокотехнологичных методик профилактики, диагностики и лечения, повышающих эффективность медико-социальной реабилитации и качество жизни онкологических больных» и основные итоги ее выполнения в 2001-2005 гг. *Российский онкологический журнал*, (4), 38-40. EDN: <https://elibrary.ru/hvuwzj>
33. Государственный доклад о состоянии здоровья населения Российской Федерации в 1999 году. М.: Минздрав России, РАМН, 2000. 103 с.
34. Канцерогенез: руководство / Под ред. Д.Г. Заридзе. М.: Медицина, 2004. 574 с.
35. Онкология: учебник для студентов медицинских вузов / Под ред. В.И. Чиссова, С.Л. Дарьяловой. М.: ГЭОТАР-МЕДИА, 2007. 559 с. ISBN: 978-5-9704-0454-6
36. Статистика злокачественных новообразований в России и странах СНГ в 2004 г. / Под ред. М.И. Давыдова, Е.М. Аксель. *Вестник Российского онкологического научного центра им. Н.Н. Блохина РАМН*, 2006. Т. 17, № 3, прил. 1. С. 5-132.
37. Межрегиональное общественное движение «Движение против рака» - работа с обращениями пациентов и их близких: официальный сайт. URL: http://www.rakpobedim.ru/fileadmin/user_upload/pdf/dpr-results-of-year-2022.pdf (дата обращения: 01.02.2024).
38. Минфин России: официальный сайт. URL: https://minfin.gov.ru/ru/press-center/?id_4=38680-na_pomoshch_onkobolnym_v_byudzhete_zalozheno_bole_430_mlrd_rublei (дата обращения: 12.01.2024).
39. Министерство здравоохранения Российской Федерации: официальный сайт. URL: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdravoohranenie/onko> (дата обращения: 22.02.2024).
40. Федеральная служба войск национальной гвардии Российской Федерации: официальный сайт. URL: <https://rosguard.gov.ru/ru/page/index/medicinskie-organizacii> (дата обращения: 07.03.2024).

References

1. Bolshakova, V. M., Kholikov, I. V., Naumov, P. Yu. (2022). Medical support of the judicial system of the Russian Federation. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(1), 103-127. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-1-103-127> EDN: <https://elibrary.ru/fxanco>
2. Bukhtiyarov, I. V., Kholikov, I. V., Bolshakova, V. M., Naumov, P. Yu. (2023). Experience in conceptualizing military aspects of medical law (discussion of

- Chapter 14 of the textbook «Medical Law of Russia»). *Medicine of Labor and Industrial Ecology*, 63(1), 67-73. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-1-67-73> EDN: <https://elibrary.ru/fwiguf>
3. Gavrilov, S. O., Glebov, I. N., Chukin, S. G., et al. (2022). Law at the bifurcation point: discussion of a conceptual study of military problems of international law. *State and Law*, (12), 59-67. <https://doi.org/10.31857/S102694520023301-2> EDN: <https://elibrary.ru/xhovfe>
 4. Gaidamashko, I. V., Naumov, P. Yu., Dyachkov, A. A. (2023). Potential of the monograph «Military Law» in training future military lawyers and developing their personality. *State and Law*, (5), 68-79. <https://doi.org/10.31857/S102694520025198-8> EDN: <https://elibrary.ru/rciftx>
 5. Ganishev, A. V., Konkov, A. V. (2015). Methodological aspects of military medical examination in the internal affairs bodies of the Russian Federation. *Medical Bulletin of the Ministry of Internal Affairs*, (3), 8-14. EDN: <https://elibrary.ru/trlmaf>
 6. Glushachenko, S. B., Zelepukin, R. V. (2023). Military legal knowledge for future transport workers (review of the three-volume monograph «Military Law»). *World of Transport*, 21(1), 134-137. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-21-1-16> EDN: <https://elibrary.ru/wilxld>
 7. Golivets, T. P., Kovalenko, B. S. (2015). Analysis of global and Russian trends in oncological morbidity in the 21st century. *Research Result. Series Medicine and Pharmacy*, 1(4), 125-131. <https://doi.org/10.18413/2313-8955-2015-1-4-125-131> EDN: <https://elibrary.ru/vofhgb>
 8. Kaprin, A. D., Starinskiy, V. V., Shakhzadova, A. O. (Eds.) (2022). State of oncological care for the population of Russia in 2022. P.A. Herzen Moscow Research Institute of Oncology — branch of the National Medical Research Center of Radiology of the Ministry of Health of Russia, 239 p.
 9. Mokhov, A. A. (2017). Medical law of Russia as an academic discipline in the system of legal training. *Legal Education and Science*, (5), 3-7. <https://doi.org/10.18572/1813-1190-2017-5-3-7> EDN: <https://elibrary.ru/yrqdsb>
 10. Naumov, P. Yu., Bolshakova, V. M., Zemlin, A. I., & Kholikov, I. V. (2021). Conceptual aspects of medical examination production when appealing against military medical examination conclusions in court. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(6), 283-306. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-6-283-306> EDN: <https://elibrary.ru/jyszqr>
 11. Naumov, P. Yu., Zemlin, A. I., & Utyuganov, A. A. (2022). Current issues of transforming legal norms on diseases posing a danger to others. *Actual*

- Problems of State and Law*, 6(4), 532-539. <https://doi.org/10.20310/2587-9340-2022-6-4-532-539> EDN: <https://elibrary.ru/mczixo>
12. Naumov, P. Yu., & Kholikov, I. V. (2023). Characteristics of legal foundations for conducting military medical examinations in the National Guard troops of the Russian Federation. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(1), 474-493. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-1-474-493> EDN: <https://elibrary.ru/qiglaf>
13. Naumov, P. Yu., Baranova, N. N., Kholikov, I. V., & Kuptsov, S. A. (2023). Comprehensive study of legal foundations and problematic issues of providing first aid to military personnel (by military personnel). *Emergency Medicine*, (3), 57-64. <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2023-3-57-64> EDN: <https://elibrary.ru/lqlaoc>
14. Naumov, P. Yu. (2023). Social functions of private military companies in the context of modern world order transformation. *Paths to Peace and Security*, (2), 207-218. <https://doi.org/10.20542/2307-1494-2023-2-207-218> EDN: <https://elibrary.ru/gytvqq>
15. Naumov, P. Yu., Shepel, R. N., & Kholikov, I. V. (2023). Provision of primary health care to military personnel: legal regulation and problematic aspects. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 22(S9), 46-56. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3885> EDN: <https://elibrary.ru/dsonxg>
16. Naumov, P. Yu., Zakhartsev, S. I., Kholikov, I. V., & Bolshakova, V. M. (2023). The value of law and legal values in a globalizing world (Axiological review of the book «State and Law: Human Rights and a World Order Based on the Rule of Law»). *State and Law*, (9), 64-72. <https://doi.org/10.31857/S102694520024304-5> EDN: <https://elibrary.ru/xeaqeb>
17. Naumova, L. Yu., Naumov, P. Yu., Pyatilyshnova, O. M., & Gibizov, A. S. (2019). Features of legal regulation of reimbursement for providing high-tech medical care services to military personnel of the National Guard troops of the Russian Federation. *Law in the Armed Forces - Military Legal Review*, (10), 77-82. EDN: <https://elibrary.ru/edkcwk>
18. Nikolaev, K. N., Zubritsky, V. F., Koltovich, A. P., et al. (2018). Prevention of venous thromboembolic complications in combat gunshot injuries. *Pirogov Surgery Journal*, (9), 82-86. <https://doi.org/10.17116/hirurgia2018090182> EDN: <https://elibrary.ru/ylyruix>
19. Novikov, N. S., Naumov, P. Yu., Utyuganov, A. A. (2022). Physical and mental health of military personnel as a socio-legal value. *Actual Problems of State and Law*, 6(3), 450-458. <https://doi.org/10.20310/2587-9340-2022-6-3-450-458> EDN: <https://elibrary.ru/nbecsk>

20. Ognerubov, N. A. (2015). Clinical significance of biological variants of breast cancer. *Molecular Medicine*, (2), 31-35. EDN: <https://elibrary.ru/tppedn>
21. Ognerubov, N. A., Ognerubova, I. N. (2017). Malignant priapism. *Tambov University Bulletin. Series: Natural and Technical Sciences*, 22(1), 171-174. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2017-22-1-171-174> EDN: <https://elibrary.ru/ygsiwl>
22. Ognerubov, N. A., Ezhova, E. N. (2022). Somatic mutations in colorectal cancer: regional experience. *Consilium Medicum*, 24(5), 291-296. <https://doi.org/10.26442/20751753.2022.5.201796> EDN: <https://elibrary.ru/eggimo>
23. Ognerubov, N. A., Zelepukin, R. V., Poddubnaya, I. V. (2022). Risk of discrimination of Russian citizens when receiving medical care abroad as a healthcare trend. *Modern Oncology*, 24(2), 260-263. <https://doi.org/10.26442/18151434.2022.2.201706> EDN: <https://elibrary.ru/fjkeor>
24. Ognerubov, N. A., Zelepukin, R. V. (2021). Organization of medical care provision in oncology for patients outside their insurance territories under changing regulatory regulation. *Consilium Medicum*, 23(12), 986-990. <https://doi.org/10.26442/20751753.2021.12.201269> EDN: <https://elibrary.ru/sagxfr>
25. Ognerubov, N. A. (2024). Efficacy of adjuvant therapy with ademetonine during anticancer drug therapy. *Consilium Medicum*, 26(6), 351-361. <https://doi.org/10.26442/20751753.2024.6.202857> EDN: <https://elibrary.ru/ydygzuz>
26. Polyakov, V. G., Men, T. Kh. (2008). Incidence of malignant neoplasms in Russian children in 1990-2005. *Russian Journal of Oncology*, (2), 30-33. EDN: <https://elibrary.ru/jscmbw>
27. Savenkov, A. N., Kudashkin, A. V. (2021). Military law: problem statement and solutions. *State and Law*, (4), 7-34. <https://doi.org/10.31857/S102694520014362-9> EDN: <https://elibrary.ru/pyjjql>
28. Sergeev, Yu. D., Milushin, M. I. (2003). On theoretical foundations and concept of national medical law. *Legal Education and Science*, (4), 29-34. EDN: <https://elibrary.ru/opprnp>
29. Kholikov, I. V., Milovanovich, A., Naumov, P. Yu. (2022). Dynamics of international law functioning in the context of modern world order transformation: post-nonclassical approach. *Journal of Russian Law*, 26(11), 132-148. <https://doi.org/10.12737/jrl.2022.122> EDN: <https://elibrary.ru/abbllm>
30. Kholikov, I. V., Naumov, P. Yu., Bolshakova, V. M., et al. (2022). Federal state control (supervision) over compliance with legislation in the field of ensuring safety of fuel and energy complex facilities: new stage of regulation and law enforcement. *Ugol*, (10), 66-71. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022106671> EDN: <https://elibrary.ru/llcnqt>

31. Kholikov, I. V., Bolshakova, V. M., Naumov, P. Yu., Zelepukin, R. V. (2022). Values and meanings of the main judicial act of the 20th century: axiological concepts of A.N. Savenkov's book «Nuremberg: Verdict in the Name of Peace» (Discussion materials). *State and Law*, (10), 51-62. <https://doi.org/10.31857/S1026945200217887> EDN: <https://elibrary.ru/imtjuc>
32. Chissov, V. I., Starinskiy, V. V., Aleksandrova, L. M., et al. (2006). Sectoral program «Development of high-tech methods of prevention, diagnosis and treatment increasing the effectiveness of medical and social rehabilitation and quality of life of cancer patients» and main results of its implementation in 2001-2005. *Russian Journal of Oncology*, (4), 38-40. EDN: <https://elibrary.ru/hvuwj>
33. State report on the health status of the population of the Russian Federation in 1999. Moscow: Ministry of Health of Russia, RAMS, 2000. 103 p.
34. Carcinogenesis: guide / Ed. by D.G. Zaridze. Moscow: Medicine, 2004. 574 p.
35. Oncology: textbook for medical students / Ed. by V.I. Chissov, S.L. Daryalova. Moscow: GEOTAR-MEDIA, 2007. 559 p. ISBN: 978-5-9704-0454-6
36. Statistics of malignant neoplasms in Russia and CIS countries in 2004 / Ed. by M.I. Davydov, E.M. Aksel. *Bulletin of the N.N. Blokhin Russian Cancer Research Center RAMS*, 2006. Vol. 17, No. 3, Suppl. 1, pp. 5-132.
37. Interregional Public Movement «Movement Against Cancer» - working with appeals from patients and their relatives: official website. URL: http://www.rakpobedim.ru/fileadmin/user_upload/pdf/dpr-results-of-year-2022.pdf (accessed: 01.02.2024).
38. Ministry of Finance of Russia: official website. URL: https://minfin.gov.ru/ru/press-center/?id_4=38680-na_pomoshch_onkobolnym_v_byudzhete_zalozheno_bolee_430_mlrd_rublei (accessed: 12.01.2024).
39. Ministry of Health of the Russian Federation: official website. URL: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdravohranenie/onko> (accessed: 22.02.2024).
40. Federal Service of the National Guard of the Russian Federation: official website. URL: <https://rosguard.gov.ru/ru/page/index/medicinskie-organizacii> (accessed: 07.03.2024).

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Наумов Петр Юрьевич, кандидат педагогических наук, помощник начальника госпиталя по правовой работе – начальник отделения правового обеспечения

*ФГКУЗ «Главный военный клинический госпиталь войск национальной гвардии Российской Федерации»
Вишняковское шоссе, влад. 101, г. Балашиха, Московская область,
143914, Российская Федерация
petr.naumov.777@mail.ru*

Дубинин Анатолий Владимирович, кандидат педагогических наук, старший офицер отделения правового обеспечения
*ФГКУЗ «Главный военный клинический госпиталь войск национальной гвардии Российской Федерации»
Вишняковское шоссе, влад. 101, г. Балашиха, Московская область,
143914, Российская Федерация
anatoliy.dubinin.87@mail.ru*

Утюганов Андрей Анатольевич, кандидат психологических наук, преподаватель кафедры тактики и служебно-боевого применения
*ФГКВОВ ВО «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации»
ул. Гремячий лог, 1, г. Пермь, 614112, Российская Федерация
cooldron-88@mail.ru*

Зелепукин Роман Валерьевич, кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры конституционного и международного права
*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392000, Российская Федерация
lexcomlex@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Petr Yu. Naumov, Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Head of the Hospital for Legal Work – Head of the Legal Support Department
*Main Military Clinical Hospital of the National Guard Troops of the Russian Federation
101, Vishnyakovskoye highway, Balashikha, Moscow region, 143914, Russian Federation
petr.naumov.777@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2875-2322>
SPIN-code: 2750-3053*

Anatoly V. Dubinin, Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Officer of the Legal Support Department
Main Military Clinical Hospital of the National Guard Troops of the Russian Federation
101, Vishnyakovskoye Highway, Balashikha, Moscow region, 143914, Russian Federation
anatoliy.dubinin.87@mail.ru
SPIN-code: 5463-0285

Andrey A. Utyuganov, Candidate of Psychological Sciences, Teacher of the Department of Tactics and Service-Combat Use
Perm Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation
2, Gremyachiy Log Str., Perm, 614112, Russian Federation
cooldron-88@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5527-6794>

Roman V. Zelepukin, Candidate of Law, Associate Professor of Constitutional and International Law Department
Derzhavin Tambov State University
33, Internazionalnaya Str., Tambov, 392000, Russian Federation
lexcomplex@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0307-4385>
SPIN-code: 1152-8939
ResearcherID: AAX-6885-2021

Поступила 28.04.2024

После рецензирования 01.10.2024

Принята 16.11.2024

Received 28.04.2024

Revised 01.10.2024

Accepted 16.11.2024

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

INTERDISCIPLINARY RESEARCH

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1133

EDN: XYAEUQ

UDC 53.06:579.67:664.8



Original article

STUDY OF THE EFFECT OF GAMMA RADIATION
ON THE ANTIBIOTIC ACTIVITY OF OSMOTIC
MICROBIOTA IN SOME TYPES OF URBECHS*R.T. Timakova, A.A. Khlopov, E.S. Lybenko, S.O. Nikitin**Abstract*

Background. “Urbech” – traditional national product of Dagestan peoples recently found increasing popularity among adherents of a healthy diet. Urbech made according to traditional recipes retains its properties when stored for more than 1-2 years. Nowadays urbech range is constantly expanding. Some of the new types of urbech can spoil in 5-7 days.

Materials and methods. The samples of urbech made from coconut flakes and dried mulberries spoiled most quickly, peanut urbech with grated cocoa beans and date syrup, and sesame urbech with honey. The urbech has been treated with antioxidants and mild preservatives and has been exposed to gamma radiation. Using standard methods, the authors have determined humidity, pH, acid number of fat, viscosity, the number of pathogenic microorganisms, including salmonella, QMAFAnM, coliform bacteria, yeast and moldy fungi, osmophilic yeast.

Results. The introduction of antioxidants has increased the best before date of urbech by 7-14 days. Mild preservatives have had no effect on increasing the best before date of nut butter. The drug Polybiom has increased the best before date of urbech by 21-28 days. The study of the urbech microbiological indicators with obvious signs of spoilage has shown that the number of pathogenic microorganisms, including salmonella, QMAFAnM, coliform bacteria, molds and yeasts does not exceed the values regulated in TR CU 021/2011. Treatment of the urbech with gamma radiation has shown that the radiation dose of more than 2 kGy leads to the

change in its organoleptic properties. Osmoresistant microorganisms are present in all the variants. Compared to the control samples, with an increase in the radiation dose, the osmophilic microflora decreases from 10 to 55 times.

Conclusion. During the storage of newly developed types of urbech, it has been found out that its spoilage is not associated with the natural processes of fat oxidation. No microorganisms above the values regulated in TR CU 021 have been found in the urbech. Osmophilic microorganisms develop in the experimental samples of the urbech. Gamma irradiation of urbech at a dosage permissible for food up to 10 kGy reduces the amount of osmophilic microflora up to 55 times. When treated with radiation at a dose of up to 2 kGy, the urbech organoleptic properties are preserved. Accordingly, the treatment with ionizing radiation at the doses up to 2 kGy is effective for preserving organoleptic and microbiological parameters urbechs, including osmophilic yeast, which is not regulated by the regulatory documents in the Russian Federation, for a certain period of storage. To study the causes of the urbech spoilage, further detailed studies of microorganisms and their metabolic products are required.

Keywords: urbech; microorganisms; osmophilic yeast; antioxidants; Mild preservatives; gamma irradiation; kGy; doses of ionizing radiation

For citation. Timakova, R. T., Khlopov, A. A., Lybenko, E. S., & Nikitin, S.O. (2025). Study of the effect of gamma radiation on the antibiotic activity of osmotic microbiota in some types of urbechs. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 424-452. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1133>

Научная статья

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА АНТИБИОТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ОСМОУСТОЙЧИВОЙ МИКРОБИОТЫ В НЕКОТОРЫХ ВИДАХ УРБЕЧЕЙ

Р.Т. Тимакова, А.А. Хлопов, Е.С. Лыбенко, С.О. Никитин

Аннотация

Обоснование. Урбеч – традиционный национальный продукт народов Дагестана в последнее время находит все большее распространение среди приверженцев здорового питания. Урбеч, изготовленный по традиционным рецептурам, сохраняет свои свойства при хранении более 1-2 лет. Ассортимент урбечей постоянно расширяется. При этом некоторые из новых видов урбечей портятся в течение 5-7 сут.

Материалы и методы. Наиболее быстро портились образцы урбечей из кокосовой стружки и вяленых ягод шелковицы, арахисовый урбеч с тертыми какао-бобами и финиковым сиропом, а также кунжутный урбеч с медом. Урбечи были обработаны антиоксидантами и консервантами мягкого действия, обработаны гамма-излучением. Определяли влажность, pH, кислотное число жира, вязкость по стандартным методикам, количество патогенных микроорганизмов, в т.ч. сальмонелл, БГКП, дрожжей и плесневелых грибов, и осмофильных дрожжей.

Результаты. Введение антиокислителей увеличило сроки годности урбечей до 7-14 сут. Консерванты мягкого действия не оказали влияния на увеличение сроков годности урбечей. Препарат Полибиом увеличил сроки годности урбечей до 21-28 сут. Исследование микробиологических показателей урбечей с явными признаками порчи показало, что количество патогенных микроорганизмов, в т.ч. сальмонелл, КМАФАнМ, БГКП, плесеней и дрожжей не превышает показаний, регламентированных в ТР ТС 021/2011 значений. Обработка урбечей гамма-излучением показала, что доза излучения свыше 2 кГр приводит к изменению органолептических свойств. Во всех образцах урбечей присутствовали осмоустойчивые микроорганизмы. По сравнению с контрольными образцами при увеличении дозы излучения снижение осмофильной микрофлоры происходит в 10-55 раз.

Заключение. В процессе хранения новых разработанных видов урбечей установлено, что порча не связана с естественными процессами окисления жиров. В урбечах не обнаружены микроорганизмы, свыше регламентируемых в ТР ТС 021 значений. В опытных образцах урбечей развиваются осмофильные микроорганизмы. Гамма-облучение урбечей при допустимой для продуктов питания дозировке до 10 кГр снижает количество осмофильной микрофлоры от 10 до 55 раз. При обработке излучением дозой до 2 кГр сохраняются органолептические свойства урбечей. Соответственно, обработка ионизирующим излучением дозами до 2 кГр эффективна для сохранения органолептических и микробиологических показателей урбечей, в том числе нерегулируемых нормативными документами в РФ осмофильных дрожжей, на определенном периоде хранения. Для исследования причин порчи урбечей требуется проведение дальнейших углубленных исследований микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности.

Ключевые слова: урбеч; микроорганизмы; осмофильные дрожжи; антиоксиданты; консерванты; гамма-излучение; кГр; доза ионизирующего излучения

Для цитирования. Тимакова, Р. Т., Хлопов, А. А., Лыбенко, Е. С., & Никитин, С. О. (2025). Изучение влияния гамма-излучения на антибиотиче-

скую активность осмоустойчивой микробиоты в некоторых видах урбечей. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 424-452. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1133>

Introduction

The article discusses the issues related to ensuring the urbech microbiological safety, osmoresistant microorganisms in particular, as a result of its treatment with different doses of ionizing radiation.

Numerous ethnographic studies conducted at various times on the territory of Dagestan indicate that urbech is a traditional national dish of this region inhabitants [6]. Many peoples of the world use oilseeds, nuts, and honey as food, but only in Dagestan a dish from curly flax seeds ground on the stone millstones of a mill with the addition of melted butter and honey has appeared. Flax seed contains antioxidants (selenium and vitamin E), which prevent lipid oxidation, which affects the storage capacity of nut butter. The secret of urbech modern popularity is determined by traditional technologies, natural ingredients and minimal heat treatment, which has been highly appreciated by supporters of the healthy diet. Initially, urbech was prepared by craft and referred to food products of non-industrial manufacture. Nowadays, the urbech assortment is expanded due to the use of pumpkin seeds, stirrups, coconut flakes, stone fruits, oilseeds, amaranth, etc. Instead of honey, other ingredients for functional purposes are added to its composition: mango, cranberry, banana, strawberry, date syrup, etc.

In addition to urbech, dishes made from tahini (sesame butter) and hummus (chickpea flour) are widespread all over the world. The name “tahini” comes from the Arabic “tanina”, from “tanin” - flour, from “tanana” - to grind. To prepare tahini, one uses sesame seed butter, to which lemon juice, oil or water, salt, and spices are added [20]. Tahini has grown in popularity around the world, especially in using in vegetarian recipes, as it adds rich flavour to dishes [34]. Hummus is a traditional Arabic dish made from chickpea flour and served as a side dish or as an appetizer.

The humus popularity is growing around the world now. Its value is determined by chickpeas, a high-protein plant from the legume family, which is used for food by animal meat quitters. Reducing beef consumption helps reducing a number of lifestyle diseases such as cancer, diabetes, oncology and hypertension. The production of 1 kg of chickpeas requires 350 liters of water, and the production of 1 kg of beef requires 15400 liters [16].

Urbech, tahini and hummus are made from the ground fruits of various plants. However, grinding technologies in different parts of the world differ in

their national characteristics. So, the technology for producing urbech is that the raw material is ground not on metal millstones, but on the millstones made exclusively of stone. It is believed that grinding seeds by using stone protects their energy, preserving their beneficial properties.

Before grinding, contaminants are removed from the raw material, the peeled seeds and nut kernels are fried, which leads to the acquisition of characteristic taste and technological properties [2]. When deviating from the set temperature during frying, changes occur in the taste and technological properties of the raw material. The resulting paste is mixed with sweet syrups, honey, ghee, and then dried and crushed fruits, berries and candied fruits are added. Along with it, the introduction of new ingredients into the traditional recipe with new food combinatorics creation can lead to different atypical reactions. Thus, mixing sesame butter with honey almost always gives sour taste after 2-3 weeks of storage.

Expanding the distribution geography and increasing the complexity of logistics requires research to ensure microbiological safety indicators and to determine the best before date and storage conditions of the finished product. Not all ingredients can be subjected to significant heat treatment to destroy surface microflora while preserving their natural color, taste and smell.

At the same time, insufficiently high temperature and duration of raw materials heating while preparing urbech can cause food poisoning. Gram-negative, motile, non-spore-forming, facultative anabolism *Cronobacter* spp., classified as a member of the Enterobacteriaceae family, is often found on the surface of spices and dried fruits [21].

In recent years, there has been an increase in the nut production in the world. Nuts are very susceptible to contamination by pathogenic microflora, including *Salmonella*, which has led to the significant change in the approach to these products processing and handling using modern thermal and non-thermal methods to combat pathogens and the factors affecting their effectiveness [27]. Bacteria of the *Cronobacter* species, which pose the great danger to human health, can also be found in dry food mixtures [19]. It is known that honey is a shelf-stable product. At the same time, honey contains the great amount of undesirable microflora in its inactive state - mainly these are osmophilic representatives of unicellular fungi and fungus-like bacteria [4; 15; 31]. After mixing honey with pastes from seeds and nuts, the preservative properties of honey may deteriorate and cause spoilage of urbech.

Fat-containing products, which include urbech with the fat content of more than 20%, may not be subjected to ozonation for disinfection, despite the fact

that such a technique is compatible with organic food processing. Ozonation causes the oxidation of fatty acids, enzymes and proteins in cell membranes, envelopes and cytoplasm. Ultraviolet radiation is not effective because it has low penetrating power and can cause changes in genomic material.

To suppress the causative agent of salmonellosis in tahini and hummus, the addition of acetic and citric acids in dosages of up to 0.5% has been effective [25]. To suppress *Salmonella* spp. and *Listeria* spp. the scientists have proposed to use the antagonistic effect of the *Lactiplantibacillus plantarum* and *Compani Lactobacillus alimentarius* strains [18; 23].

It has been established that when sesame seeds are roasted, some microorganisms also retain their activity. To decontaminate them, microwave radiation has been used, which has resulted in almost complete suppression of microbiological activity [29]. The literature contains information on the inactivation of *Salmonella* at a temperature of 110...150°C [33].

It is known that the *salmonella* activity in tahini can be suppressed by adding the extracts of essential oils of various plants. However, these extracts have also changed the organoleptic properties of tahini [25]. Plant extracts having antioxidant properties can have the certain effect on extending the best before date of vegetable oils [8], but to ensure their microbiological safety research is required.

Foods and ingredients with low water activity are often the sources of pathogenic microorganisms that cause food poisoning. Such microorganisms stay alive for several months and even years in food products and their production workshops [28].

Dangerous microorganisms such as *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* can easily survive in date paste and syrup at a temperature of +4°C for more than 90 days. Consequently, the possibility of contamination of the finished product during its manufacturing must be completely excluded [32].

To destroy osmophilic microorganisms that can appear in the food products with low water activity, traditional types of processing in the form of thermal heating, drying, baking and frying in oil are not effective ways to deactivate pathogenic microflora. To destroy such microflora, it is required to observe more strict processing conditions using traditional methods or other methods, for example, steam treatment, treatment with moist hot air, since temperature in combination with moisture significantly reduces the thermal resistance of microorganisms [24]. This category of non-traditional processing methods also includes extrusion processing, irradiation, and radio frequency heating. The choice of one or another method of processing food products and raw materials for them depends on the chemical composition, recipe and other factors [17].

The use of low-frequency ultrasound increases the efficiency of drying plant raw materials and inactivation of microorganisms maintaining food properties such as texture and nutritional value at the same time. The use of ultrasonic and osmotic dehydration reduces water activity, increases the ability to rehydrate, improves product color and reduces nutrient losses [14].

The principle of food resources preservation plays an important role in food security governance in accordance with the Sustainable Development Goals (SDGs) [11]. According to FAO, annual losses for oilseeds, because of microbial spoilage in particular, amount to up to 20%. Microorganisms enter raw materials mainly from the environment (as the surface of plants has its own epiphytic microflora) and partly through technological equipment.

The Russian Federation monitors compliance with the law in the field of ensuring the safety of food resources and agricultural raw materials, taking into account generally accepted international standards, which contributes to the harmonious development of the national food safety control system [10; 11].

Traditionally, perishable food products, agricultural food raw materials are subjected to radiation treatment in order to ensure their microbiological safety, to destroy insects and pests, to inhibit germination and to extend the best before date of plant products and for quarantine phytosanitary disinfection [5]. The effectiveness of ionizing radiation exposure depends on the radiation dose, the type and strain of the microorganism and the radiosensitivity of the microorganisms and the type and condition of the product itself [1; 9]. Thus, a dose of 0.10-0.97 kGy leads to a 10-fold decrease in the number of *Escherichia coli*, a dose of 1.0-2.3 kGy leads to complete inactivation, the number of *Salmonella* decreases respectively at a dose 0.15-0.80 kGy and they become inactive at a dose of 3,7-4.8 kGy. As for mold, a dose of 0.06-0.60 kGy leads to its 10-fold decrease, and a dose of 1.3-11.0 kGy leads to its complete inactivation. As for *Clostridium*, doses of 0.8-2.5 kGy lead to its 10-fold decrease, and a dose 19.0-37.0 kGy results in its complete inactivation, etc. This proves that it's necessary to perform practical testing of the radiation use at different doses for various types of food products and agricultural raw materials.

One of the most effective ways to ensure the microbiological safety of food products is the use of radiation treatment. Foodborne infections are caused by consuming food products contaminated with pathogenic and opportunistic microflora; consequently, such processing is the most optimal way to ensure safe and high-quality products, for consumers with immunodeficiencies (cancer patients) in particular [7].

Although low moisture foods (LMF) have been defined as foods with water activity (aw) of less than 0.85, and they are generally considered to be

less susceptible to microbial spoilage and the foodborne pathogens growth, (e.g. in tahini and hummus), new inactivation methods are required, including radiation treatment, which can disrupt DNA or RNA or other bacterial structures, and which is effective for foods with varying moisture levels, resulting in subtle changes in texture, flavour and nutritional properties of products [31].

They have established the gamma irradiation effect on the *Escherichia coli* O157:H7 strain and microbiota inactivation in tahini: the number of *E. coli* O157:H7 decreased 10 times when treated with gamma radiation at the doses from 0.31 to 0.39 kGy. In unfavorable situations for microorganisms, the radiation resistance of *E. coli* O157:H7 decreases ($P < 0.05$). The irradiation dose of 1 kGy reduces the number of *E. coli* O157:H7 and microbiota in tahini by $2.6\text{--}3.2 \cdot 10^1$ CFU/g and $1.6 \cdot 10^1$ CFU/g, respectively ($P > 0.05$) [30].

When treated with gamma radiation at the doses up to 4 kGy of tahini halva or its main ingredient tahini, previously inoculated with fresh or dried cultures of the tested microorganisms separately *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7, it has been found out that when the microorganisms are dried, the resistance coefficient decreases *Salmonella* and *L. monocytogenes* to gamma radiation up to 0.85 and 0.73 respectively, compared to the cells not subjected to desiccation, as it has not affected the resistance of *E. coli* O157:H7. Gamma irradiation at the doses ranging from 0.1 kGy to 0.6 kGy is effective in suppressing *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes* or *Escherichia coli* in hummus [17]. Treatment with gamma radiation doses of 1.5 kGy and 2.5 kGy ensures the extension of the best before date of the hummus packed in laminated bags when stored at a temperature of +4°C and compliance with microbiological indicators [26]. Irradiation of nuts used as the raw material with low doses (< 5 kGy) is effective in destroying pathogenic microorganisms [22].

The open information base of literary sources does not contain information concerning the methods of destroying the microbial environment in urbech. However, problems with microbiological contamination are similar for nuts, hummus and tahini.

One of the effective ways to inactivate pathogenic microflora is to treat the finished product with different doses of gamma radiation, which has been permitted for using in the Russian Federation since 2017 for a number of food products.

Ionizing radiation is used in the food industry to inactivate microorganisms in food products [3].

Problematics

Nowadays, in addition to traditional urbech recipes, manufacturers try to expand their range by introducing new ingredients. The introduction of new raw materials requires the comprehensive study of the combined effects of different raw materials and production technologies. Various types of food products are produced based on coconut paste, but coconut in combination with honey is subject to quick spoilage, which is manifested in the coconut fat rancidity. But when combined with the date syrup and cocoa beans, peanut butter becomes sour and rancid. Sesame paste - tahini in combination with honey becomes sour after 2-3 weeks. In case of further storage, acidity increases. It is known that honey contains various enzymes from the bees' digestive juice. Grated cocoa beans may contain lipase, which is formed as a result of the fruit fermentation for their better separation. Dried mulberries may contain various microorganisms on the surface that survive even after heat treatment. At the same time, the enzymatic activity of microorganisms is very high.

In scientific research works in the public domain, there is no work concerning variable approach to selecting the effective method for preventing microbial spoilage of the finished product - urbech, which has determined the *purpose of the experimental research* that is to assess the effect of different doses of ionizing radiation on the microbiological parameters of some types of urbech, in particular on the viability of osmoresistant microorganisms. At the same time, the authors show the sequence of searching the effective way to prevent spoilage of urbech by studying the influence of various processing methods (by antioxidants, preservatives or radiation) - on microbiological parameters changes.

Materials and methods

The research objects include 3 types of urbech: the urbech from coconut pulp with the addition of dried mulberries (CM), the urbech from blanched peanuts with the addition of grated cocoa beans and date syrup (PCD) and the urbech from white sesame seeds with honey (SH). For urbech production, raw materials from different manufacturers have been used.

At the first stage, antioxidants were added to the finished urbech during its storage in order to prevent fats oxidation and to prevent lipases activation, the one of microbiological origin in particular. So, the drugs were administered in the maximum recommended dosage in accordance with the specifications in terms of the fat amount in the product under study. The enzyme preparation Long Way (0.15%) from the company "Grein Ingredient", tocopherol (1.5%), preparations Antioxidine (1.0%) and Unicons Eco (2.0%), sodium erythorbate

(1.0%), butyloxytoluene (0.1%), butylhydroxyanisole (0.5%) from the Unicons Group were tested.

At the second stage, to suppress microflora in urbech, preservatives were used. Manufacturers classify the used preservatives as “a clean label”: Deztin (1.0 %), Biatis (0.2 %), Milekons (0.7 %), Glycyfit (2.0 %), Lysozyme (0.5 %) and Polybiome (0.5 %). The preservatives effect in urbech was tested in the thermostat. For this purpose, a preservative in the maximum recommended dosage was added to the experimental samples of urbech weighing 600 g. Then it was mixed and put in the thermostat at a temperature of +40°C.

At the third stage, the finished urbech was treated with different doses of gamma radiation at OOO RCOT “Era” using the RTU-3000 installation. Gamma irradiation source is 60 Co, its type is GIK-A6. The process of controlling the γ -radiation treatment was carried out automatically using the computer technology. Operational monitoring of the absorbed dose was carried out using CVID (manufactured by state scientific centre VNIIFTRI).

Choosing doses of ionizing radiation is determined by the results of studies made by WHO, which confirm the safety of an absorbed dose of ionizing radiation up to 10 kGy [10, 12] and the same is proved by a number of researchers [1; 5; 9].

In each species group of urbech samples (CM, PCD and SH), the researchers have formed control and experimental groups depending on the irradiation intensity (Table 1).

Table 1.

Symbol of control and experimental groups of urbech treated with different doses of gamma radiation

Dose of Radiation, kGy	Species Groups		
	CM	PCD	SH
Control Groups			
0	CM-0	PCD-0	SH-0
Experimental Groups			
2; 4; 6; 8; 10	CM-2; CM-4; CM-6; CM-8; CM-10	PCD-2; PCD-4; PCD-6; PCD-8; PCD-10	SH-2; SH-4; SH-6; SH-8; SH-10

(compiled by the authors)

Microbiological tests were carried out in an accredited laboratory in accordance with GOST 31659-2012 to identify pathogenic microorganisms, including salmonella in 25 g; QMAFAnM - according to GOST 10444.15-94 article 6; coli bacteria (coliform bacteria) - according to GOST 31747-2012; the amount

of yeast and moldy fungi - according to GOST 1044.12-2013 article 9; osmophilic microflora and yeast - according to GOST ISO 21527-2-2013.

The pH of urbech samples was measured using a pH meter 150M. The urbech viscosity was measured using a rotational viscometer at a temperature of 28°C. Humidity in accordance with GOST 5900-2014, acid number of fat - according to GOST R 50457-92.

Experimental studies. The urbech production scheme: rawmaterial purification; roasting of seeds and nuts (105-120°C); cooling of seeds and nuts (20-25°C); grinding seeds and nuts on stone millstones (less than 0.1 mm); tempering honey, cocoa beans (40-43°C); mixing of ingredients (3-5 minutes); packaging and capping.

After the initial tasting assessment, the nutritional value in the control samples of each species group was calculated in accordance with the standard methodology for defining the nutritional and biological value of food products [13] (Table 2).

Table 2.

Urbech nutritional value, 1g/100g of the product ($p \leq 0,05$)

Product name	Protein, g	Fat, g	Carbohydrates, g	kcal
1st species group – Urbech SH-0-0	12.5±0.4	33.6±0.6	35.8±0.3	495
2st species group – Urbech CM-0	12.0±0.4	52.5±0.8	24.2±0.2	617
3st species group – Urbech PCD-0	22.0±0.5	42.2±0.5	17.6±0.1	538

(compiled by the authors)

In the control samples of the 1st species group of the urbech (SH-0) the highest carbohydrate content was found, that was equal up to 35.8±0.3 g/100g compared with the samples of the 2nd species group of the urbech (CM-0) and the 3rd species group of the urbech (PCD-0). This fact can be explained by the addition of honey to the urbech composition. In the samples of the 2nd (CM) and 3rd (PCD) species groups, there was the increased fat content up to 52.5±0.8 g/100g and protein -up to 22.0±0.5 g/100g, respectively, due to introducing the raw material component of coconut and peanuts into the urbech recipe.

Traditionally, urbech is not subjected to heat treatment and it is stored in terms of positive temperatures no higher than +25°C for up to 1 year. The control samples of urbech with developed unconventional recipes (SH-0, CM-0, PCD-0) were placed under provocative background conditions for up to 30 days: temperature +40°C, humidity 75 %, exposure for 30 days, dark place. The control samples of Urbech SH-0 and CM-0 were stored for up to 5 days without changing the primary signs of organoleptic indicators, the control samples of Urbech PCD-0 were stored for up to 7 days.

Research results and discussions

Humidity determination has shown that in the control samples of Urbech type SH-0 the moisture content is 5.1 ± 0.3 %, in the control samples of Urbech type CM-0 it is 4.8 ± 0.3 %, in the control samples of type SH-0 it is 5.1 %, in the control samples of Urbech type PCD-0 it is 5.3 ± 0.3 %. At this moisture content, microbiological activity is minimal.

At the first stage of the study, the antioxidants influence on the urbech preservation was studied based on the results of organoleptic assessment. The addition of sodium erythorbate, butyloxytoluene and butyloxyanisol in the maximum recommended dosages led to a slight increase in the best before date to 7 days in the urbech SH and CM; and up to 14 days in the urbech PCD. During its keeping, it was found out that the urbech samples deteriorated due to these antioxidants presence, which resulted in sourness in the urbech (SH); in rancidity in the urbech CM; and in sourness and bitterness in the urbech PCD. At the same time, the presented antioxidants are successfully used on an industrial scale in other food products. Accordingly, the most probable assumptions are that the reasons for the studied urbech samples spoilage are not due to the fats rancidity as a result of their oxidation. Microbiological indicators in accordance with the regulated standards TR CU 021/2011 in all the samples of urbech.

At the next stage, the preservatives effect (rowan extract, rosemary extract, lingonberry extract, glycyrrhite, lysozyme) in urbech samples was studied. The first signs of spoilage began to appear after 7 days in the urbech CM (rancidity), and after 14 days - in the urbech SH and PCD - the appearance of sourness and sourness with bitterness, respectively. When adding the Polybiome preservative, the best before date of the urbech CM and the urbech SH and PCD increased to 21-28 calendar days, respectively. For more effective search of pathogenic microflora at this stage, microbiological studies were carried out in the urbech with obvious signs of spoilage in the form of decomposition odors and rancid taste after 21 days (Table 3).

Table 3.

Results of microbiological studies of the urbech samples with the Polybiome preservative addition

Indicators	Standard according to TR CU 021/2011	CM	PCD	SH
Pathogenic microorganisms, including salmonella in 25 g	Not allowed	Not detected	Not detected	Not detected
QMAFAnM, CFU/g (cm3)	No more $5 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^2$	$4,4 \cdot 10^1$	$3,8 \cdot 10^2$

Coliforms, not allowed in the product weight, g	0,01	Not detected	Not detected	Not detected
Mold, CFU/g (cm3), no more	100	11...18	10...14	10...17
Yeast, CFU/g (cm3), no more	50	5...8	5...8	5...8

(compiled by the authors)

The research results have shown that in all the samples of the urbech with the preservative Polybiome addition, despite obvious signs of spoilage in organoleptic indicators, microbiological indicators correspond to the regulated indicators in accordance with the requirements of TR CU 021/2011. It has been assumed that the studied urbech samples contain osmoresistant, non-gas-forming microflora, which can survive at a substrate humidity of about 5 %.

At the third stage of the research, the reseachers decided to treat the studied urbech samples with different doses of gamma radiation (according to the data in Table 1) and to perform the detailed study of microbiological safety indicators, including indicators regulated by TR CU 021/2011, as well as osmophilic microorganisms. This approach depends on the fact that when studying microbiological safety indicators using standard methods, undesirable microflora is not detected, and at the same time, the unsuitability signs for human consumption have been established in the urbech: the taste and smell of spoiled products.

The organoleptic properties (colour, smell) have been studied in the control samples of the urbech (SH-0, PCD-0, CM-0), not treated with ionizing radiation, and in the experimental samples of the urbech species groups (SH, PCD, CM), treated with different doses of ionizing gamma radiation: 2, 4, 6, 8 and 10 kGy (Tables 4 and 5).

Table 4.

The influence of treating the urbech with different doses of gamma radiation on its smell

Radiation dose, kGy	Samples the urbech		
	CM	PCD	SH
0	Coconut, sweetish	Peanut chocolate	Sesame-honey
2			
4, 6, 8, 10	Unusual for the urbech species	Unusual for the urbech species, faint smell of cocoa	Unusual for the urbech species, with bitterness

(compiled by the authors)

It has been experimentally established that the odor of the urbech of the experimental groups changes to the unusual odor for a certain type of urbech when it's treated with doses of 4 kGy and higher

Table 5.

The influence of treating the urbech with different doses of gamma radiation on its taste

Radiation dose, kGy	Samples the urbech		
	CM	PCD	SH
0	Coconut-mulberry	Peanut with chocolate, sweet	Sesame-honey, sweet
2			
4	Unusual for the urbech species	Peanut with chocolate, sweet with slight bitterness. Unusual for the urbech species	Sesame-honey, sweet with slight bitterness. Unusual for the urbech species, poor taste
6, 8, 10	Unusual for the urbech species	Unusual for the urbech species. One can taste only cocoa	Sesame, poor taste

(compiled by the authors)

With an increase in the gamma radiation dose, the urbech taste has changed, becoming poor, unusual, and weakly expressed. It has been established that the permissible dose of gamma radiation, which does not affect the change in taste, for all the groups of urbech experimental samples is 2 kGy; with an increase in dose of 4 kGy and above, a change in the urbech taste is noted.

Next, the urbech color of control and experimental samples (SH, PCD, CM) has been studied (Figures 1-3).

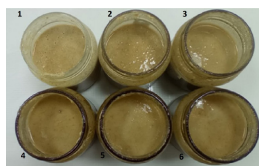


Figure 1. Urbech samples from sesame and honey (SH)

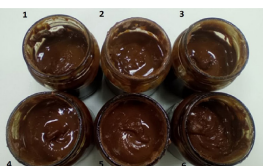


Figure 2. Urbech samples made from peanuts, cocoa beans and date syrup (PCD)



Figure 3. Urbech samples from coconut and mulberry (CM)

1 – the control sample (0 kGy), 2 – the experimental sample of the urbech, treated with a dose of 2 kGy, 3 – the experimental sample of the urbech, treated with a dose of 4 kGy, 4 – the sample of the urbech, treated with a dose of 6 kGy, 5 – the sample of the urbech, treated with a dose of 8 kGy, 6 – the sample of the urbech, treated with a dose of 10 kGy

The samples of the light-colored urbech (SH and CM) show that as a result of processing, the urbech has darkened. So, when irradiated with 2 kGy, the

mass has darkened by half a tone in comparison with the control sample, which does not worsen the urbech appearance. It has been established that every subsequent 2 kGy darkens urbech by half a tone in comparison with the previous version. In dark urbech samples (PCD), slight darkening can also be noted.

In addition to organoleptic studies, the urbech viscosity has been studied (Table 6).

Table 6.

The influence of treating the urbech with different doses of gamma radiation on its viscosity, conventional units of the device

Radiation dose, kGy	Samples the urbech		
	CM	PCD	SH
0	20±1.2	30±1.6	35±1.5
2	21±1.4	34±1.7	41±1.4
4	22±1.3	37±1.8	46±1.6
6	20±1.5	42±1.9	53±2.1
8	22±1.4	45±1.4	60±2.4
10	23±1.4	48±1.8	77±2.5

The study of changes in the urbech viscosity of experimental groups as a result of treating them with different doses of gamma radiation has shown that the urbech viscosity of experimental groups CM has remained practically unchanged (from 20±1.2 to 23±1.4 conventional units of the device). In the urbech samples of the PCD experimental groups, the viscosity has increased 1.6 times, these samples have been treated with a dose of 10 kGy compared to the untreated samples. The increase in thickening has been approximately 3-5 conventional units of the device for every 2 kGy of exposure. The samples of the experimental groups of the urbech SH has turned out to be the most resistant to irradiation. The increase in viscosity when treated with a dose of ionizing radiation of 10 kGy has been about 71 %. The viscosity of the urbech with a maximum irradiation dose of 10 kGy - 77 conventional units of a device.

At the intermediate stage, it can be noted that when urbech is treated with doses up to 2 kGy inclusive, in all the tested samples CM-2, PCD-2 and SH-2, the organoleptic characteristics and viscosity have remained unchanged compared to the control samples of the urbech CM-0, PCD-0 and SH-0 for up to 30-40 days.

The organoleptic assessment data is confirmed by the data obtained when studying the acid number of urbech fat of control and experimental samples of the urbech SH, PCD and CM (Figure 4).

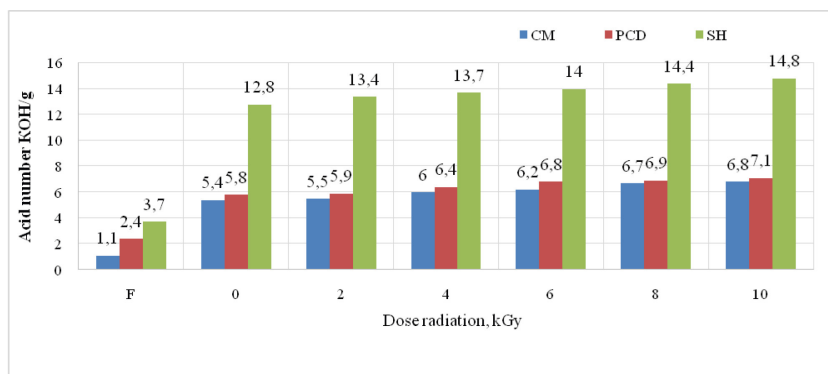


Figure 4. The influence of treating the urbech with different doses of gamma radiation on the acid number (AN) of urbech samples (F - freshly prepared Urbech samples; 0 kGy, 2 kGy, 4 kGy, 6 kGy, 8 kGy, 10 kGy - Urbech samples treated with different doses of radiation , CM, PCD, SH during their storage over 100 days)

Figure 4 shows that freshly prepared samples (F) have the minimum acid number (AN); when stored for more than 100 days, the acid number has increased in the control and tested samples of urbech. The AN of the urbech SH and the urbech PCD (0 kGy and 2 kGy) during their storage for over 100 days is comparable to the AN of the second class sunflower oil. In the samples of the urbech CM, the acid number has a high value of 3.7 immediately after the urbech production and subsequently during their storage for more than 100 days such urbech is not suitable for consumption.

Due to the fact that the urbech (after 100 days after treatment with different doses of gamma radiation and storage in room conditions) has had signs of spoilage, expressed in the unpleasant odor and taste and a high acid number, microbiological studies have been carried out. All indicators meet the requirements of TR CU 021/2011. No pathogenic microorganisms have been found in all the samples, including salmonella, and coliforms; QMAFAnM in the experimental samples of the urbechs SH, PCD and CM, depending on the radiation dose, has been in the range of $1.3 \cdot 10^1$ - $2.8 \cdot 10^3$ CFU/g, $1.1 \cdot 10^1$ - $7.5 \cdot 10^1$ CFU/g and $3.1 \cdot 10^2$ - $5.2 \cdot 10^2$ CFU/g accordingly; mold - in the experimental samples of the urbechs SH, PCD and CM, depending on the radiation dose, has been in the range of 8 - 15 CFU/g, 7 - 15 CFU/g, and 11 - 19 CFU/g G accordingly; yeast - in the experimental samples of the urbechs SH, PCD and CM, depending on the radiation dose, has been within 3 - 4 CFU/g, 3 - 5 CFU/g and CFU/g G accordingly.

Since organoleptic signs of spoilage have been established previously in the samples of the experimental groups of the urbech SH, PCD and CM, and at the same time pathogenic microorganisms have not been identified using standard methods for food products, additional studies have been carried out to identify microorganisms not regulated by the relevant technical regulations, in particular to identify osmophilic microflora (Table 8).

Table 8.

The influence of treating the urbech with different doses of gamma radiation on the amount of osmophilic yeast in it, CFU/g

Radiation dose, kGy	Samples the urbech		
	CM	PCD	SH
0	310	521	Not detected
2	150	178	Not detected
4	133	98	Not detected
6	117	90	Not detected
8	106	84	Not detected
10	80	77	Not detected

In the Russian Federation, microbiological safety requirements for food products are not regulated in terms of rationing the amount of osmophilic yeast, including in honey and the products with low water activity. The permissible amount of these microorganisms in honey is regulated in the standard NMX-036-NORMEX-2006 “ALIMENTOS-MIEL-ESPECIFICACIONES Y METODOS DE PRUEBA” (Food. Honey. Technical characteristics and testing methods) (Mexico) and it is no more than 100 CFU/g. In accordance with the Chinese standard GB 14963 - 2011 “State Food Safety Standard. Honey” the amount of osmophilic yeast is allowed no more than 200 CFU/g. Consequently, we can focus on foreign standards and determine the safe amount of osmophilic yeast in urbech as the products with low water content and high osmotic pressure up to 100 - 200 CFU/g.

Osmophilic yeasts have not been found in the control and experimental samples of the urbech SH. The experimental samples of the urbech CM after treatment with gamma radiation contain 80...150 CFU/g of osmophilic yeast. In the experimental samples of the urbech PCD, the number of osmophilic yeasts is 100 CFU/g or less, only at the irradiation dose of 4 kGy or more. The reduction in the number of osmophilic yeasts in the samples of urbech CM treated with a dose of 10 kGy of gamma radiation has been 3.9 times compared to the untreated samples, in the samples of the PCD – 6.8 times, respectively. Con-

sequently, treatment of the urbech of different composition with the doses of gamma radiation from 2 kGy to 10 kGy is effective in ensuring microbiological safety in relation to osmophilic yeasts.

After 100 days of storage of the different types of urbech pH value has been determined as an indicator of quality and safety (Figure 5).

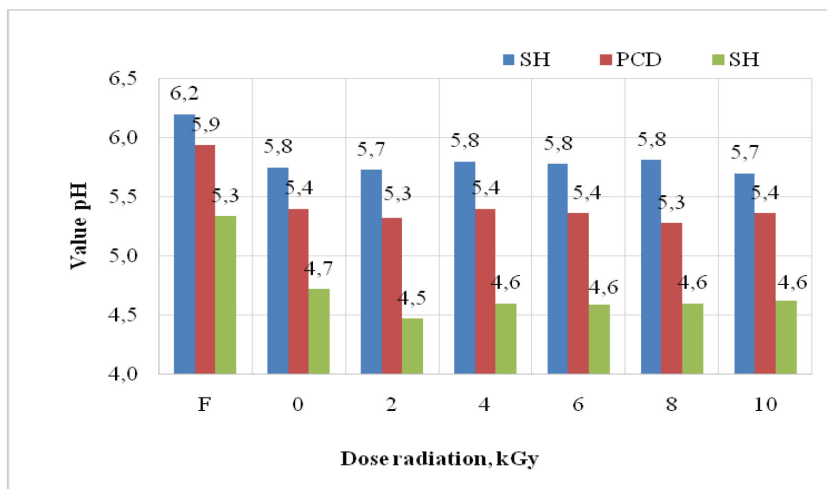


Figure 5. The influence of treating the urbech with different doses of gamma radiation on its pH (F - freshly prepared urbech samples; 0 kGy, 2 kGy, 4 kGy, 6 kGy, 8 kGy, 10 kGy – the urbech samples treated with different doses of radiation during their storage over 100 days)

In all the urbech samples the pH value has decreased compared to freshly prepared urbech (F) after irradiation. Thus, in the experimental samples of the urbech CM, the pH decreases from 6.2 to 5.8 - 5.7; in the tested samples PCD - from 5.9 to 5.4 - 5.3; in the tested samples SH - from 5.3 to 4.72 - 4.8. These values are stable in all the experimental samples of the corresponding species, but they are lower compared to the freshly prepared urbech.

Conclusions

In the process of storing the newly developed urbech types the authors have noted the fact of rapid spoilage (up to 5 - 7 days) for the urbech from coconut pulp with the addition of dried mulberries (CM), from blanched peanuts with the addition of grated cocoa beans and date syrup (PCD) and from white sesame seeds with honey (SH). It has been experimentally revealed that the cause of

the urbech damage has not been the processes of natural fat oxidation. Consequently, the antioxidants and preservatives of various groups cannot slow down the spoilage process. At the same time, the effect of the preservative - the drug Polybiom - has given a prolonged effect up to 21-28 calendar days to prevent the urbech spoilage. The humidity of the studied urbech species has been in the range of 4.8-5.3%, which is an important factor in the microorganisms inactivation and ensuring the requirements of technical regulations for microbiological safety. Thus, with the standard methods for detecting microorganisms, urbech contains 5 – 8 CFU/g of yeast cells, 10 – 18 CFU/g of molds and $4.4 \cdot 10^1$ – $3.8 \cdot 10^2$ of QMAFAnM at a rate of 50 CFU/g, 100 CFU/g and no more than $5 \cdot 10^3$ CFU/g, respectively, no pathogenic microorganisms, including salmonella, have been detected.

One of the effective ways to ensure the urbech microbiological safety is treatment with different doses of gamma radiation. The urbech tested samples have been treated with the appropriate doses: 2 kGy, 4 kGy, 6 kGy, 8 kGy and 10 kGy. When the dose increases above 2 kGy, an unusual smell and odor appear in the urbech samples, which determines the need to limit the radiation dose to 2 kGy. The organoleptic assessment data is confirmed by the data obtained from studying the acid number of urbech fat during its storage period of up to 30-40 days. The viscosity of the urbech CM, treated with different doses of radiation, has not practically changed, in contrast to the samples of the urbech PCD and the samples of the urbech SH. In the experimental samples of the urbech, as a result of treatment with ionizing radiation, after 100 days all the regulated indicators in the tested samples are within the regulated indicators, in contrast to the control samples: QMAFAnM - $5.2 \cdot 10^3$ CFU/g, mold - 102 CFU/g, yeast - 54 CFU/g. The study of the species composition of osmo-resistant microflora, not regulated by technical regulations in the Russian Federation, has shown that urbech contains osmo-resistant yeast in the amount of 310 and 521 CFU/g in the control samples of the urbech CM and the urbech PCD, respectively, and they are absent in the samples of the urbech SH. The samples of the experimental group of the urbech CM after treatment with gamma radiation have contained 110...150 CFU/g of osmophilic yeast. In the urbech PCD the amount of osmophilic yeast of 100 CFU/g or less has been observed only at irradiation doses of 4 kGy and 6 kGy. The decrease in the number of osmo-resistant yeasts in the urbech samples treated with gamma radiation has occurred by 10...55 times. Therefore, the use of gamma radiation is effective in reducing the osmophilic yeast population.

Thus, the treatment with ionizing radiation at the doses up to 2 kGy is effective for preserving organoleptic and microbiological parameters, including

osmophilic yeast, which is not regulated by the regulatory documents in the Russian Federation, for a certain period of storage. To study the causes of the urbech spoilage, further detailed studies of microorganisms and their metabolic products are required, as well as studying the storage conditions and possible changes in technology and recipe composition with the exclusion of ingredients with high humidity.

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

Acknowledgments. We express our gratitude to Rodion I. Ermolaev for consulting assistance in organizing experimental studies on the treatment of urbechs with ionizing radiation.

References

1. Yagafar, M. K., Gainutdinov, T. R., Idrisov, A. M., Rakhmatullina, G. I., Yunusov, I. R. (2022). Assessment of biological safety of irradiated feed and food products. *Veterinary Doctor*, (2), 21-28. <https://doi.org/10.33632/1998-698> EDN: <https://elibrary.ru/thkguc>
2. Bulatova, A. G., Sergeeva, G. A. (2021). Traditional food culture of the peoples of Dagestan. Moscow: Prospekt. 96 p. ISBN: 978-5-392-34147-4. EDN: <https://elibrary.ru/sjdbyb>
3. Danyo, E. K., Ivantsova, M. N., Selezneva, I. S. (2024). Ionizing radiation effects on microorganisms and its applications in the food industry. *Foods and Raw Materials*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-583> EDN: <https://elibrary.ru/xicyhk>
4. Kushch, I. V., Vanner, N. E., Udavliev, D. I., Muradova, M. D. (2019). Microbiological safety of honey. *Health, Food & Biotechnology*, 1(3), 106-117. <https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i3.s267> EDN: <https://elibrary.ru/syvgzy>
5. Mordkovich, Ya. B., Baranova, L. I. (2023). Prospects for using radiation disinsection for quarantine phytosanitary disinfection. *Phytosanitary. Plant Quarantine*, (3), 60-64. <https://doi.org/10.69536/u8906-0079-0762-a> EDN: <https://elibrary.ru/xrbxzc>
6. Ramazanova, Z. B., Gadzhalova, F. A. (2023). Dagestan traditional dishes and food products as a marker of folk culture and regional brand. *Heritage of Ages*, (2), 31-45. <https://doi.org/10.36343/SB.2023.34.2.002> EDN: <https://elibrary.ru/iytxow>
7. Sarukhanov, V. Ya., Shesterikov, A. Yu., Pomyasova, M. G., Kharlamov, V. A., Polyakova, I. V., Karpenko, E. I. (2022). Systematization of experimental research results and creation of the database «Radiation processing of agri-

- cultural raw materials and food products». *Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Register)*, 31(3), 37-47. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-3-37-47> EDN: <https://elibrary.ru/adzlrir>
8. Nechaev, A. P., Samoylov, A. V., Bessonov, V. V., Nikolaeva, Yu. V., Tarasova, V. V., Pilipenko, O. V. (2020). Influence of antioxidants in native and micellated forms on shelf life of emulsion fat product. *Voprosy Pitania*, 89(5), 101-109. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10070> EDN: <https://elibrary.ru/wwgvza>
 9. Bliznyuk, U. A., Borshchegovskaya, P. Yu., Zubritskaya, Ya. V., Ipatova, V. S., Malyuga, A. A., Rozanov, V. V., Chernyaev, A. P., Chulikova, N. S., Yurov, D. S. (2023). Effect of ionizing radiation on germination and biometric indicators of oilseed crops. *Technologies of Living Systems*, 20(1), 79-89. <https://doi.org/10.18127/j.20700997-202301-09> EDN: <https://elibrary.ru/ouawqp>
 10. Timakova, R. T., Tikhonov, S. L., Tikhonova, N. V. (2020). Ionizing radiation treatment as an innovative process approach in food storage technology for modern agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 421(2):022015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/2/022015>. EDN: <https://elibrary.ru/uxncvj>
 11. Timakova, R., Akulich, A., Samuylenko, T. (2021). The role of biotechnology in ensuring the preservation of dry composite mixtures. *E3S Web of Conferences*, 254:10018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125410018>. EDN: <https://elibrary.ru/ugnqmq>
 12. Timakova, R., Efremova, S., Zuparova, V. (2021). Ways to improve the technological properties of commercial grain and ensure its preservation. *AIP Conference Proceedings*, 2419:020017. <https://doi.org/10.1063/5.0069615>. EDN: <https://elibrary.ru/hlylxv>
 13. Тутельян, В. А. (2012). *Химический состав и калорийность российских продуктов питания: Справочник*. М.: Дели Принт. 283 с. ISBN: 978-5-905170-20-1. EDN: <https://elibrary.ru/qmcskv>
 14. Ahmad, F., Mohammad, Z. H., Zaidi, S. F., Ibrahim, S. A. (2023). A comprehensive review on the application of ultrasound for the preservation of fruits and vegetables. *Journal of Food Process Engineering*, 46(6), 1-27. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14291>. EDN: <https://elibrary.ru/uwgvge>
 15. Medvid, O. O., Peredera, Zh. O., Shcherbakova, N. S., Peredera, S. B. (2023). Analysis of the Italian honey market. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*, 25(112), 16-21. <https://doi.org/10.32718/nvlvet11202>. EDN: <https://elibrary.ru/uinegb>
 16. Andersen, N. R., Petersen, R. van D, Frost, M. B. (2022). Consumer interest in hummus made from different pulses: Effects of information about origin and

- variety seeking tendency. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 29(1):100572. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100572>. EDN: <https://elibrary.ru/fxcjkk>
17. Anderson, N. M. (2018). Recent Advances in Low Moisture Food Pasteurization. *Current Opinion in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.11.001>
18. Coulombe, G., Tamber, S. (2022). Salmonella enterica Outbreaks Linked to the Consumption of Tahini and Tahini-Based Products. *Microorganisms*, 10(11):2299. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112299>. EDN: <https://elibrary.ru/jgroig>
19. Mousavi, Z. E., Hunt, K., Koolman, L., Butler, F., Fanning, S. (2023). Cronobacter Species in the Built Food Production Environment: A Review on Persistence, Pathogenicity, Regulation and Detection Methods. *Microorganisms*, 11, 2-24. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061379>. EDN: <https://elibrary.ru/nsjdza>
20. Davidson, A. (2014). *The Oxford Companion to Food*. Oxford: University Press. 921 p. (pp. 802-803). <https://doi.org/10.1093/acref/9780199677337.001.0001>
21. Lang, E., Rhee, M. S., Gonçalves, M. P. M. B. B., Sant'Ana, A. A. (2023). Desiccation strategies of Cronobacter sakazakii to survive in low moisture foods and environment. *Trends in Food Science & Technology*. 104241. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104241>. EDN: <https://elibrary.ru/ucorby>
22. Al-Qadiri, H., Amr, A., Al-Holy, M. A., Shahein, M. (2021). Effect of gamma irradiation against microbial spoilage of hummus preserved under refrigerated storage. *Food Science and Technology International*, 27(7), 598-607. <https://doi.org/10.1177/1082013220975891>. EDN: <https://elibrary.ru/kjvtfd>
23. Esen, E., Turga, Ö. (2023). Prevention of the Growth of Salmonella Spp. and Listeria Spp. in Tahini by Using Antagonistic Microorganisms. *Çukurova Tarım Ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 38(1), 26-39. <https://doi.org/10.36846/CJAFS.2023.96>. EDN: <https://elibrary.ru/hmxuhs>
24. Grasso, E. M., Stam, C. N., Anderson, N. M., Krishnamurthy, K. (2014). Heat and steam treatments. In: *The microbiological safety of low water activity foods and spices*. Springer. P. 403-426. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2062-4_21
25. Al-Nabulsi, A. A., Osaili, T. M., Olaimat, A. N., Almasri, W. E., Ayyash, M., Al-Holy, M. A., Jaradat, Z. W., Obaid, R. S., Holley, R. A. (2020). Inactivation of Salmonella spp. in tahini using plant essential oil extracts. *Food microbiology*, 86:103338. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103338>. EDN: <https://elibrary.ru/zrezxq>
26. Olaimat, A. N., Al-Nabulsi, A. A., Osaili, T. M., Al-Holy, M., Ghoush, M. A., Alkhalidy, H., Jaradat, Z. W., Ayyash, M., Holley, R. A. (2022). Inactivation of

- stressed *Salmonella enterica*, *Escherichia coli* O157:H7, and *Listeria monocytogenes* in hummus using low dose gamma irradiation. *Journal of Food Science*, 87(2), 845-855. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16036>. EDN: <https://elibrary.ru/pyndjc>
27. Loots, M., Chidamba, L., Korsten, L. (2021). Microbial load and prevalence of *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. in macadamia nut production systems. *Journal of Food Protection*, 84(6), 1088-1096. <https://doi.org/10.4315/JFP-20-238>. EDN: <https://elibrary.ru/dczecw>
28. Mainardi, P. H., Bidoia, E. D. (2024). Food safety management: preventive strategies and control of pathogenic microorganisms in food. *European Journal of Biological Research*, 14(1), 13-32. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10724672>
29. Topcam, H., Coşkun, E., Son, E., Kütük, D., Aytaç, S. A., Mert, B., Ozturk, S., Erdogdu, F. (2023). Microwave decontamination processing of tahini and process design considerations using a computational approach. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 86:103137. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103377>. EDN: <https://elibrary.ru/ahugmg>
30. Osaili, T. M., Al-Nabulsi, A. A., Aljaafreh, T. F. (2018). Use of gamma radiation to inactivate stressed *Salmonella* spp., *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in tahini halva. *Food Microbiology*, 278, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.04.029>
31. Sánchez-Maldonado, A. F., Lee, A., Farber, J. M. (2018). Methods for the control of foodborne pathogens in low-moisture foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 177-208. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012304>. EDN: <https://elibrary.ru/vhacny>
32. Olaimat, A. N., Al-Holy, M. A., Abughoush, M. H., Daseh, L., Al-Nabulsi, A. A., Osaili, T. M., Al-Rousan, W., Maghaydah, S., Ayyash, M., Holley, R. A. (2023). Survival of *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* in date palm paste and syrup at different storage temperatures. *Journal of Food Science*, 88(7), 2950-2959. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16620>. EDN: <https://elibrary.ru/xbxxgn>
33. Szpinak, V., Ganz, M., Yaron, S. (2022). Factors affecting the thermal resistance of *Salmonella* Typhimurium in tahin. *Food Research International*, 155:111088. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111088>. EDN: <https://elibrary.ru/lrpfk>
34. Al-Nabulsi, A. A., Olaimat, A. N., Osaili, T. M., Shaker, R. R., Elabedeen, N. Z., Jaradat, Z. W., Abushelaibi, A., Holley, R. A. (2014). Use of acetic and citric acids to control *Salmonella* Typhimurium in tahini (sesame paste). *Food Microbiology*, 42, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.020>

Список литературы

1. Ягафар, М. К., Гайнутдинов, Т. Р., Идрисов, А. М., Рахматуллина, Г. И., Юнусов, И. Р. (2022). Оценка биологической безопасности облученных кормов и пищевых продуктов. *Ветеринарный врач*, (2), 21-28. <https://doi.org/10.33632/1998-698>. EDN: <https://elibrary.ru/thkguc>
2. Булатова, А. Г., Сергеева, Г. А. (2021). *Традиционная культура питания народов Дагестана*. М.: Проспект. 96 с. ISBN: 978-5-392-34147-4. EDN: <https://elibrary.ru/sjdyb>
3. Danyo, E. K., Ivantsova, M. N., Selezneva, I. S. (2024). Ionizing radiation effects on microorganisms and its applications in the food industry. *Foods and Raw Materials*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-583>. EDN: <https://elibrary.ru/xicyhk>
4. Kushch, I. V., Vanner, N. E., Udavliev, D. I., Muradova, M. D. (2019). Microbiological Safety of Honey. *Health, Food & Biotechnology*, 1(3), 106-117. <https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i3.s267>. EDN: <https://elibrary.ru/syvgzy>
5. Мордкович, Я. Б., Баранова, Л. И. (2023). Перспективы использования радиационной дезинсекции для карантинного фитосанитарного обеззараживания. *Фитосанитария. Карантин растений*, (3), 60-64. <https://doi.org/10.69536/u8906-0079-0762-a>. EDN: <https://elibrary.ru/xrbxzc>
6. Рамазанова, З. Б., Гаджалова, Ф. А. (2023). Дагестанские традиционные блюда и продукты питания как маркер народной культуры и бренд региона. *Наследие веков*, (2), 31-45. <https://doi.org/10.36343/SB.2023.34.2.002>. EDN: <https://elibrary.ru/iytxow>
7. Саруханов, В. Я., Шестериков, А. Ю., Помясова, М. Г., Харламов, В. А., Полякова, И. В., Карпенко, Е. И. (2022). Систематизация результатов экспериментальных исследований и создание базы данных «Радиационная обработка сельскохозяйственного сырья и пищевой продукции». *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*, 31(3), 37-47. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-3-37-47>. EDN: <https://elibrary.ru/adzllr>
8. Нечаев, А. П., Самойлов, А. В., Бессонов, В. В., Николаева, Ю. В., Тарасова, В. В., Пилипенко, О. В. (2020). Влияние антиоксидантов в нативной и мицеллированной формах на сроки годности эмульсионного жирового продукта. *Вопросы питания*, 89(5), 101-109. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10070>. EDN: <https://elibrary.ru/wwgwza>
9. Близнюк, У. А., Борщеговская, П. Ю., Зубрицкая, Я. В., Ипатова, В. С., Малюга, А. А., Розанов, В. В., Черняев, А. П., Чуликова, Н. С., Юров, Д. С. (2023). Влияние ионизирующего излучения на всхожесть и биометри-

- ческие показатели масличных культур. *Технологии живых систем*, 20(1), 79-89. <https://doi.org/10.18127/j.20700997-202301-09>. EDN: <https://elibrary.ru/ouawqp>
10. Timakova, R. T., Tikhonov, S. L., Tikhonova, N. V. (2020). Ionizing radiation treatment as an innovative process approach in food storage technology for modern agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 421(2):022015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/2/022015>. EDN: <https://elibrary.ru/uxncvj>
 11. Timakova, R., Akulich, A., Samuylenko, T. (2021). The role of biotechnology in ensuring the preservation of dry composite mixtures. *E3S Web of Conferences*, 254:10018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125410018>. EDN: <https://elibrary.ru/ugnqnm>
 12. Timakova, R., Efremova, S., Zuparova, V. (2021). Ways to improve the technological properties of commercial grain and ensure its preservation. *AIP Conference Proceedings*, 2419:020017. <https://doi.org/10.1063/5.0069615>. EDN: <https://elibrary.ru/hlylxv>
 13. Тутельян, В. А. (2012). *Химический состав и калорийность российских продуктов питания: Справочник*. М.: Дели Принт. 283 с. ISBN: 978-5-905170-20-1. EDN: <https://elibrary.ru/qmcskv>
 14. Ahmad, F., Mohammad, Z. H., Zaidi, S. F., Ibrahim, S. A. (2023). A comprehensive review on the application of ultrasound for the preservation of fruits and vegetables. *Journal of Food Process Engineering*, 46(6), 1-27. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14291>. EDN: <https://elibrary.ru/uwgvve>
 15. Medvid, O. O., Peredera, Zh. O., Shcherbakova, N. S., Peredera, S. B. (2023). Analysis of the Italian honey market. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*, 25(112), 16-21. <https://doi.org/10.32718/nvlvet11202>. EDN: <https://elibrary.ru/uingcb>
 16. Andersen, N. R., Petersen, R. van D, Frost, M. B. (2022). Consumer interest in hummus made from different pulses: Effects of information about origin and variety seeking tendency. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 29(1):100572. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100572>. EDN: <https://elibrary.ru/fxcjkk>
 17. Anderson, N. M. (2018). Recent Advances in Low Moisture Food Pasteurization. *Current Opinion in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.11.001>
 18. Coulombe, G., Tamber, S. (2022). Salmonella enterica Outbreaks Linked to the Consumption of Tahini and Tahini-Based Products. *Microorganisms*, 10(11):2299. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112299>. EDN: <https://elibrary.ru/jgroig>

19. Mousavi, Z. E., Hunt, K., Koolman, L., Butler, F., Fanning, S. (2023). Cronobacter Species in the Built Food Production Environment: A Review on Persistence, Pathogenicity, Regulation and Detection Methods. *Microorganisms*, 11, 2-24. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061379>. EDN: <https://elibrary.ru/nsjdza>
20. Davidson, A. (2014). *The Oxford Companion to Food*. Oxford: University Press. 921 p. (pp. 802-803). <https://doi.org/10.1093/acref/9780199677337.001.0001>
21. Lang, E., Rhee, M. S., Gonçalves, M. P. M. B. B., Sant'Ana, A. A. (2023). Desiccation strategies of Cronobacter sakazakii to survive in low moisture foods and environment. *Trends in Food Science & Technology*. 104241. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104241>. EDN: <https://elibrary.ru/ucorby>
22. Al-Qadiri, H., Amr, A., Al-Holy, M. A., Shahein, M. (2021). Effect of gamma irradiation against microbial spoilage of hummus preserved under refrigerated storage. *Food Science and Technology International*, 27(7), 598-607. <https://doi.org/10.1177/1082013220975891>. EDN: <https://elibrary.ru/kjvtfd>
23. Esen, E., Turga, Ö. (2023). Prevention of the Growth of Salmonella Spp. and Listeria Spp. in Tahini by Using Antagonistic Microorganisms. *Çukurova Tarım Ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 38(1), 26-39. <https://doi.org/10.36846/CJAFS.2023.96>. EDN: <https://elibrary.ru/hmxuhs>
24. Grasso, E. M., Stam, C. N., Anderson, N. M., Krishnamurthy, K. (2014). Heat and steam treatments. In: *The microbiological safety of low water activity foods and spices*. Springer. P. 403-426. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2062-4_21
25. Al-Nabulsi, A. A., Osaili, T. M., Olaimat, A. N., Almasri, W. E., Ayyash, M., Al-Holy, M. A., Jaradat, Z. W., Obaid, R. S., Holley, R. A. (2020). Inactivation of Salmonella spp. in tahini using plant essential oil extracts. *Food microbiology*, 86:103338. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103338>. EDN: <https://elibrary.ru/zrezxq>
26. Olaimat, A. N., Al-Nabulsi, A. A., Osaili, T. M., Al-Holy, M., Ghoush, M. A., Alkhalid, H., Jaradat, Z. W., Ayyash, M., Holley, R. A. (2022). Inactivation of stressed Salmonella enterica, Escherichia coli O157:H7, and Listeria monocytogenes in hummus using low dose gamma irradiation. *Journal of Food Science*, 87(2), 845-855. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16036>. EDN: <https://elibrary.ru/pyndjc>
27. Loots, M., Chidamba, L., Korsten, L. (2021). Microbial load and prevalence of Escherichia coli and Salmonella spp. in macadamia nut production systems. *Journal of Food Protection*, 84(6), 1088-1096. <https://doi.org/10.4315/JFP-20-238>. EDN: <https://elibrary.ru/dczecw>
28. Mainardi, P. H., Bidoia, E. D. (2024). Food safety management: preventive strategies and control of pathogenic microorganisms in food. *European Journal of Biological Research*, 14(1), 13-32. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10724672>

29. Topcam, H., Coşkun, E., Son, E., Kütük, D., Aytaç, S. A., Mert, B., Ozturk, S., Erdogdu, F. (2023). Microwave decontamination processing of tahini and process design considerations using a computational approach. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 86:103137. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103377>. EDN: <https://elibrary.ru/ahugmg>
30. Osaili, T. M., Al-Nabulsi, A. A., Aljaafreh, T. F. (2018). Use of gamma radiation to inactivate stressed *Salmonella* spp., *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in tahini halva. *Food Microbiology*, 278, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.04.029>
31. Sánchez-Maldonado, A. F., Lee, A., Farber, J. M. (2018). Methods for the control of foodborne pathogens in low-moisture foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 177-208. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012304>. EDN: <https://elibrary.ru/vhacny>
32. Olaimat, A. N., Al-Holy, M. A., Abughoush, M. H., Daseh, L., Al-Nabulsi, A. A., Osaili, T. M., Al-Rousan, W., Maghaydah, S., Ayyash, M., Holley, R. A. (2023). Survival of *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* in date palm paste and syrup at different storage temperatures. *Journal of Food Science*, 88(7), 2950-2959. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16620>. EDN: <https://elibrary.ru/xbxxgn>
33. Szpinak, V., Ganz, M., Yaron, S. (2022). Factors affecting the thermal resistance of *Salmonella* Typhimurium in tahin. *Food Research International*, 155:111088. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111088>. EDN: <https://elibrary.ru/lrpfk>
34. Al-Nabulsi, A. A., Olaimat, A. N., Osaili, T. M., Shaker, R. R., Elabedeen, N. Z., Jaradat, Z. W., Abushelaibi, A., Holley, R. A. (2014). Use of acetic and citric acids to control *Salmonella* Typhimurium in tahini (sesame paste). *Food Microbiology*, 42, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.020>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Roza T. Timakova: led the project, developed the concept of the article, conducted theoretical research, organized and participated in experimental studies, including radiation treatment, and drew conclusions based on the research results.

Andrey A. Khlopov: conducted theoretical research, participated in experimental studies and in drawing conclusions based on the research results.

Elena S. Lybenko: conducted theoretical research, participated in experimental studies and in drawing conclusions based on the research results.

Sergey O. Nikitin: organized and participated in experimental research on radiation treatment and subsequent analysis of research results.

ВКЛАД АВТОРОВ

Тимакова Р.Т.: руководила проектом, формировала концепцию статьи, осуществляла теоретическое исследование, организовывала и участвовала в проведении экспериментальных исследований, в том числе по обработке излучением, занималась формированием выводов по результатам исследований.

Хлопов А.А.: осуществлял теоретическое исследование, участвовал в проведении экспериментальных исследований и в формировании выводов по результатам исследований.

Лыбенко Е.С.: осуществляла теоретическое исследование, участвовала в проведении экспериментальных исследований и в формировании выводов по результатам исследований.

Никитин С.О.: организовывал и участвовал в проведении экспериментальных исследований по обработке излучением и последующем анализе результатов исследований.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Roza T. Timakova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Ural State Economic University

62, 8 Marta Str., Ekaterinburg, 620144, Russian Federation

trt64@mail.ru

SPIN code: 7663-1784

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4777-1465>

ResearcherID: C-3922-2018

Scopus Author ID: 57203766629

Andrey A. Khlopov, Candidate of Agricultural Sciences

Vyatka State Agrotechnological University

133, Oktyabrsky Ave., Kirov, 610017, Russian Federation

akhlopov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3774-4329>

Elena S. Lybenko, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

Vyatka State Agrotechnological University

133, Oktyabrsky Ave., Kirov, 610017, Russian Federation

elenalybenko@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8853-1903>

Sergey O. Nikitin, General Director

“RCOT “Era” LLC

16, room 201, Seventh line, Ozersk, Chelyabinsk region, 456780, Russian Federation

era@po-mayak.ru

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Тимакова Роза Темерьяновна, д.т.н., доцент

Уральский государственный экономический университет

ул.8 Марта, 62, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

trt64@mail.ru

Хлопов Андрей Анатольевич, канд. с.-х. наук

Вятский государственный агротехнологический университет

Октябрьский пр-т, 133, г. Киров, 610017, Российская Федерация

akhlopov@yandex.ru

Лыбенко Елена Сергеевна, канд. с.-х. наук, доцент

Вятский государственный агротехнологический университет

Октябрьский пр-т, 133, г. Киров, 610017, Российская Федерация

elenalybenko@rambler.ru

Никитин Сергей Олегович, генеральный директор

ООО «РЦОТ «Эра»

ул. Седьмая линия, 16, пом. 201, г. Озерск, Челябинская область, 456780, Российская Федерация

era@po-mayak.ru

Поступила 05.09.2024

После рецензирования 11.10.2024

Принята 07.11.2024

Received 05.09.2024

Revised 11.10.2024

Accepted 07.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1193

EDN: TSSNMC

УДК 54-03:547-3:616.995.121:619



Научная статья

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТВЕРДОЙ ДИСПЕРСИИ ФЕНБЕНДАЗОЛА И ИВЕРМЕКТИНА НА ОСНОВЕ ЭКСТРАКТА СОЛОДКИ ДЛЯ ТЕРАПИИ ОВЕЦ ПРИ ПАРАЗИТАРНЫХ ИНВАЗИЯХ

*В.А. Марченко, С.С. Халиков, Ю.А. Василенко, Е.А. Ефремова,
М.С. Халиков, М.М. Ильин, А. Сазманд*

Аннотация

Обоснование. Зоопаразитокомплекс овец Горного Алтая характеризуется разнообразием и представлен практически всеми основными классами возбудителей инвазионных заболеваний – нематодами, трематодами, цестодами и паразитическими членистоногими.

Цель. Разработать и охарактеризовать паразитоцидную активность нового комплексного терапевтического средства, обладающего широким спектром действия, позволяющего минимизировать объем и кратность применения препарата.

Материалы и методы. Методами механохимической модификации субстанций фенбендазола (ФБЗ) и ивермектина (ИВМ) с помощью экстракта солодки (ЭС) приготовлены композиции в виде твердых дисперсий, которые обладают повышенной растворимостью. Композиции были изучены против гельминтов желудочно-кишечного тракта на спонтанно инвазированных овцах. Были сформированы опытные и контрольные группы животных по 7-20 голов. Скармливание проводили образцами композиций с различными дозами субстанций. Паразитоцидная активность характеризовалась путем овоскопических обследований проб фекалий опытных и контрольных животных.

Результаты. Установлено, что паразитарное средство в виде твердой дисперсии, полученной из фенбендазола и ивермектина с экстрактом солодки, в дозе по фенбендазолу (3 мг/кг массы животного), ивермектину (0,2 мг/кг массы животного) показало 100%-ную эффективность при стронгилятозах желудочно-кишечного тракта и дыхательной системы, а также при мониезиозе и дикроцелиозе овец. Инсектицидная эффективность препарата при мелофагозе составили 89,5%.

Заключение. Путем механохимической модификации субстанций ФБЗ и ИВМ в присутствии экстракта солодки получен комплексный терапевтический препарат, обладающий повышенной растворимостью и широким спектром паразитоцидной активности, позволяющим минимизировать объем и кратность применения препарата.

Ключевые слова: гельминты; овцы; ивермектин; фенбендазол; механохимия; твердые дисперсии; паразитоцидная активность

Для цитирования. Марченко, В. А., Халиков, С. С., Василенко, Ю. А., Ефремова, Е. А., Халиков, М. С., Ильин, М. М., & Сазманд, А. (2025). Эффективность твердой дисперсии фенбендазола и ивермектина на основе экстракта солодки для терапии овец при паразитарных инвазиях. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 453-479. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1193>

Original article

EFFICACY OF SOLID DISPERSION OF FENBENDAZOLE AND IVERMECTIN BASED ON LICORICE EXTRACT FOR THERAPY OF SHEEP WITH PARASITIC INVASIONS

*V.A. Marchenko, S.S. Khalikov, Yu.A. Vasilenko, E.A. Efremova,
M.S. Khalikov, M.M. Ilyin, A. Sazmand*

Abstract

Background. The zooparasitic complex of sheep in the Altai Mountains is characterized by diversity and is represented by almost all the main classes of pathogens of invasive diseases – nematodes, trematodes, cestodes and parasitic arthropods.

Purpose. To develop and characterize the parasitocidal activity of a new complex therapeutic agent with a broad spectrum of action, allowing for minimization of the volume and frequency of drug use.

Materials and methods. Using the methods of mechanochemical modification of fenbendazole (FBZ) and ivermectin (IVM) substances with the help of licorice extract (LE), compositions in the form of solid dispersions with increased solubility were prepared. The compositions were studied against helminths of the gastrointestinal tract on spontaneously infested sheep. Experimental and control groups of animals were formed, consisting of 7-20 heads. Feeding was carried out with samples of compositions with different doses of substances.

Results. Parasitic activity was characterized by ovoscopic examinations of fecal samples of experimental and control animals. It was established that the parasitic agent in the form of a solid dispersion obtained from fenbendazole and ivermectin with licorice extract, in a dose of FBZ (3 mg / kg of animal weight), IVM (0.2 mg / kg of animal weight) showed 100% effectiveness in strongylosis of the gastrointestinal tract and respiratory system, as well as in moniezia and dicrocoeliasis of sheep. The insecticidal effectiveness of the drug in melofagosis was 89.5%.

Conclusion. By means of mechanochemical modification of the substances of FBZ and IVM in the presence of licorice extract, a complex therapeutic drug was obtained that has increased solubility and a wide spectrum of parasitocidal activity, allowing to minimize the volume and frequency of drug application.

Keywords: helminths; sheep; ivermectin; fenbendazole; mechanochemistry; solid dispersions; parasitocidal activity

For citation. Marchenko, V. A., Khalikov, S. S., Vasilenko, Yu. A., Efremova, E. A., Khalikov, M. S., Ilyin, M. M., & Sazmand, A. (2025). Efficacy of solid dispersion of fenbendazole and ivermectin based on licorice extract for therapy of sheep with parasitic invasions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 453-479. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1193>

Введение

Паразитозы сельскохозяйственных животных имеют повсеместное распространение и существенно снижают продуктивность и качество получаемой продукции [10]. Смешанные инвазии у животных, обусловленные эндо- и эктопаразитами, являются наиболее часто встречающейся формой проявления паразитарной патологии [9; 28].

Подобный уровень зараженности предполагает проведение регулярных противопаразитарных мероприятий с использованием препаратов с широким спектром паразитоцидной активности, обладающих в первую очередь нематодоцидным и цестодоцидным действием.

В ветеринарной практике широко применяются различные препаративные формы паразитоцидов на основе субстанций макролидов и бензимидазолов [1]. Однако они обладают ограниченным спектром активности и не позволяют контролировать одновременно весь комплекс паразитических беспозвоночных. Возбудители арахноэнтомозов и гельминтозов как компоненты паразитоцинозов обитают на хозяевах в различных ассоциациях, обуславливая многовекторное вредоносное влияние. Паразитические насекомые и клещи в сочетании друг с другом, а также с гельминтами вызывают наиболее тяжёлое течение болезней, которое характеризуется многообра-

нием негативных воздействий на организм хозяина, приводят к возникновению вторичного иммунодефицита, нарушениям механизмов гомеостаза макроорганизма [10; 17]. Поэтому профилактика и лечение смешанных гельминтозов – одна из наиболее актуальных задач современной ветеринарии.

Одним из широко применяемых антигельминтиков для борьбы с гельминтозами является фенбендазол (синонимы: панакур, фебтал, фенкур), который, в основном, обладает нематодоцидным действием в дозе 5-10 мг/кг [3; 20]. Фенбендазол применяют на овцах, козах и крупном рогатом скоте против гельминтозов, включая желудочно-кишечные стронгилятозы, диктиокаулез, стронгилидоз, трихоцефалез; на лошадях против параскаридоза, стронгилидозов; на плотоядных против токсокароза, токсаскаридоза, унцинариоза и других нематодозов. Препарат безопасен для организма животных, не обладает побочным действием. Назначают его перорально с кормом в дозе 5 мг/кг овцам, 10 мг/кг - молодняку крупного рогатого скота, 50 мг/кг три дня подряд - собакам, 10-15 мг/кг - лошадям [20].

Недостатком фенбендазола является низкая растворимость в воде, плохая абсорбция слизистой оболочкой кишечника и, как следствие, плохая биодоступность и высокие дозы против гельминтозов, особенно плотоядных животных [18; 28; 34]. Другим недостатком этого препарата является то, что он не активен в отношении эктопаразитов [1].

В последние годы разработаны и предложены к применению новые противопаразитарные препараты, которые имеют широкий спектр действия против многих эндо- и эктопаразитов животных и птиц. К числу таких препаратов относятся антигельминтики на основе субстанции ивермектина, который является высокоэффективным лечебным средством против нематод и эктопаразитов [21; 22]. Инъекционные препараты на основе ивермектина, в которых в качестве растворителя используются такие вещества, как глицероформаль, пропиленгликоль и поливинилпирролидон, имеют ряд недостатков. Эти лекарственные формы обладают высокой вязкостью, что затрудняет инъекцию, вызывают раздражение и другие реакции в месте введения, а в результате преципитации ивермектина в тканях могут оказывать токсическое действие на организм животных. Также недостатком ивермектина и его лекарственных форм является ограниченный спектр его противопаразитарного действия: антигельминтики не обладают противоцестодозным действием и неэффективны при трематодозах животных.

Разработана двухкомпонентная противопаразитарная композиция из твердых дисперсий альбендазола с полимерным веществом арабиногалактаном и ивермектина с арабиногалактаном, при следующем соотношении

компонентов, масс. %: альбендазол - 3,0; ивермектин - 0,3; арабиногалактан 12,8 [28]. Однако противопаразитарный препарат альбендазол активен в основном на кишечных паразитов и не обладает широким спектром действия. А арабиногалактан, используемый в препарате, не нашел широкого применения из-за высокой стоимости. Данная композиция также требует введения наполнителя (бланозы), что значительно повышает трудоемкость ее применения в условиях производственного овцеводства.

Экстракт солодки (ЭС) получают [12; 13] переработкой солодкового корня из трех основных видов солодки:

- солодки голой (*Glycyrrhiza glabra* L.),
- солодки уральской (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch) ,
- солодки Коржинского (*G. Korshinskyi* Grig.)

Полезные свойства ЭС объясняются наличием в ней до 25% глицирризиновой кислоты (ГК), являющегося тритерпеновым сапонином [12], которая обладает широким спектром биологической активности и используется для лечения различных заболеваний: от обычной простуды до язвы желудка и двенадцатиперстной кишки. Кроме того, в присутствии ГК наблюдается значительное усиление терапевтического действия многих лекарственных соединений, а в некоторых случаях даже изменение его механизма.

Учитывая дороговизну ГК, обоснованным следует рассматривать возможность использования более доступного и дешевого ЭС для модификации субстанций лекарственных субстанций. На примере субстанции фенбендазола было показано значительное увеличение растворимости и биодоступности фенбендазола со значительным повышением антигельминтной активности [2; 5].

Целью настоящего исследования является разработка нового терапевтического средства при паразитарных инвазиях овец на основе твердой дисперсии фенбендазола и ивермектина с экстрактом солодки, получаемой методами механохимической модификации.

Материалы и методы исследования

В работе использованы следующие субстанции антигельминтиков:

- *Фенбендазол (ФБЗ)* – 5-(фенилтио)-2-бензимидазолкарбамат (99.0%) производства Changzhou Yabang Pharmaceuticals Co. Ltd (Китай). Растворимость в воде 0,01 мг/л (<http://rupest.ru/ppdb/fenbendazole.html>).

- *Ивермектин (ИВМ)* – субстанция (сод. 97,5%) производства Shandong Qilu King-Phar Pharmaceutical Co. Ltd. (Китай). Растворимость в воде 4,0 мг/л (<http://rupest.ru/ppdb/ivermectin.html>).

В качестве полимерного веществ, предназначенного для модификации субстанций, использовали *экстракт солодки (ЭС)* – сухой мелкодисперсный порошок от светло- до темно-коричневого цвета с содержанием 25% глицирризиновой кислоты, декларация соответствия TCN RU Д–RU.AF96.B.00958. – производство ООО “Вистерра”, Алтайский край (Россия).

Для получения противопаразитарных композиций использовали метод механохимической модификации антигельминтных субстанций ФБЗ и ИВМ полимерным веществом – экстрактом солодки в условиях [15]. При этом были получены твердые дисперсии составов ФБЗ:ЭС (1:4) и ИВМ:ЭС (1:4), которые обладали повышенной растворимостью.

Изменение растворимости композиций проводили путем определения концентрации ФБЗ и ИВМ после растворения полученных твердых дисперсий ФБЗ:ЭС (1:4) и ИВМ:ЭС (1:4) в воде, используя метод ВЭЖХ, описанный ранее [16]. Погрешность анализа составляла $\pm 3\%$.

Технология получения противопаразитарного средства

Сухие твердые дисперсии составов ФБЗ:ЭС (1:4) и ИВМ:ЭС (1:4), в предварительно рассчитанных соотношениях, смешивали в металлическом барабане валковой мельницы LE-101 с добавлением стальных шаров (диаметр 25 мм; масса шара 54 г) до образования однородной массы, получая таким образом композицию, готовую к применению. Животных выпаивали солодковой суспензией фенбендазола и ивермектина, которую получали путем разбавления композиции водой (при массовом соотношении вода/ концентрат, 1:30) и перемешивания до образования однородной и стабильной суспензии.

Исследование паразитоцидной активности препаратов

Исследование проводили по принципу “контрольный тест”, оно было рандомизированно, плацебоконтролируемо и в соответствии с Руководством для экспериментального (доклинического) изучения новых фармакологических веществ [14] и правил принятых Европейской конвенцией по защите позвоночных животных, используемых в экспериментальных и других научных целях [24]. Овцы, используемые в опытах, были спонтанно (естественно) заражены кишечными стронгилятами, мониезиями, кроцециями и кровососками.

Гельминтозы овец

В эксперименте использованы сто голов 6-8 месячных овец горноалтайской породы весом 25 – 30 кг, спонтанно (самопроизвольно) зараженные кишечными стронгилятами и *Moniezia* spp. из частного хозяйства И. П. Шадрина Шебалинского района Республики Алтай. Во время экспери-

мента овцы не паслись на пастбище, но содержались в помещении и кормились по нормам и рационам кормления скота [6]. В ходе эксперимента вода животным предоставлялась без ограничений.

За 3 дня до постановки опыта проводили исследования фекалий флотационным методом по Котельникову-Хренову, методом последовательных промываний с подсчетом яиц кишечных гельминтов и дикроцелий в камере ВИГИС [8].

Затем случайным образом распределяли овец в экспериментальные группы со сходной степенью заражения для дальнейшего определения доли зараженных животных (%), средних арифметического и геометрического числа яиц в грамме фекалий [7].

Мелофагоз овец

В эксперименте использовались те же животные, что и при изучении эффективности при гельминтозах (2.3.1.). За 3-4 дня до постановки опыта животных обследовали на зараженность взрослыми формами овечьей кровососки (*Melophagus ovinus* L.).

Обследовалось все руно овец, мертвые особи кровососок не учитывались. По результатам обследований определяли долю зараженных животных (%), среднее арифметическое и среднее геометрическое значения количества кровососок на животном.

Экспериментальные группы

Из спонтанно инвазированных гельминтами и эктопаразитами овец сформировали 6 групп: опытные - по 10-15 голов, контрольные - по 20-25 голов. Животным 2-, 3-, 4-й групп задавали индивидуально перорально испытуемое противопаразитарное средство в виде водных суспензий, включающее соответственно комплекс фенбендазола с экстрактом солодки в дозах 1, 2 и 3 мг/кг м.ж. по ФБЗ и комплекс ивермектина с экстрактом солодки в дозе 0,2 мг/кг м.ж. по ИВМ.

Животным 5-й и 6-й групп вводили индивидуально перорально соответственно водные суспензии базовых препаратов - субстанций ФБЗ и ИВМ в регламентируемых изготовителем дозах: 0,2 мг/кг – для ивермектина, 10 мг/кг - для фенбендазола.

Овцы контрольной группы получали плацебо (0.5%-ную суспензию бланозы в дозе 1.0 мл на кг массы животного).

Процедуры с животными

Овцы экспериментальных групп перед постановкой опытов взвешивали и отмечали бирками (нумеровали). Пробы кала для оценки зараженности гельминтами брали непосредственно из прямой кишки животных.

Эффективность образцов композиций паразитоцидов против кишечных стронгилят, мониезий и дикроцелий овец определяли по результатам копроовоскопических обследований животных с вычислением доли зараженных животных (%), средних арифметического и среднего геометрического значений количества яиц гельминтов в пробах до, через 15 (стронгиляты и мониезии) и 30 суток (дикроцелии) после дегельминтизации животных опытной и контрольной групп.

Эффективность композиций препаратов против овечьих кровососок определяли на 15-е сутки после введения препарата путем обследования руна овец опытных и контрольной групп животных с подсчетом средних геометрических значений количества живых паразитов.

Исследования были проведены в соответствии с рекомендациями по оценке эффективности антигельминтиков у жвачных животных (крупного рогатого скота, овец, коз) Всемирной ассоциации развития ветеринарной паразитологии [35].

Исследовали такие клинические параметры овец, как показания температуры, частоты пульса, частоты дыхания, движения рубца и поведения. Животных обследовали до и после первого, третьего и пятого дня приема препарата. Исследования проводили каждый день утром до кормления по методике ветеринарно-клинической лабораторной диагностики [7].

Оценка эффективности и статистический анализ данных

При копрологических обследованиях выводили показатели зараженности:

- ЭИ (EI), % - экстенсивность инвазии, доля зараженных животных;
- СЧ – среднее арифметическое значение количества яиц гельминтов в 1 грамме фекалий (я/гр. ф.) или экземпляров имаго кровососок на одно обследованное животное.

Для оценки паразитоцидной активности препаратов рассчитывались показатели:

- ЭЭ, (EE) % - экстенсэффективность, доля освободившихся животных от паразитов по отношению к контролю (не обработанные);
- ИЭ, (IE)% - интенсэффективность, снижение среднего показателя числа яиц по отношению к контролю (не обработанные) по методике, представленной ранее [27].

Также для сравнения паразитоцидной эффективности композиций проводили статистический анализ данных по среднему геометрическому значению количества яиц гельминтов или паразитов, использовали параметрический t-критерий для сравнения различий между опытными и контрольной группами животных при уровне значимости $P \leq 0.05$. Расчеты

проводили с помощью программного обеспечения SAS / Stat (версия №9 SAS, Система для Windows).

Результаты исследований

Исследование растворимости

Изучая растворимость образцов исходных субстанций, физических смесей и твердых дисперсий, полученных в процессе механохимической модификации субстанций ФБЗ и ИВМ экстрактом солодки, получили данные, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Растворимость исходных субстанций, их физических смесей и твердых дисперсий с экстрактом солодки

№	Образец, его состав, условия получения и содержание активной субстанции	Растворимость мг/л	
		абсолютная	увеличение
1	ФБЗ-исх.	1,0	-
2	Физ. смесь состава ФБЗ:ЭС=1:4; 20% ФБЗ	1,5	1,5
3	ТД состава ФБЗ:ЭС=1:4, 4 ч м/о; 20% ФБЗ	2,5	2,5
4	ИВМ-исх.	4,0	-
5	Физ. смесь ИВМ:ЭС=1:4; 20% ИВМ	5,0	1,3
6	ТД состава ИВМ:ЭС=1:4, 4 ч м/о; 20% ИВМ	18,7	4,7

Анализ данных табл. 1 подтверждает увеличение растворимости субстанций в полученных твердых дисперсиях до 2,5 раз (для ТД состава ФБЗ:ЭС) и 4,7 раза (для ТД состава ИВМ:ЭС).

Результаты испытаний паразитоцидной активности препаратов

После приема препаратов клинические параметры животных (температура тела, частота пульса, частота дыхания и поведение) оставались в пределах физиологической нормы. Результаты испытаний комплексов фенбендазола и ивермектина при стронгилятозах желудочно-кишечного тракта овец представлены в таблице 2.

Контрольные животные желудочно-кишечными стронгилятами заражены на 85% при средней численности (СЧ) 191.1 я/г. ф., трихосефалами на 25% при СЧ 14.9 я/г. ф., мониезиями зараженность животных составила 25,0 % при СЧ 14,3 я/г. ф., дикроцелиями – 30%, при СЧ 30.5 я/г. ф., овечьими кровососками на 100% при СЧ 17.1 экз.

В опытной группе №2, по которой оценивали активность композиции из фенбендазола 20%-ного в дозе 1 мг по действующему веществу (ДВ)–

ФБЗ на кг м.ж. и ивермектина 20%-ного в дозе 0.2 мг по ДВ – ИВМ на кг м.ж. экстенсивность (ЭЭ) составила 60.8%, интенсивность (ИЭ) – 95.3%, по среднегеометрическим значениям (Ef) – 43.5%. Эффективность композиции в дозировке по ФБЗ 2 и 3 мг кг м.ж. (группа 3 и 4) составила 100%.

Исходный препарат фенбендазола (группа 5), в дозировке 10 мг кг м.ж. показал достаточно высокую эффективность (ЭЭ – 76.5, ИЭ – 96.7, Ef – 36.1%), близкую по активности продемонстрировала исходная субстанция ивермектина (группа 6).

Таблица 2.

**Эффективность композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)
при желудочно-кишечных стронгилятозах овец**

№	Группа животных	Составы композиций и исходные препараты	Доза, мг ДВ на кг массы животного	Колич. животных.	Заражено (ЭИ), %	Сред. арифмет. и геометрич. число яиц/г фекалий	ЭЭ, %	ИЭ, %	Эффективность ^a (Ef), %	p-Value ^a
1	Контроль	Placebo	-	20	85.0	$\frac{191.1 \pm 31.1}{2.3 \pm 0.07}$	-	-	-	-
2	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 1.0 ИВМ 0.2	15	33.3	$\frac{9.5 \pm 4.1}{1.3 \pm 0.1}$	60.8	95.1	43.5	<0.05
3	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 2.0 ИВМ 0.2	15	0	0	100	100	100	NA
4	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 3.0 ИВМ 0.2	15	0	0	100	100	100	NA
5	Опытная	ФБЗ substance	10.0	10	20.0	$\frac{6.4 \pm 4.6}{1.47 \pm 0.17}$	76.5	96.7	36.1	<0.05
6	Опытная	ИВМ substance	0.2	10	20.0	$\frac{3.2 \pm 2.2}{1.2 \pm 0.1}$	76.5	98.3	47.8	<0.01

^a Percent efficacy based on geometric means.

Statistically significant at $P \leq 0.05$ when geometric means were compared to placebo.

NA – статистический анализ не применялся.

Результаты испытаний композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС при легочных стронгилятозах овец показаны в таблице 3.

Таблица 3.

**Эффективность композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)
при легочных стронгилятозах овец**

№	Группа животных	Составы композиций и исходные препараты	Доза, мг ДВ на кг массы животного	Кол-ч. жив-вотн.	Заражено (ЭИ), %	Сред. арифмет. и геометрич. число лич./г фекалий	ЭЭ, %	ИЭ, %	Эффективность ^a (Ef), %	p-Value ^a
1	Контроль	Placebo	-	20	75.0	66.7 ± 11.3 1.9 ± 0.05	-	-	-	-
2	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 1.0 ИВМ 0.2	15	30.0	7.7 ± 3.1 1.2 ± 0.13	60.0	88.5	36.9	< 0.01
3	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 2.0 ИВМ 0.2	15	26.6	4.9 ± 2.5 1.2 ± 0.12	86.2	95.1	54.9	< 0.05
4	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 3.0 ИВМ 0.2	15	0.0	$\frac{0}{0}$	100	100	100	NA
5	Опытная	ФБЗ substance	10.0	10	20.0	5.3 ± 3.6 1.41 ± 0.1	73.4	92.1	25.8	< 0.05
6	Опытная	ИВМ substance	0.2	10	30	4.8 ± 2.9 1.19 ± 0.08	60.0	92.8	37.4	< 0.05

В опытной группе 2 (табл. 3), по которой оценивали композицию фенбендазола и ивермектина при дозе ФБЗ 1 мг на кг м.ж. ЭЭ составила 60.0, ИЭ – 88.5, Ef – 36.9%. Эффективность этой же композиции в дозировке ФБЗ 2 мг кг м.ж. (группа 3) при легочных стронгилятозах оказалась значительно выше и составила по показателю ЭЭ – 86.2, показателю ИЭ – 95.1, Ef – 54.9%. Эффективность композиции в дозировке ФБЗ 3 мг кг м.ж. (группа 3) составила 100%. Исходные субстанции фенбендазола (группа 5) в дозе 10 мг на кг м.ж. и ивермектина (группа 6) также продемонстрировали выраженную активность при легочных стронгилятозах.

Результаты испытаний композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС при мониезиозе овец представлены в таблице 4.

В опытной группе 2 (табл. 4), по которой оценивалась композиция ФБЗ/ИВМ/ЭС в дозировках по ФБЗ:

- 1 мг на кг м.ж. ЭЭ составила 46.8%, ИЭ – 92.3%, Ef – 58.9%.
- 2 мг кг м.ж. (группа 3) ЭЭ составила 73.6%, ИЭ – 95.8%, Ef – 88.3%.
- 3 мг кг м.ж. (группа 4) при мониезиозе составила 100%.

Таблица 4.

**Эффективность композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)
при мониезиозе овец**

№	Группа животных	Составы композиций и исходные препараты	Доза, мг ДВ на кг массы животного	Колич. животно.	Заражено (ЭИ), %	Сред. арифмет. и геометрич. число яиц/г фекалий	ЭЭ, %	ИЭ, %	Эффективность ^а (Ef), %	p-Value ^а
1	Контроль	Placebo	-	20	25.0	14.3 ± 6.6 1.7 ± 0.12	-	-	-	-
2	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 1.0 ИВМ 0.2	15	13.3	1.1 ± 0.7 0.7 ± 0.1	46.8	92.3	58.9	< 0.05
3	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 2.0 ИВМ 0.2	15	6.6	0.6 0.2	73.6	95.8	88.3	NA
4	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 3.0 ИВМ 0.2	15	0.0	0 0	100	100	100	NA
5	Опытная	ФБЗ substance	10.0	10	20.0	0.5 ± 0.3 0.9 ± 0.5	20.0	96.5	47.1	> 0.05
6	Опытная	ИВМ substance	0.2	10	30.0	15.8 ± 6.7 1.6 ± 0.06	0	0	5.9	NA

Исходный фенбендазол (группа 5) в дозе 10 мг на кг м.ж. показал достаточно выраженную активность (ЭЭ – 20.0%, ИЭ – 96.5%, Ef – 47.1%), субстанция ивермектина (группа 6) не продемонстрировала паразитоцидной активности. Ввиду того, что матка мониезий закрытого типа, то и оценка паразитоцидной эффективности с использованием овоскопии имеет предварительный характер.

Результаты испытаний композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4) при дикроцелиозе овец представлены в таблице 5. Установлено, что:

- в группе 2 (табл.5), по которой оценивалась композиция в дозе 1 мг ФБЗ на кг м.ж. ЭЭ составила 33.4%, ИЭ – 79.4%, Ef – 26.5%.

- в дозировке 2 мг ФБЗ на кг м.ж. (группа 3) эффективность оказалась значительно выше и составила по показателю ЭЭ – 55.7%, показателям ИЭ – 89.5%, Ef – 31.0%).

- эффективность композиции в дозировке по ФБЗ 3 мг кг м.ж. (группа 4) составила 100%.

Исходный фенбендазол (группа 5) в дозе 10 мг на кг м.ж. не продемонстрировал высокую активность (ЭЭ – 33.4%, ИЭ – 89.2%, Ef – 40.0%),

исходный ивермектин (группа 6) не показал паразитоцидной активности при дикроцелиозе.

Таблица 5.

**Эффективность композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)
при дикроцелиозе овец**

№	Группа животных	Составы композиций и исходные препараты	Доза, мг ДВ на кг массы животного	Колич. животных.	Заражено (ЭИ), %	Сред. арифмет. и геометрич. число яиц/г фекалий	ЭЭ, %	ИЭ, %	Эффективность ^a (Ef), %	p-Value ^a
1	Контроль	Placebo	-	20	30.0	$\frac{30.5 \pm 11.2}{2.0 \pm 0.05}$	-	-	-	-
2	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 1.0 ИВМ 0.2	15	20.0	$\frac{6.3 \pm 2.5}{1.47 \pm 0.06}$	33.4	79.4	26.5	< 0.05
3	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 2.0 ИВМ 0.2	15	13.3	$\frac{3.2}{1.38}$	55.7	89.5	31.0	NA
4	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 3.0 ИВМ 0.2	15	0.0	$\frac{0}{0}$	100	100	100	NA
5	Опытная	ФБЗ substance	10.0	10	20.0	$\frac{3.3}{1.2}$	33.4	89.2	40.0	NA
6	Опытная	ИВМ substance	0.2	10	40	$\frac{28.8 \pm 12.7}{1.8 \pm 0.09}$	0	5.6	10.0	> 0.05

Результаты испытаний композиции препаратов ФБЗ/ИВМ/ЭС при мелофагозе овец представлены в таблице 6.

Таблица 6.

**Эффективность композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)
при мелофагозе овец**

№	Группа животных	Составы композиций и исходные препараты	Доза, мг ДВ на кг массы животного	Колич. животных.	Заражено (ЭИ), %	Сред. арифмет. и геометрич. число паразитов	ЭЭ, %	ИЭ, %	Эффективность ^a (Ef), %	p-Value ^a
1	Контроль	Placebo	-	20	100	$\frac{17.1 \pm 2.7}{1.1 \pm 0.07}$	-	-	-	-
2	Опытная	ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 1.0 ИВМ 0.2	15	33.3	$\frac{1.6 \pm 0.6}{0.5 \pm 0.1}$	66.7	90.7	54.6	< 0.01

3	Опыт- ная	ФБЗ/ ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 2.0 ИВМ 0.2	15	46.6	$\frac{2.1 \pm 0.8}{0.7 \pm 0.05}$	53.4	87.8	36.4	< 0.01
4	Опыт- ная	ФБЗ/ ИВМ/ЭС (1:1:4)	ФБЗ 3.0 ИВМ 0.2	15	26.6	$\frac{1.8 \pm 0.6}{0.6 \pm 0.09}$	73.4	89.5	45.5	< 0.05
5	Опыт- ная	ФБЗ substance	10.0	10	80.0	$\frac{16.2 \pm 2.3}{1.2 \pm 0.06}$	20.0	5.3	0.0	NA
6	Опыт- ная	ИВМ sub- stance	0.2	10	30.0	$\frac{2.3 \pm 0.9}{0.65 \pm 0.05}$	70.0	86.6	41.0	< 0.05

В опытных группах 2–4 (табл.6), по которым оценивались композиции состава ФБЗ/ИВМ/ЭС (1:1:4) ЭЭ находилась в пределах 53.4 – 73.4%, ИЭ – 87.8 - 90.7%, Ef – 36.4 - 54.6%. Исходная субстанция фенбендазола (группа 5) не продемонстрировала активности против кровососок. Но исходная субстанция ивермектина (группа 6) оказалась достаточно активной при мелофагозе (70.0%, ИЭ – 86.6%, Ef – 41.0%).

Обсуждение

Механохимическая модификация бензимидазольных антигельминтных субстанций позволяет получить твердые дисперсии с повышенной растворимостью и сохранением эффективности при сниженных в 2-5 раз нормах применения [2, 3]. В частности, модификация субстанции фенбендазола в присутствии экстракта солодки позволила получить твердые дисперсии, которые обладали повышенной растворимостью и высокой эффективностью при нематодозах овец [2], а также проявили высокую активность на овцах, спонтанно инвазированных стронгилятами пищеварительного тракта в дозе, которая была в 2.5 раза меньше дозы базового препарата ФБЗ [5].

Продолжением этих исследований можно рассматривать работы [27] по созданию двухкомпонентных механомодифицированных композиций фенбендазола и ивермектина. В результате проведенных опытов установлено, что паразитоцидные композиции фенбендазола и ивермектина с ЭС в различных дозировках показали высокую эффективность против стронгилят ЖКТ, экстенсэффективность препаратов находилась в пределах 60.8 - 100%, интенсэффективность - 95.1 - 100%. Высокая активность препаратов отмечена и против стронгилят дыхательной системы (ЭЭ 60.0 – 100%, ИЭ 88.5-100%). Также достаточно высокую эффективность композиции продемонстрировали против мониезий, экстенсэффективность препаратов находилась в пределах 46.8 -100%, интенсэффективность – 58.9 - 100%. Композиция состава ФБЗ/ИВМ/ЭС в различных дозировках по ФБЗ пока-

зала достаточно высокую активность против дикроцелий (ЭЭ – 33.4 - 100%, ИЭ – 79.4 - 100%) и кровососок (ЭЭ – 53.4 - 73.4%, ИЭ – 87.8 - 90.7%).

Известны препараты и способы их использования для лечения гельминтозов животных на основе растительных полимерных веществ (арабиногалактан /АГ/, глицирризиновая кислота /ГК/ и ее динатриевая соль / $\text{Na}_2\text{ГК}$ /), содержащие в качестве антигельминтиков субстанции альбендазола, фенбендазола, ивермектина, никлозамида [4; 11; 19; 28]. Полученные при этом композиции рассматривались как лекарственные формы, действующие по принципу «лекарство – орган-мишень» и создающие оптимальную концентрацию препарата для достижения лечебного эффекта, а также значительно снижать токсичность за счет уменьшения дозы.

Среди использованных полимерных веществ, наиболее перспективными оказалась ГК [23] и ее динатриевая соль, которые значительно увеличивали растворимость полученных твердых дисперсий (ТД) и их эффективность. Так, для субстанции никлозамида удалось увеличить растворимость в 40–50 раз и показать, что эти ТД оказались универсальными системами доставки лекарственной субстанции из-за их амфифильных и мембранотропных свойств [19]. Благодаря этим свойствам, ГК способна образовывать мицеллы в водных растворах и комплексы типа “хозяин-гость” с различными гидрофобными молекулами [25; 26; 36]. Динатриевая соль ГК ($\text{Na}_2\text{ГК}$) образует растворы с более низкой вязкостью, в отличие от ГК, и поэтому можно ожидать синергетического эффекта от использования этой соли в качестве системы доставки лекарственных средств. Это предположение было подтверждено в работах [29; 30], в которых композиция, полученная путем совместной механообработки празиквантела и $\text{Na}_2\text{ГК}$, обладала повышенной проницаемостью и повышенной биодоступностью в опытах с лабораторными мышами.

Было установлено, что ГК способна взаимодействовать с клеточной мембраной, влияя на ее свойства, такие как эластичность и проницаемость [31; 32]. ГК проникает в фосфолипидный бислой и образует внутри него самоассоциаты, которые также приводят к изменению подвижности липидов и увеличению проницаемости лекарств через клеточные мембраны [33].

Известно, что экстракт солодки (ЭС) включает в свой состав до 25% ГК и этим объясняется широкий спектр биологической активности ЭС [12; 13] и интерес к использованию ЭС в процессах механомодификации субстанций различных антигельминтных субстанций [5; 27]. ЭС способствует значительному снижению токсического действия антигельминтных препаратов (за счет антиоксидантных, иммуномодулирующих, гепатопрот-

текторных и мембранотропных свойств), а также адресной доставки основного действующего вещества. Однако эти препараты содержат в своем составе только одно антигельминтное ДВ, что значительно снижает качество противопаразитарных обработок животных.

Проведенные опыты по оценке эффективности композиций фенбендазола и ивермектина с экстрактом солодки при гельминтозах овец показали их преимущество в паразитоцидной активности перед исходными формами препаратов и свидетельствуют о перспективности их использования.

Заключение

Путем механохимической модификации субстанций ФБЗ и ИВМ с помощью экстракта солодки получены твердые дисперсии составов ФБЗ:ЭС (1:4) и ИВМ:ЭС (1:4), которые обладают повышенной растворимостью и широким спектром противопаразитарной активности. Разработанные на основе ТД композиции обладали преимуществом перед исходными формами субстанций ФБЗ и ИВМ. Работа показала перспективность использования методов механохимической модификации малорастворимых субстанций в разработке инновационных препаратов, позволяющих расширять спектр паразитоцидной активности, снижать дозировку и кратность манипуляций с животными.

Композиции состава ФБЗ:ЭС (1:4) и ФБЗ:ИВМ:ЭС (1:1:8) в дозе 3 мг на кг м.ж. оказались высокоэффективными при кишечных и легочных стронгилятозах, мониезиозе, дикроцелиозе и мелофагозе овец (эффективность 89.5 - 100%). По материалам исследований получен патент РФ на изобретение «Противопаразитарное средство и способ терапии овец при паразитарных инвазиях №2815424 от 14.03.2024 [37].

Заключение комитета по этике. Исследование проведено в соответствии с требованиями Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в научных целях (ETS No123, Страсбург, 1986) и рекомендациям комиссии ФАНЦА по биологической этике приказ № 210 от 12 октября 2022 года.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Работа по разработке препаратов выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН ИНЭОС РАН №075-00277-24-00, работа по созданию

и испытанию препаратов выполнена в Горно-Алтайском научно-исследовательском институте сельского хозяйства (филиал) Национального исследовательского Томского государственного, а также договора о научно-техническом сотрудничестве между ИНЭОС РАН, ФГБНУ ФАНЦА и СФНЦА РАН от 01.08.2022 г.

Список литературы

1. Архипов, И. А. (2009). *Антигельминтики: фармакология и применение*. Москва: РАСХН. 406 с. ISBN: 978-5-85941-305-8. EDN: <https://elibrary.ru/qltshx>
2. Архипов, И. А., Варламова, А. И., Халиков, С. С., Садов, К. М., & Душкин, А. В. (2020). Влияние механохимической технологии на антигельминтную эффективность супрамолекулярных комплексов фенбендазола с экстрактом солодки. *Российский паразитологический журнал*, (1), 70-74. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-1-70-74>. EDN: <https://elibrary.ru/dkqink>
3. Варламова, А. И., Лимова, Ю. В., Садов, К. М., Садова, А. К., Белова, Е. Е., Радионов, А. В., Халиков, С. С., Чистяченко, Ю. С., Душкин, А. В., Скира, В. Н., & Архипов, И. А. (2016). Эффективность супрамолекулярного комплекса фенбендазола при нематодозах овец. *Российский паразитологический журнал*, (1), 76-81. EDN: <https://elibrary.ru/vqvdsdp>
4. Варламова, А. И., Архипов, И. А., Садов, К. М., & Халиков, С. С. (2020). Эффективность супрамолекулярного комплекса фенбендазола против нематод при комиссионном производственном испытании. *Российский паразитологический журнал*, (2), 93-97. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-2-93-97>. EDN: <https://elibrary.ru/tupdvsv>
5. Варламова, А. И., Мовсесян, С. О., Архипов, И. А., Халиков, С. С., Арисов, М. В., Кочетков, П. П., Абрамов, А. Е., Ильин, И. И., & Локшин, Б. В. (2020). Биологическая активность и особенности фармакокинетики фенбендазола на основе супрамолекулярной системы адресной доставки с экстрактом солодки и диоктилсульфосукцинатом натрия. *Известия РАН, серия биологическая*, (6), 565-574. <https://doi.org/10.31857/S0002332920060132>. EDN: <https://elibrary.ru/gbpkfa>
6. Калашников, А. П., Фисин, В. Ф., Щеглова, В. В., & Клейменова, Н. И. (2003). *Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных*. Москва: Колос. 456 с. ISBN: 5-94587-093-5. EDN: <https://elibrary.ru/pxqmhhl>
7. Кондрахин, И. П. (ред.). (2004). *Методы ветеринарной клинической лабораторной диагностики: справочник*. Москва: Колос. 519 с.
8. Котельников, Г. А. (1984). *Гельминтологические исследования животных и окружающей среды*. Москва: Колос. 208 с.

9. Марченко, В. А., Ефремова, Е. А., Саитов, В. Р., & Айрапетян, А. Р. (2015). Паразитокомплекс мясных пород крупного рогатого скота в хозяйствах Республики Алтай. *Ветеринарный врач*, (4), 50-55. EDN: <https://elibrary.ru/sfkonm>
10. Марченко, В. А., & Ефремова, Е. А. (2019). Эпизоотическая ситуация по гельминтозам сельскохозяйственных животных в Республике Алтай. В сборнике *Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями* (с. 341-346). Москва. <https://doi.org/10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.341-346>
11. Мусаев, М. Б., Зашепкина, В. В., Вацаев, Ш. В., Джамалова, А. З., Ильин, М. М., & Халиков, С. С. (2020). Эффективность супрамолекулярного комплекса ивермектина в условиях производства при нематодозах пищеварительного тракта лошадей табунного содержания. *Российский паразитологический журнал*, (3), 104-108. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-3-104-108>. EDN: <https://elibrary.ru/ulcmeo>
12. Толстиков, Г. А., Балтина, Л. А., Шульц, Э. Э., & Покровский, А. Г. (1997). Глицерризиновая кислота (обзор). *Биоорганическая химия*, (9), 691-709. EDN: <https://elibrary.ru/pattkv>
13. Толстиков, Г. А., Балтина, Л. А., Гранкина, В. П., Кондратенко, Р. М., & Толстикова, Т. Г. (2007). *Солодка. Биоразнообразие, химия, применение в медицине*. Новосибирск: Гео. 238 с.
14. Хабриев, Р. У. (2005). *Руководство по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических веществ*. Москва: Медицина. 514 с. ISBN: 5-225-04219-8. EDN: <https://elibrary.ru/qciib>
15. Халиков, С. С., Чистяченко, Ю. С., Душкин, А. В., Метелева, Е. С., Поляков, Н. Э., Архипов, И. А., Варламова, А. И., Гламаздин, И. И., & Данилевская, Н. В. (2015). Создание антигельминтных препаратов повышенной эффективности на основе межмолекулярных комплексов действующих веществ с водорастворимыми полимерами, в том числе с полисахаридами. *Химия в интересах устойчивого развития*, (5), 567-577. <https://doi.org/10.15372/KhUR20150510>. EDN: <https://elibrary.ru/uyatxd>
16. Халиков, С. С., Локшин, Б. В., & Ильин, М. М. (2020). Получение и свойства твердых дисперсий субстанций медамина и албендазола с водорастворимыми полимерами. *Химико-фармацевтический журнал*, (8), 23-28. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2020-54-8-23-28>. EDN: <https://elibrary.ru/ppjvqw>
17. Шихалиева, М. А., Биттирова, М. И., Мантаева, С. Ш., Юсупова, З. Х., & Чилаев, С. Ш. (2014). Численность и ассоциации паразитов у крупного рогатого скота и коз в регионе Северного Кавказа. *Российский паразитологический журнал*, (4), 16-21. EDN: <https://elibrary.ru/tbvxfp>

18. Чебышев, Н. В., Богоявленский, Е. А., & Гришина, Е. А. (1998). *Гельминтозы: органосистемные процессы в их патогенезе*. Москва: Медицина. 236 с.
19. Arkhipov, I. A., Sadov, K. M., Limova, Y. V., Sadova, A. K., Varlamova, A. I., Khalikov, S. S., Dushkin, A. V., & Chistyachenko, Y. S. (2017). The efficacy of the supramolecular complexes of niclosamide obtained by mechanochemical technology and targeted delivery against cestode infection of animals. *Vet. Parasitology*, 246, 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.08.019>. EDN: <https://elibrary.ru/psnscx>
20. Bossche, H., Rochette, F., & Horig, C. (1982). Anthelmintic efficacy of fenbendazole. *Veterinary Record*, (3), 876-877.
21. Campbell, W. C., & Benz, G. W. (1984). Ivermectin: a review of efficacy and safety. *J. Vet. Pharmacol. Ther.*, (1), 1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2885.1984.tb00872.x>
22. Campbell, J. D., & Fairey, P. J. (1989). Informational and normative routes to conformity: The effect of faction size as a function of norm extremity and attention to the stimulus. *Journal of Personality and Social Psychology*, (3), 457-468. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.57.3.457>. EDN: <https://elibrary.ru/hiuynh>
23. Chauhan, S., Gulati, N., & Nagaich, U. (2018). Glycyrrhizic acid: extraction, screening and evaluation of anti-inflammatory property. *Ars Pharm.*, 59, 61. <https://doi.org/10.30827/ars.v59i2.7513>
24. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes. (1986). Strasbourg.
25. Kim, A. V., Shelepova, E. A., Selyutina, O. Yu., Meteleva, E. S., Dushkin, A. V., Medvedev, N. N., Polyakov, N. E., & Lyakhov, N. Z. (2019). Glycyrrhizin-Assisted Transport of Praziquantel Anthelmintic Drug through the Lipid Membrane: An Experiment and MD Simulation. *Mol Pharmaceutics*, (7), 3188-3198. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117759>. EDN: <https://elibrary.ru/fgglvc>
26. Kong, R., Zhu, X., Meteleva, E. S., Polyakov, N. E., Khvostov, M. V., Baev, D. S., Tolstikova, T. G., Dushkin, A. V., & Su, W. (2018). Atorvastatin calcium inclusion complexation with polysaccharide arabinogalactan and saponin disodium glycyrrhizate for increasing of solubility and bioavailability. *Drug Deliv. Transl. Res.*, 8, 1200-1213. <https://doi.org/10.1007/s13346-018-0565-x>. EDN: <https://elibrary.ru/vbybor>
27. Marchenko, V. A., & Khalikov, S. S. (2020). Supramolecular complexes of drugs for parasitic sheep infestations. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 548, 082006.

28. Marchenko, V. A., Khalikov, S. S., Efremova, E. A., & Ilyin, M. M. (2021). Efficiency of novel formulations of ivermectin and albendazole in parasitic infections of sheep in the Altai mountains of Russia. *Iran J Parasitol*, 16(2), 198-208. <https://doi.org/10.18502/ijpa.v16i2.6268>
29. Meteleva, E. S., Chistyachenko, Yu. S., Suntsova, L. P., Tsyganov, M. A., Vishnivetskaya, G. B., Avgustinovich, D. F., Khvostov, M. V., Polyakov, N. E., Tolstikova, T. G., Mordvinov, V. A., Dushkin, A. V., & Lyakhov, N. Z. (2018). Physicochemical properties and anti-opisthorchosis effect of mechanochemically synthesized solid compositions of praziquantel with glycyrrhizic acid disodium salt. *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 481(1), 228-231. <https://doi.org/10.1134/S1607672918040142>. EDN: <https://elibrary.ru/vburuk>
30. Meteleva, E. S., Chistyachenko, Yu. S., Suntsova, L. P., Khvostov, M. V., Polyakov, N. E., Selyutina, O. Yu., Tolstikova, T. G., Frolova, T. S., Mordvinov, V. A., Dushkin, A. V., & Lyakhov, N. Z. (2019). Disodium salt of glycyrrhizic acid - a novel supramolecular delivery system for anthelmintic drug praziquantel. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 51, 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.01.014>
31. Selyutina, O. Yu., Polyakov, N. E., Korneev, D. V., & Zaitsev, B. N. (2014). Influence of glycyrrhizin on permeability and elasticity of cell membrane: perspectives for drugs delivery. *Drug Deliv*, 21(3), 858-865. <https://doi.org/10.3109/10717544.2014.919544>
32. Selyutina, O. Yu., Apanasenko, I. E., Kim, A. V., Shelepova, E. A., Khalikov, S. S., & Polyakov, N. E. (2016). Spectroscopic and molecular dynamics characterization of glycyrrhizin membrane-modifying activity. *Colloids Surf B*, 147, 459-466. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.08.037>. EDN: <https://elibrary.ru/uomhkc>
33. Selyutina, O. Yu., Apanasenko, I. E., Shilov, A. G., Khalikov, S. S., & Polyakov, N. E. (2017). Effect of natural polysaccharides and oligosaccharides on the cell membrane permeability. *Rus Chem Bull*, 66(1), 129-135. <https://doi.org/10.1007/s11172-017-1710-2>. EDN: <https://elibrary.ru/xnebwq>
34. Takagi, T., Ramachandran, Ch., Bermejo, M., Yamashita, S., Yu, L. X., & Amidon, G. L. (2006). A provisional biopharmaceutical classification of the top 200 oral drug products in the United States, Great Britain, Spain and Japan. *Molecular Pharmaceutics*, 3(6), 631-646. <https://doi.org/10.1021/mp0600182>
35. Wood, I., Amaral, N., Bairden, K., Duncan, J. L., Kassai, T., Malone, J. B., Pankavich, J. A., Reinecke, R. K., Slocombe, O., & Taylor, S. M. (1995). World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology (WAAVP) second edition of guidelines for evaluating the effectiveness of anthelmintics

- in ruminants (bovine, ovine, caprine). *Vet Parasitol*, 60(3), 181-213. [https://doi.org/10.1016/0304-4017\(95\)00806-2](https://doi.org/10.1016/0304-4017(95)00806-2)
36. Zhang, Q., Polyakov, N. E., Chistyachenko, Yu. S., Khvostov, M. V., Frolova, T. S., Tolstikova, T. G., Dushkin, A. V., & Su, W. (2018). Preparation of curcumin self-micelle solid dispersion with enhanced bioavailability and cytotoxic activity by mechanochemistry. *Drug Deliv*, 25(2), 198-209. <https://doi.org/10.1080/10717544.2017.1422298>. EDN: <https://elibrary.ru/ybhmqx>
37. Патент РФ № 2815424 (2022). Марченко В.А., Халиков С.С., Ефремова Е.А., Василенко Ю.А., Ким А.С. Противопаразитарное средство и способ его применения для терапии овец при паразитарных инвазиях. Опубликовано: 14.03.2024. Бюл. № 8.

References

1. Arkhipov, I. A. (2009). Anthelmintics: pharmacology and application. Moscow: RASKHN. 406 p. ISBN: 978-5-85941-305-8. EDN: <https://elibrary.ru/qltshx>
2. Arkhipov, I. A., Varlamova, A. I., Khalikov, S. S., Sadov, K. M., & Dushkin, A. V. (2020). Effect of mechanochemical technology on anthelmintic efficacy of supramolecular complexes of fenbendazole with licorice extract. *Russian Journal of Parasitology*, (1), 70-74. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-1-70-74>. EDN: <https://elibrary.ru/dkqink>
3. Varlamova, A. I., Limova, Yu. V., Sadov, K. M., Sadova, A. K., Belova, E. E., Radionov, A. V., Khalikov, S. S., Chistyachenko, Yu. S., Dushkin, A. V., Skirra, V. N., & Arkhipov, I. A. (2016). Efficacy of fenbendazole supramolecular complex against ovine nematodes. *Russian Journal of Parasitology*, (1), 76-81. EDN: <https://elibrary.ru/vqvds>
4. Varlamova, A. I., Arkhipov, I. A., Sadov, K. M., & Khalikov, S. S. (2020). Efficacy of fenbendazole supramolecular complex against nematodes during commission production testing. *Russian Journal of Parasitology*, (2), 93-97. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-2-93-97>. EDN: <https://elibrary.ru/tupdvs>
5. Varlamova, A. I., Movsesyan, S. O., Arkhipov, I. A., Khalikov, S. S., Arisov, M. V., Kochetkov, P. P., Abramov, A. E., Ilyin, I. I., & Lokshin, B. V. (2020). Biological activity and pharmacokinetic features of fenbendazole based on supramolecular targeted delivery system with licorice extract and sodium dioctyl sulfosuccinate. *Biology Bulletin*, (6), 565-574. <https://doi.org/10.31857/S0002332920060132>. EDN: <https://elibrary.ru/gbpkfa>
6. Kalashnikov, A. P., Fisin, V. F., Shcheglova, V. V., & Kleymenova, N. I. (2003). Norms and rations for feeding farm animals. Moscow: Kolos. 456 p. ISBN: 5-94587-093-5. EDN: <https://elibrary.ru/pxqmh>

7. Kondrakhin, I. P. (Ed.). (2004). Methods of veterinary clinical laboratory diagnostics: reference book. Moscow: Kolos. 519 p.
8. Kotelnikov, G. A. (1984). Helminthological studies of animals and environment. Moscow: Kolos. 208 p.
9. Marchenko, V. A., Efremova, E. A., Saitov, V. R., & Ayrapetyan, A. R. (2015). Parasite complex of beef cattle breeds in farms of Altai Republic. *Veterinary Doctor*, (4), 50-55. EDN: <https://elibrary.ru/sfkonm>
10. Marchenko, V. A., & Efremova, E. A. (2019). Epizootic situation of helminthosis in farm animals in Altai Republic. In *Theory and Practice of Parasitic Disease Control* (pp. 341-346). Moscow. <https://doi.org/10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.341-346>
11. Musaev, M. B., Zashchepkina, V. V., Vatsaev, Sh. V., Dzhamalova, A. Z., Ilyin, M. M., & Khalikov, S. S. (2020). Efficacy of supramolecular complex of ivermectin in production conditions for gastrointestinal nematodes in herd-kept horses. *Russian Journal of Parasitology*, (3), 104-108. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-3-104-108>. EDN: <https://elibrary.ru/ulcmeo>
12. Tolstikov, G. A., Baltina, L. A., Shul'ts, E. E., & Pokrovsky, A. G. (1997). Glycyrrhizic acid (review). *Bioorganic Chemistry*, (9), 691-709. EDN: <https://elibrary.ru/pattkv>
13. Tolstikov, G. A., Baltina, L. A., Grankina, V. P., Kondratenko, R. M., & Tolstikova, T. G. (2007). *Licorice. Biodiversity, chemistry, medical applications*. Novosibirsk: Geo. 238 p.
14. Khabriev, R. U. (2005). *Guide to experimental (preclinical) study of new pharmacological substances*. Moscow: Medicine. 514 p. ISBN: 5-225-04219-8. EDN: <https://elibrary.ru/qciiob>
15. Khalikov, S. S., Chistyachenko, Yu. S., Dushkin, A. V., Meteleva, E. S., Polyakov, N. E., Arkhipov, I. A., Varlamova, A. I., Glamazdin, I. I., & Danilevskaya, N. V. (2015). Development of highly effective anthelmintic drugs based on intermolecular complexes of active substances with water-soluble polymers, including polysaccharides. *Chemistry for Sustainable Development*, (5), 567-577. <https://doi.org/10.15372/KhUR20150510>. EDN: <https://elibrary.ru/uyatxd>
16. Khalikov, S. S., Lokshin, B. V., & Ilyin, M. M. (2020). Preparation and properties of solid dispersions of medamin and albendazole substances with water-soluble polymers. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, (8), 23-28. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2020-54-8-23-28>. EDN: <https://elibrary.ru/ppjvqw>
17. Shikhalieva, M. A., Bittirova, M. I., Mantaeva, S. Sh., Yusupova, Z. Kh., & Chilaev, S. Sh. (2014). Number and associations of parasites in cattle and goats in the North Caucasus region. *Russian Journal of Parasitology*, (4), 16-21. EDN: <https://elibrary.ru/tbvxfp>

18. Chebyshev, N. V., Bogoyavlensky, E. A., & Grishina, E. A. (1998). *Helminthiasis: organ-system processes in their pathogenesis*. Moscow: Medicine. 236 p.
19. Arkhipov, I. A., Sadov, K. M., Limova, Y. V., Sadova, A. K., Varlamova, A. I., Khalikov, S. S., Dushkin, A. V., & Chistyachenko, Y. S. (2017). The efficacy of the supramolecular complexes of niclosamide obtained by mechanochemical technology and targeted delivery against cestode infection of animals. *Vet. Parasitology*, 246, 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.08.019>. EDN: <https://elibrary.ru/psnscx>
20. Bossche, H., Rochette, F., & Horig, C. (1982). Anthelmintic efficacy of fenbendazole. *Veterinary Record*, (3), 876-877.
21. Campbell, W. C., & Benz, G. W. (1984). Ivermectin: a review of efficacy and safety. *J. Vet. Pharmacol. Ther.*, (1), 1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2885.1984.tb00872.x>
22. Campbell, J. D., & Fairey, P. J. (1989). Informational and normative routes to conformity: The effect of faction size as a function of norm extremity and attention to the stimulus. *Journal of Personality and Social Psychology*, (3), 457-468. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.57.3.457>. EDN: <https://elibrary.ru/hiuynh>
23. Chauhan, S., Gulati, N., & Nagaich, U. (2018). Glycyrrhizic acid: extraction, screening and evaluation of anti-inflammatory property. *Ars Pharm.*, 59, 61. <https://doi.org/10.30827/ars.v59i2.7513>
24. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes. (1986). Strasbourg.
25. Kim, A. V., Shelepova, E. A., Selyutina, O. Yu., Meteleva, E. S., Dushkin, A. V., Medvedev, N. N., Polyakov, N. E., & Lyakhov, N. Z. (2019). Glycyrrhizin-Assisted Transport of Praziquantel Anthelmintic Drug through the Lipid Membrane: An Experiment and MD Simulation. *Mol Pharmaceutics*, (7), 3188-3198. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117759>. EDN: <https://elibrary.ru/fggllvc>
26. Kong, R., Zhu, X., Meteleva, E. S., Polyakov, N. E., Khvostov, M. V., Baev, D. S., Tolstikova, T. G., Dushkin, A. V., & Su, W. (2018). Atorvastatin calcium inclusion complexation with polysaccharide arabinogalactan and saponin disodium glycyrrhizate for increasing of solubility and bioavailability. *Drug Deliv. Transl. Res.*, 8, 1200-1213. <https://doi.org/10.1007/s13346-018-0565-x>. EDN: <https://elibrary.ru/vbybyor>
27. Marchenko, V. A., & Khalikov, S. S. (2020). Supramolecular complexes of drugs for parasitic sheep infestations. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 548, 082006.
28. Marchenko, V. A., Khalikov, S. S., Efremova, E. A., & Ilyin, M. M. (2021). Efficiency of novel formulations of ivermectin and albendazole in parasitic in-

- fections of sheep in the Altai mountains of Russia. *Iran J Parasitol*, 16(2), 198-208. <https://doi.org/10.18502/ijpa.v16i2.6268>
29. Meteleva, E. S., Chistyachenko, Yu. S., Suntsova, L. P., Tsyganov, M. A., Vishnivetskaya, G. B., Avgustinovich, D. F., Khvostov, M. V., Polyakov, N. E., Tolstikova, T. G., Mordvinov, V. A., Dushkin, A. V., & Lyakhov, N. Z. (2018). Physicochemical properties and anti-opisthorchosis effect of mechanochemically synthesized solid compositions of praziquantel with glycyrrhizic acid disodium salt. *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 481(1), 228-231. <https://doi.org/10.1134/S1607672918040142>. EDN: <https://elibrary.ru/vburuk>
30. Meteleva, E. S., Chistyachenko, Yu. S., Suntsova, L. P., Khvostov, M. V., Polyakov, N. E., Selyutina, O. Yu., Tolstikova, T. G., Frolova, T. S., Mordvinov, V. A., Dushkin, A. V., & Lyakhov, N. Z. (2019). Disodium salt of glycyrrhizic acid - a novel supramolecular delivery system for anthelmintic drug praziquantel. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 51, 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.01.014>
31. Selyutina, O. Yu., Polyakov, N. E., Korneev, D. V., & Zaitsev, B. N. (2014). Influence of glycyrrhizin on permeability and elasticity of cell membrane: perspectives for drugs delivery. *Drug Deliv*, 21(3), 858-865. <https://doi.org/10.3109/10717544.2014.919544>
32. Selyutina, O. Yu., Apanasenko, I. E., Kim, A. V., Shelepova, E. A., Khalikov, S. S., & Polyakov, N. E. (2016). Spectroscopic and molecular dynamics characterization of glycyrrhizin membrane-modifying activity. *Colloids Surf B*, 147, 459-466. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.08.037>. EDN: <https://elibrary.ru/uomhkc>
33. Selyutina, O. Yu., Apanasenko, I. E., Shilov, A. G., Khalikov, S. S., & Polyakov, N. E. (2017). Effect of natural polysaccharides and oligosaccharides on the cell membrane permeability. *Rus Chem Bull*, 66(1), 129-135. <https://doi.org/10.1007/s11172-017-1710-2>. EDN: <https://elibrary.ru/xnebwq>
34. Takagi, T., Ramachandran, Ch., Bermejo, M., Yamashita, S., Yu, L. X., & Amidon, G. L. (2006). A provisional biopharmaceutical classification of the top 200 oral drug products in the United States, Great Britain, Spain and Japan. *Molecular Pharmaceutics*, 3(6), 631-646. <https://doi.org/10.1021/mp0600182>
35. Wood, I., Amaral, N., Bairden, K., Duncan, J. L., Kassai, T., Malone, J. B., Pankavich, J. A., Reinecke, R. K., Slocombe, O., & Taylor, S. M. (1995). World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology (WAAVP) second edition of guidelines for evaluating the effectiveness of anthelmintics in ruminants (bovine, ovine, caprine). *Vet Parasitol*, 60(3), 181-213. [https://doi.org/10.1016/0304-4017\(95\)00806-2](https://doi.org/10.1016/0304-4017(95)00806-2)

36. Zhang, Q., Polyakov, N. E., Chistyachenko, Yu. S., Khvostov, M. V., Frolova, T. S., Tolstikova, T. G., Dushkin, A. V., & Su, W. (2018). Preparation of curcumin self-micelle solid dispersion with enhanced bioavailability and cytotoxic activity by mechanochemistry. *Drug Deliv*, 25(2), 198-209. <https://doi.org/10.1080/10717544.2017.1422298>. EDN: <https://elibrary.ru/ybhmqx>
37. Patent RU № 2815424 (2022). Marchenko V.A., Khalikov S.S., Efremova E.A., Vasilenko Yu.A., Kim A.S. Antiparasitic agent and method of its application for therapy of sheep with parasitic infestations. Published: 14.03.2024. Bull. № 8.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Марченко Виктор Алексеевич, д-р биол. наук, профессор, зав. лабораторией агробиотехнологий

*Горно-Алтайский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (филиал) Национального исследовательского Томского государственного университета
ул. Катунская, 2, с. Майма, Республика Алтай, 649100, Российская Федерация
oestrus@mail.ru*

Халиков Салават Самадович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологически активных фторорганических соединений

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация
khalikov_ss@ineos.ac.ru*

Василенко Юрий Александрович, преподаватель аграрного колледжа

*Горно-Алтайский государственный университет
ул. Ленкина, 1, г. Горно-Алтайск, 649000, Российская Федерация
uravas78@mail.ru*

Ефремова Елена Александровна, канд. вет. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

Федеральное бюджетное учреждение науки «Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН»

р.п. Краснообск, Новосибирская область, 630501, Российская Федерация

alfa_parazit@mail.ru

Халиков Марат Салаватович, научный сотрудник лаборатории физиологически активных фторорганических соединений

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация

marat1988@ineos.ac.ru

Ильин Михаил Михайлович, канд. хим. наук, научный сотрудник лаборатории стереохимии сорбционных процессов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

ул. Вавилова, 28, стр. 1, г. Москва, 119334, Российская Федерация

kotosok@yandex.ru

Сазманд Алиреза, д-р вет. медицины (PhD), доцент паразитологии и паразитарных заболеваний факультета ветеринарной медицины

Университет Бу-Али Сина

Хамадан, Иран

alireza.sazmand@basu.ac.ir

DATA ABOUT THE AUTHORS

Victor A. Marchenko, Doctor of Biology, Professor, Head of the Laboratory of Agrobiotechnology

Gorno-Altay Research Institute of Agriculture (branch) of National Research Tomsk State University

2, Katunskaya Str., Maima village, Altai Republic, 649100, Russian Federation

oestrus@mail.ru

Salavat S. Khalikov, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Physiologically Active Organofluorine Compounds

*A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
28 Bldg. 1, Vavilov Str., Moscow, 119334, Russian Federation
khalikov_ss@ineos.ac.ru*

Yuri A. Vasilenko, Assistant
*Agricultural College, Gorno-Altai State University
1, Lenkina Str., Gorno-Altai, 649000, Russian Federation
uravas78@mail.ru*

Elena A. Efremova, PhD in Veterinary Sciences, Associate Professor, Leading Researcher
*Federal Budgetary Scientific Institution "Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences"
Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russian Federation
alfa_parazit@mail.ru*

Marat S. Khalikov, Researcher of the Laboratory of Physiologically Active Organofluorine Compounds
*A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
28 Bldg. 1, Vavilov Str., Moscow, 119334, Russian Federation
marat1988@ineos.ac.ru*

Mikhail M. Ilyin, PhD in Chemistry, research associate at the Laboratory of Stereochemistry of Sorption Processes
*A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences
28 Bldg. 1, Vavilov Str., Moscow, 119334, Russian Federation
kotosok@yandex.ru*

Alireza Sazmand, DVM, Dr. Medical Veterinary, Assistant Professor of Parasitology and Parasitic Diseases
*Bu-Ali Sina University
Hamadan, Iran
alireza.sazmand@basu.ac.ir*

Поступила 08.11.2024
После рецензирования 06.12.2024
Принята 10.12.2024

Received 08.11.2024
Revised 06.12.2024
Accepted 10.12.2024

ОПЫТ РЕГИОНОВ

EXPERIENCE OF REGIONS

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1126

EDN: TTLTKG

UDC 641.1



Original article

**THE REGIONAL COMMUNITY'S
REQUEST FOR THE QUALITY OF FARM FOOD
(BASED ON THE EXAMPLE OF RESIDENTS
OF THE STAVROPOL KRAI, RUSSIAN FEDERATION)**

*V.A. Ivashova, D.I. Gritsai, L.I. Vysochkina,
A.P. Isayenko, V.V. Reimer*

Abstract

The article is devoted to the definition of the regional community's request for the quality of farm food products through their perception models. The topic of food quality assessment from the consumers' point of view is relevant and is widely discussed in the scientific community. The directions of modern discourse in the subject area are: systematic state control over compliance with regulatory requirements for the production and food quality; strengthening consumer confidence and ensuring public health through nutrition; characteristics of a food product in terms of the information load of packaging, its environmental friendliness for high-quality product storage, subsequent disposal of packaging materials; promotion of modern technologies for processing, storage, and waste disposal. In the empirical part of the study we developed model for studying the request of the regional community for the quality of farm food. It was used in a survey of the population of Stavropol Krai (Russia). The survey of 812 respondents was organized in electronic form. The database was processed by the SPSS Statistics program (version 27) – factor analysis, Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization. The actual model of consumer request for the quality of farm food consists of 2 structural components: commitment to certain producers – the choice of farm food products based on trust in the brand, official information and labelling; situational choice of farm food prod-

ucts based on a visual assessment of the product, packaging and current price. The obtained research data will help the farming community to position their products correctly and consider the prospects of going beyond the region.

Keywords: quality; regional community's request; quality of farm food; food quality assessment

For citation. Ivashova, V. A., Gritsai, D. I., Vysochkina, L. I., Isayenko, A. P., & Reimer, V. V. (2025). The regional community's request for the quality of farm food (based on the example of residents of the Stavropol Krai, Russian Federation). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 480-499. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1126>

Научная статья

ЗАПРОС РЕГИОНАЛЬНОГО СООБЩЕСТВА НА КАЧЕСТВО ФЕРМЕРСКИХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЖИТЕЛЕЙ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ)

*В.А. Ивашова, Д.И. Грицай, Л.И. Высочкина,
А.П. Исаенко, В.В. Реймер*

Аннотация

Статья посвящена изучению запроса регионального сообщества на качество фермерских продуктов питания через модели их восприятия. Тема оценки качества продуктов питания с точки зрения потребителей является актуальной и широко обсуждается в научном мировом сообществе. Направлениями современного дискурса в предметной области являются: системный государственный контроль за соблюдением нормативных требований к производству и качеству продуктов питания; укрепление доверия потребителей и обеспечение здоровья населения через питание; характеристика продукта питания с точки зрения информационной нагрузки упаковки и ее экологичности для качественного хранения продукта и последующей утилизации упаковочных материалов; продвижение современных технологий переработки, хранения, утилизации отходов. В эмпирической части исследования разработанная теоретическая модель изучения запроса регионального сообщества на качество фермерских продуктов питания была использована в опросе населения Ставропольского края (Россия). Опрос 812 респондентов организован в электронной форме. База данных обработана программе SPSS Statistics (версия 27) – факторный

анализ, выполнен Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization. Фактическая модель потребительского запроса на качество фермерских продуктов питания состоит из 2 структурных компонентов: приверженность определенным производителям – выбор фермерских продуктов питания, обусловленный доверием к бренду, официальной информации и маркировке; ситуационный выбор фермерских продуктов питания, основанный на визуальной оценке продукта, упаковки и текущей цене. Полученные данные исследования помогут фермерскому сообществу правильно позиционировать свою продукцию и рассматривать перспективы выхода за пределы региона.

Ключевые слова: качество; запрос регионального сообщества; качество фермерской еды; оценка качества продуктов питания

Для цитирования. Ивашова, В. А., Грицай, Д. И., Высочкина, Л. И., Исаенко, А. П., & Реймер, В. В. (2025). Запрос регионального сообщества на качество фермерских продуктов питания (на примере жителей Ставропольского края). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 480-499. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1126>

Introduction

Government support for rural areas and the development of small businesses in Russia have had a positive impact on the production of farm products. Farm food in Russia is not just a tribute to fashion or a commitment to organic (natural) food. There are traditional national products that, through daily food consumption, preserve the health of the nation, strengthen the bond of generations, and help raise healthy children. In 2022, Russians ordered more than 600 billion roubles worth of food products online (40% more than in 2021) [1]. According to the estimates of the Rosselkhoznadzor (The Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Supervision), by the end of this year 2023, the volume of the Russian online food sales market will amount to more than 700 billion roubles, of which 50 billion may be orders for farm products [1]. The role of online marketplace is extremely important for farmers as they provide producers with direct access to customers [19]. The sale of food products online is considered more environmentally friendly: when selling goods on marketplaces, manufacturers regulate the supply chain independently and adjust supply to demand, minimizing storage losses.

The quality of food is an important component of the life of society. Russia is ranked 42nd in the world in terms of food quality (food security index – 67) [25]. The index structure contains 3 evaluation criteria: food availability, sufficiency, and food quality. In Russia, the index of food availability is 70.5, suffi-

ciency – 61, quality – 75.2 [25]. Thus, the quality indicator is slightly higher in value than the rest, which indicates a lot of attention to it. Despite the proximity of producers of farm products to consumers due to low production volumes and orientation to the local market, the question of the perception of farm products by the population and their willingness to purchase them remains open.

In this regard, our study is devoted to determining the regional community's request for the quality of farm food through models of their perception.

The topic of food quality assessment from the point of view of consumers is relevant and is widely discussed in the scientific world community. The authors of the study S. Felletti, N. Marchetti, Ch. De Luca, et al. speak about the dangers of pesticides that are detected during food quality control [12]. The authors' conclusion is related to the strengthening of food quality control and safety assessment based on the analysis of liquid chromatography data. In general, such conclusions confirm the relevance of the study of the issue of food quality, including farm products.

The authors of the article Sh. Qi, E.M. Hamed, P. Ma, et al. link food safety issues with a public health problem [30]. According to the authors, systematic state control over compliance with regulatory requirements for food production and quality strengthens consumer confidence and is an important measure to ensure public health.

Modern technologies are widely used in the production, processing, and packaging of food products. One of these technologies is the use of nanoscale materials. The study by Y. A. Wahab, L.A. Al-Ani, I. Khalil, and et al. presents a systematic review of the use of nanomaterials as packaging additives [45]. The results show that this leads to an improvement in the safety and shelf life of food products. The fact of low environmental impact is also important. The generalized conclusions of the authors are important for ensuring the quality, safety and control of the food industry. The value of the completed research also lies in a broader view of the problem of ensuring food quality through environmentally friendly packaging. For our research, it is important to characterize the food product in terms of the information load of the packaging and its environmental friendliness for high-quality product storage and subsequent disposal of packaging materials [13; 44].

In the discussion on the application of modern technologies in ensuring food quality, we turn to the results of the study by N. Luo, D. Xu, B. Xing, et al. [21]. The authors show the possibilities of spectroscopic technologies for assessing the quality of food products. Among the advantages is a non-destructive procedure for diagnosing the food quality, which is carried out quickly and is convenient to use.

In the future, it is planned to create a database reflecting the relationship between spectral indicators and specific target values of food quality. Thus, it is possible to judge the importance of modern technologies in ensuring food quality control (nanotechnology, spectral analysis technologies, etc.). The issue is not only the use of these technologies, but also the consumers' awareness of the possibilities of ensuring and controlling the quality of food products.

Another emerging area of improving the quality of food storage is technology using a magnetic field. The authors of the study S. Zhao, J. Wu, Zh. Guo, et al. conducted a systematic review of publications that address the effectiveness of cooling and freezing technologies using a magnetic field to improve the quality of various food products, including fruits and vegetables, meat, rice, emulsions and products made from them [48]. As a result of the analysis they determined the influence of various types of magnetic field, its intensity, processing time and other conditions on the quality of food products. The scientific discussion describes the trend towards the industrial application of cooling and freezing technologies using a magnetic field and strategies for optimizing this process in the food industry.

Summarizing the information block in the literature review devoted to the use of modern technologies in ensuring food quality, we can conclude that they are of high importance [20; 34].

Consumer opinion plays an important role in assessing the quality of food. It is necessary to conduct systematic work in the organization of monitoring the quality of food by consumers at the regional level (in working with regional brands), to ensure the independence and representativeness of such monitoring. Among the scientific papers provided in the science-intensive Scopus database, we would like to draw attention to the results of a nationwide survey conducted among 987 consumers throughout the Slovak Republic. The authors of the study L. Bartková, L. Veselovská (based on the experience and opinions of consumers) formulated recommendations for brand owners to improve the quality of food [6].

Speaking about the long-term effect of food quality on the population, we turn to the discussion about products with an edited genome. Some authors emphasize in their research that there is a heterogeneous opinion about the use of gene modification technologies in relation to food. Among the constructive proposals is to improve consumer awareness of the impact of this technology on the consumer properties of food and consumer health. Improved communication with consumers provides an understanding of the ways to improve the work on food quality assurance [3; 8].

Another important aspect of working with food consumers is optimizing consumption to reduce the amount of discarded food. In the study the authors Ch. Sharma and J.M. Deutsch analyze the possibilities of recycling waste (discarded food) and the use of biotechnologies for the benefit of the environment. Among the important conclusions made by the authors of the article is the need to study communication and consumer perception of biotechnologies, which will provide a positive impetus to the development of waste recycling [36].

There is an interesting discussion about the benefits of biotechnologies, which not only have an economic effect for agricultural producers, but also have a positive effect on the environment and human health [23]. In the process of studying the opinions of food consumers, scientists have identified a number of contradictions. Thus, Canadian consumers say that they do not trust GM (genetically modified) products, but when consumers make decisions about buying food in grocery stores, price is a key factor determining the purchase. Genetically modified foods are important because of their ability to increase yields, resist disease and adverse weather conditions, and improve nutritional quality. However, their use is controversial due to concerns about food safety, benefits and risks associated with their consumption [24].

A number of publications highlight the issue of consumers' attitude to food quality, various characteristics that are important when choosing products, evaluating their usefulness, and trusting brands, including farm (organic) food [4; 10; 18].

Modern society is faced with the problems of new diseases of a complex nature, unexplored viral infections. In this regard, there is an increasing interest in the possibilities of achieving a speedy recovery or prevention of systemic diseases and epidemics through nutrition. The authors confirm the public's interest in various aspects of medicinal products [40]. Feedback from consumers helps to promote products that are healing for physical well-being based on the request [11; 29; 41].

Due to the development of network trading companies retail chains, there is a risk of reducing agro-biodiversity in food chains due to the unification of products. A study conducted by the authors Y. Chiffolleau, T. Dourian, G. Enderli, et al. showed that consumers do not think about this problem and their choice of food in supermarkets does not affect the reduction of biological diversity of crops, which generally negatively affects the sustainability of agriculture [9, 46]. Despite the opinions of the respondents, it remains an important task to monitor market trends, create a food environment conducive to that supports agro-biodiversity, as well as inform modern consumers about the benefits of new technologies in the agricultural sector [31].

Monitoring the perception of food quality and safety by consumers in social supermarkets contributes to decision-making aimed at reducing food poverty and reducing food waste, optimizing the process of purchasing food using various digital solutions [5; 7; 14; 15; 17; 35].

According to the results of a number of studies, residents are reluctant to change their usual food structure and switch to new formats, for example, alternative protein foods [47]. This underlines the relevance of offering organic, farm-grown food products using modern technologies for processing, storage, packaging and labelling of these food products. According to the authors J. Aschemann-Witzel, D. Asioli, M. Banovic, et al. – ensuring the prospects for protein demand in a sustainable food system occurs through several alternative and new sources [2]. But currently, consumers are not prepared for their perception. According to the results of a survey of 2,405 respondents in five European countries, consumers have mostly positive emotions about eating processed foods. A more pronounced positive effect is observed in the socio-demographic groups “youth” and “women”. For our study it is important to conclude about the most significant socio-demographic groups for the promotion of farm food.

In connection with new offerings in the traditional food line, assessments of the readiness to consume food innovations are important consumer opinion studies. The scientific group conducted a study of the opinions of 1,064 German consumers and concluded that one third of the sample demonstrates openness to combining products to obtain new tastes [37]. What is very important for our research is that the most open consumers are active adherents of organic/farm food products.

Social networks represent a huge information field, which reflects, among other things, information about people's consumer preferences. It is possible to determine people's attitude to food and the main trends in its consumption through the analysis of social media texts. The study presents a secondary analysis of data based on the results of surveys of food consumers and an analysis of trends in consumer statements on social networks (the PRISMA program was used). An important conclusion of the authors is the statement about the significant influence of social networks on consumer preferences of modern society in the field of choosing products for everyday nutrition [16].

In general, the analysis of publications devoted to the assessment of food quality, farm (organic) food products, innovations in the production and processing of agricultural products, the attitude of consumers to modern trends in food and the assessment of their quality allows us to formulate a number of conclusions:

1. Issues of food quality, including farm products, remain on the relevant research agenda regardless of the region of the world and the level of socio-economic development of the regions.

2. Active systematic involvement of consumers in food quality assessment is an important task in the organization of independent monitoring in national systems for ensuring the quality of agricultural products, their processing, and storage of food products.

3. Monitoring the perception of food quality and safety by consumers in social supermarkets contributes to decision-making; it is aimed at reducing food poverty and reducing food waste, optimizing the process of purchasing food using various digital solutions.

4. A small proportion of food consumers track and confidently understand modern technological innovations in food processing, packaging and storage, which makes it difficult to positively assess and consumer demand for such food. In this regard, it is necessary to conduct systematic educational work in the consumer environment and seek the adoption of innovations that ensure modern food quality, including taking into account the specifics of the work of chain stores.

5. The agro-ecological systems of the regions are linked to consumer trends in the field of food, support is needed not only for diversity, but to preserve the sustainability of agriculture and ecology, for the traditional production of organic/farm food in the frame of rural areas' sustainable development.

Purpose. Our study is devoted to determining the regional community's request for the quality of farm food through models of their perception.

Materials and methods

The study of the regional community's request for the quality of farm food was conducted in Stavropol Krai (Russia) by electronic questionnaire in April-May 2024. A total of 812 people took part in the survey. The stratified sample was implemented in 7 municipalities of Stavropol Krai, covering the territory according to the typification of the socio-economic situation (Stavropol, Nevinnomyssk, Pyatigorsk, Izobilnensky district, Kochubeyevsky district, Budenovskiy district, Ipatovskiy district). The theoretical model of the request for the quality of farm food reflects important, from the point of view of theoretical analysis, criteria related to the price of the product, trade dress, brand, information about the GOST (regulated standards) or TS (technical specification), imported or domestic production, the presence of preservatives, chemicals, nitrates, GMO, the availability of information about the benefits and naturalness,

the quality of packaging and packaging. The survey participants from among the residents of Stavropol Krai assessed each criterion for its importance in choosing farm food. A five-point scale was used for measurements, where 1 point indicates the lowest significance of the selection criterion and 5 points indicate the highest significance. The respondents could put any value from 1 point to 5 points, depending on their opinion.

Results

The results of a survey in which participants – representatives of the regional community of Stavropol Krai – evaluate farm food products depending on the significance of the characteristics: product price; trade dress; brand; information about GOST or TS; import or domestic production; without preservatives, chemicals, nitrites, GMO; availability of information about benefits and naturalness; packaging and packing.

The use of statistical factor analysis procedures to develop a structural model of significant criteria for evaluating farm food products makes it possible to determine the full explained variance. According to the results of statistical processing of the database of the expert survey in the SPSS Statistics program (version 27), the full explained variance was 84.286% and was determined by 2 components. The data is presented in table 1.

Table 1.

Full explained variance of the expert assessment

Component	Initial eigenvalues			Sums of squares of extraction loads			Sums of squares of rotational loads		
	Total	Discrepancy %	Cumulative %	Total	Discrepancy %	Cumulative %	Total	Discrepancy %	Cumulative %
1	5.469	68.361	68.361	5.469	68.361	68.361	3.667	45.833	45.833
2	1.274	15.925	84.286	1.274	15.925	84.286	3.076	38.453	84.286
3	0.448	5.594	89.881						
4	0.333	4.166	94.047						
5	0.299	3.743	97.790						
6	0.082	1.031	98.822						
7	0.053	0.659	99.481						
8	0.042	0.519	100.000						

Compiled by the authors

The listed 8 components in the theoretical model of criteria for choosing farm food were evaluated by the participants of the expert survey on a five-point scale. As a result of the factor analysis performed by Rotation Method:

Varimax with Kaiser Normalization (Rotation converged in 3 iterations), the criteria were grouped into 2 structural components.

Table 2.

**The selection of farm food by the regional community
(a matrix of rotated components describing the criteria's structure)**

Criteria for the selection of farm food	Component	
	1	2
1. Product price	0.216	0.904
2. Trade dress	0.147	0.938
3. Brand	0.953	-0.086
4. Information about GOST or TS	0.774	0.503
5. Import or domestic	0.803	0.336
6. Free of preservatives, chemicals, nitrates, GMO	0.684	0.531
7. Availability of information on the benefits and naturalness	0.765	0.470
8. Packing	0.625	0.709

Compiled by the authors

The data on the interpretation of the structural elements of the model describing the criteria for the selection of farm food by the regional community are presented in the table 3.

Table 3.

Interpretation of the structural elements of the model

The structural component of the model	Variables that determine the content of the structural component with a coefficient of factor loading	Interpretation of the structural component of the model
1 st structural component	Brand (0.953); import or domestic (0.803); information on GOST or TS (0.774); availability of information on benefits and naturalness (0.765); without preservatives, chemicals, nitrites, GMO (0.684).	Commitment to certain producers is the choice of farm food products based on trust in the brand, official information and labelling.
2 nd structural component	Trade dress (0.938); product price (0.904); packaging (0.709).	Situational selection of farm food products is based on a visual assessment of the product, packaging and current price.

Compiled by the authors

Thus, the implementation of factor analysis by the method of selecting the main components distributed 8 criteria for choosing farm food products into

2 structural components of the current model of preferences of the regional community:

1. Commitment to certain producers is the choice of farm food products, based on trust in the brand, official information and labelling. The share of component 1 in the fully explained variance is 45.833%.

2. Situational selection of farm food products is based on a visual assessment of the product, packaging and current price. The share of component 2 in the fully explained variance is 38.453%.

The conducted research shows a mathematically based structural model of the choice of farm food by the regional community.

Conclusion. The conducted research of the regional community's request for the quality of farm food makes it possible to draw theoretical and applied conclusions.

In the theoretical part, based on the traditional review of publications, it was established:

- issues of food quality, including farm products, remain on the relevant research agenda regardless of the region of the world and the level of socio-economic development of the regions;

- active systematic involvement of consumers in food quality assessment is an important task in the organization of independent monitoring in national systems for ensuring the quality of agricultural products, their processing, storage and food products;

- monitoring the perception of food quality and safety by consumers in social supermarkets contributes to decision-making, it is aimed at reducing food poverty and reducing food waste, optimizing the process of purchasing food using various digital solutions;

- a small proportion of food consumers track and confidently understand modern technological innovations in food processing, packaging and storage; it decreases a positive assess and consumer demand for such food. In this regard, it is necessary to conduct systematic educational work in the consumer environment and seek the adoption of innovations that ensure modern food quality, taking into account the specifics of the work of chain stores.

- the agro-ecological systems of the regions are linked to consumer trends in the field of food and it is necessary to support not only diversity to preserve the sustainability of agriculture and ecology, but also the traditional production of organic/farm food for the rural areas' sustainable development.

In the empirical part, an actual model of consumer demand for the quality of farm food products has been developed, which consists of 2 structural components:

– commitment to certain producers – the choice of farm food products based on trust in the brand, official information and labelling;

– situational choice of farm food products, based on a visual assessment of the product, packaging and current price. Packaging allows the consumer to notice the product on the counter among others and helps to make a first impression about it. Package appearance (shape, size, color, texture, image) it is able to draw attention to the product and influence the purchase decision [48].

The price also affects the choice: it is more likely to choose a product whose price is clearly visible, the price tag is located exactly under the product, corresponds to the size of the product and carries elements of the corporate identity of the store where the product is sold.

The obtained research data will help the farming community to position their products correctly and consider the prospects of going beyond the region.

Ethics Committee Conclusion. The survey was conducted on the principles of anonymity in accordance with the ethics of sociological research. Personal data or individual opinions of survey participants are not mentioned. The analysis uses generalized data (digital database) processed in the SPSS Statistics program (version 27).

Заключение комитета по этике. Опрос проведен на принципах анонимности в соответствии с этикой организации социологических исследований. Персональные данные или отдельные мнения участников опроса не упоминаются. В анализе использованы обобщенные данные (цифровая база данных), которые обработаны в программном пакете SPSS Statistics program (version 27).

Informed consent. Not applicable to mass sociological research conducted on an anonymous basis.

Информированное согласие. Не применимо для массовых социологических исследований, проведенных на условиях анонимности.

Conflict of interest information. There are no conflicts of interest.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Sponsorship information. The study was conducted with the support of the Stavropol State Agrarian University, a participant in the federal program “Priority-2030” as part of an internal university grant.

Информация о спонсорстве. Исследование проведено при поддержке ФГБОУ ВО Ставропольского ГАУ, участника федеральной программы «Приоритет-2030» в рамках внутреннего гранта университета.

References / Список литературы

1. Rambler. (2023). A third of farm products will be sold online by 2025. *Finance Rambler*. Retrieved from <https://finance.rambler.ru/economics/50161926-tret-fermerskoy-produktsii-budet-prodavatsya-onlayn-k-2025-godu/>
2. Aschemann-Witzel, J., Asioli, D., Banovic, M., Perito, M. A., & Peschel, A. O. (2023). Consumer understanding of upcycled foods - Exploring consumer-created associations and concept explanations across five countries. *Food Quality and Preference*, 112, 105033. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.105033>. EDN: <https://elibrary.ru/utyjal>
3. Atimango, A. O., Wesana, J., Kalule, S. W., Verbeke, W., & De Steur, H. (2024). Genome editing in food and agriculture: from regulations to consumer perspectives. *Current Opinion in Biotechnology*, 87, 103127. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103127>. EDN: <https://elibrary.ru/iubiqm>
4. Azlie, W. E., Zahari, M. S. M., Majid, H. N. A., & Hanafiah, M. H. (2023). To what extent does consumers' perceived health consciousness regarding organic food influence their dining choices at organic restaurants? An empirical investigation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 34, 100843. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100843>. EDN: <https://elibrary.ru/kitlba>
5. Bakharev, V. V., Mityashin, G. Yu., & Stepanova, T. V. (2023). Food security, food waste and food sharing: The conceptual analysis. *Food Systems*, 6(3), 390-396. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-390-396>. EDN: <https://elibrary.ru/snghjj>
6. Bartková, L., & Veselovská, L. (2024). Consumer behaviour under the dual quality of products: did testing manage to reveal what consumers experience? *IIMB Management Review*. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2024.05.001>
7. Berri, A., & Toma, L. (2023). Factors influencing consumer use of social supermarkets in the UK: A redistribution model providing low-cost surplus food. *Cleaner and Responsible Consumption*, 10, 100133. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100133>. EDN: <https://elibrary.ru/hvvvxxj>
8. Boccia, F., & Tohidi, A. (2024). Analysis of green word-of-mouth advertising behavior of organic food consumers. *Appetite*, 198, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2024.107324>. EDN: <https://elibrary.ru/ejmwrg>
9. Chiffolleau, Y., Dourian, T., Enderli, G., Mattioni, D., Akermann, G., Loconto, A., Galli, F., Emese, G., Perényi, Z., Colombo, L., Massari, S., & Desclaux, D. (2024). Reversing the trend of agrobiodiversity decline by co-developing food chains with consumers: A European survey for change. *Sustainable Production and Consumption*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.032>. EDN: <https://elibrary.ru/psbwdr>

10. Costa, M. J., Sousa, I., Moura, A. P., Teixeira, J. A., & Cunha, L. M. (2024). Food fraud conceptualization: An exploratory study with Portuguese consumers. *Journal of Food Protection*, 87(7), 100301. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100301>. EDN: <https://elibrary.ru/wvqnpq>
11. Ditlevsen, K., Denver, S., Christensen, T., & Lassen, J. (2020). A taste for locally produced food - Values, opinions and sociodemographic differences among 'organic' and 'conventional' consumers. *Appetite*, 147, 104544. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.104544>. EDN: <https://elibrary.ru/tnqdez>
12. Felletti, S., Marchetti, N., De Luca, Ch., Catani, M., Nosengo, Ch., Compagnin, G., Bozza, D., Franchina, F. A., Pasti, L., & Cavazzini, A. (2024). Recent developments and future perspectives of chiral liquid chromatography for food safety and quality. *Trends in Analytical Chemistry*, 176, 117740. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117740>. EDN: <https://elibrary.ru/bvycwv>
13. Gómez-Llorente, H., Hervás, P., Pérez-Esteve, E., Barat, L. M., & Fernández-Segovia, I. (2022). Nanotechnology in the agri-food sector: Consumer perceptions. *NanoImpact*, 26, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100399>. EDN: <https://elibrary.ru/jdvodz>
14. Hempel, C. (2024). A segmentation and characterization of consumers affected by rising food prices. *Appetite*, 194, 107192. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.107192>. EDN: <https://elibrary.ru/znpjft>
15. Ikramov, R., Mityashin, G., & Bakharev, V. (2021). Waste-free stores in Russia: A retrospective analysis, criticism, and analysis of the visitor's attitude. *E3S Web of Conferences*, 284, 11016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128411016>. EDN: <https://elibrary.ru/dmypwb>
16. Jürkenbeck, K., von Steimker, F., & Spiller, A. (2024). Consumer's perception of food pairing products with usual, novel and unusual flavour combinations: A segmentation approach. *Appetite*, 196, 107270. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2024.107270>. EDN: <https://elibrary.ru/vxdvcr>
17. Kamboj, S., Matharu, M., & Gupta, M. (2023). Examining consumer purchase intention towards organic food: An empirical study. *Cleaner and Responsible Consumption*, 9, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100121>. EDN: <https://elibrary.ru/pdkizg>
18. Kim, H. W., Cho, T. J., Kim, S. A., & Rhee, M. S. (2022). Consumer trend of using ready-to-use salted napa cabbage at home: Current consumer behaviors, beliefs, and opinions about the main ingredient of kimchi. *Journal of Food Protection*, 85(12). <https://doi.org/10.4315/JFP-22-022>. EDN: <https://elibrary.ru/kakocg>
19. Kotliarov, I. D. (2022). Heterogeneity of stakeholders as an obstacle to the development of agricultural cooperatives in Russia. *Russian Peasant Studies*,

- 7(4), 20-32. <https://doi.org/10.22394/2500-1809-2022-7-4-20-32>. EDN: <https://elibrary.ru/ljkeen>
20. Liu, Zh., Li, X., Wu, Ch., Zhang, R., & Khan Durrani, D. (2022). The impact of expectation discrepancy on food consumers' quality perception and purchase intentions: Exploring mediating and moderating influences in China. *Food Control*, 133(B), 108668. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108668>. EDN: <https://elibrary.ru/eaxduo>
21. Luo, N., Xu, D., Xing, B., Yang, X., & Sun, Ch. (2024). Principles and applications of convolutional neural network for spectral analysis in food quality evaluation: A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128, 105996. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.105996>. EDN: <https://elibrary.ru/dlhfbe>
22. Luu, H. P., Tran, T. T. H., & Truong, T. X. (2023). Factors affecting consumers' food safety behavior in Vietnam. *Food Control*, 143, 109294. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109294>. EDN: <https://elibrary.ru/xxnckj>
23. Macall, D. M., Williams, C., Gleim, S., & Smyth, S. J. (2021). Canadian consumer opinions regarding food purchase decisions. *Journal of Agriculture and Food Research*, 3, 100098. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100098>. EDN: <https://elibrary.ru/dakksh>
24. Marín-Díaz, A., Alvarez-Risco, A., Del-Aguila-Arcentales, Sh., Rojas-Cangahuala, G., & Yáñez, J. A. (2024). Evaluating the intention to purchase genetically modified food by consumers in Panama. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101194. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101194>. EDN: <https://elibrary.ru/cvtosg>
25. Melnikov, A. B., Mikhailushkin, P. V., & Kotok, N. Yu. (2021). Assessment of the level of food security in the world. *International Agricultural Journal*, 1(379). <https://doi.org/10.24412/2587-6740-2021-1-4-6>. EDN: <https://elibrary.ru/cbrsen>
26. Michno, L. A., Schutko, A. P., & Tuturzhans, L. V. (2021). Induced plant immunity as a factor of an integrated winter wheat disease protection system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 624(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012012>. EDN: <https://elibrary.ru/cebwo>
27. Nadricka, K., Millet, K., & Aydinli, A. (2024). Are consumers more or less averse to wasting organic food? *Journal of Environmental Psychology*, 93, 102222. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102222>. EDN: <https://elibrary.ru/loskef>
28. Petrova, A. V., & Donskova, L. A. (2022). Marketing approach to consumer product packaging. *Economics and Business: theory and practice*, 2(84). <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2022-284-144-148>. EDN: <https://elibrary.ru/jjdin>

29. Pereira das Neves, C., Eves, A., Lameiro Rodrigues, K., Fagundes de Mello, J., Kuka Valente Gandra, T., & Avila Gandra, E. (2024). Applying the theory of planned behavior with optimistic bias to understand food safety behaviors of young and middle-aged highly educated Brazilian consumers. *Food Control*, 163, 110551. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110551>. EDN: <https://elibrary.ru/xnuflhg>
30. Qi, Sh., Hamed, E. M., Ma, P., Cao, W., Fong Yau Li, S., & Wang, Z. (2024). Perovskite nanocrystals (PNCs) served as an emerging optical indicator for food safety and quality assessment: progress, challenges, and opportunities. *Coordination Chemistry Reviews*, 514, 215925. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215925>. EDN: <https://elibrary.ru/xjqvmk>
31. Rini, L., Schouteten, J. J., Faber, I., Frøst, M. B., Perez-Cueto, F. J. A., & De Steur, H. (2024). Social media and food consumer behavior: A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104290. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104290>. EDN: <https://elibrary.ru/muoupa>
32. Rizo, A., Bartu, A., Laguna, L., & Tarrega, A. (2023). Effect of an opinion app on expectations and emotional responses of young consumers toward white wines. *Food Quality and Preference*, 103, 104706. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104706>. EDN: <https://elibrary.ru/qselqv>
33. Rybak, G., Burton, Sh., & Berry, Ch. (2024). Reducing the negative impact of ultra-processed foods: Consumer response to natural claims, organic claims, and processing level disclosures. *Journal of Business Research*, 177, 114588. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114588>. EDN: <https://elibrary.ru/pkhejq>
34. Seo, Y., & Shigi, R. (2024). Understanding consumer acceptance of 3D-printed food in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 454, 142225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142225>. EDN: <https://elibrary.ru/vaqnvr>
35. Shahzad, Kh., Zhang, Q., Zafar, A. U., Shahzad, M. F., & Liu, W. (2024). Consumers' concerns and the role of blockchain technology in mobile food delivery applications. *Journal of Destination Marketing & Management*, 32, 100877. <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2024.100877>. EDN: <https://elibrary.ru/lxxwmz>
36. Sharma, Ch., & Deutsch, J. M. (2023). Upcycling in the context of biotechnology-based solutions for food quality, loss, and consumer perception. *Current Opinion in Biotechnology*, 81, 102920. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102920>. EDN: <https://elibrary.ru/lfprrm>
37. Shutko, A. P., Shek, E. G., Tuturzhans, L. V., Mikhno, L. A., & Pashkova, E. V. (2021). Sustainable Phytosanitary Development of the Host-Parasite System on the Example of Head Blight of Winter Wheat. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 206, 1037-1044. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7_114. EDN: <https://elibrary.ru/omryvq>

38. Shutko, A. P., Repukhova, N. V., Tuturzhans, L. V., & Mikhno, L. A. (2021). Potato moth (*Phthorimaea operculella* Zeller) regulation methods and reducing phytosanitary risks of its spread. *Research on Crops*, 22(Special Issue), 35-37. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2021.009>. EDN: <https://elibrary.ru/gekmpy>
39. Shutko, A. P., Oleynikov, Yu. A., Tuturzhans, L. V., & Mikhno, L. A. (2022). The Dynamics of Biological Diversity of Pests Within Agrocenoses of Agricultural Crops as a Factor of Digitalization in Plant Protection. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 264. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7633-8_22. EDN: <https://elibrary.ru/dencmz>
40. Song, K.-B., Lê, S., Kim, H.-R., Yoo, S.-M., Kang, M.-S., Chu, H.-N., Hwang, I.-N., & Hong, J.-H. (2024). Consumer-driven characterization of healing foods using Q methodology and Q based sorting. *Food Quality and Preference*, 117, 105181. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105181>. EDN: <https://elibrary.ru/ptyvlg>
41. Soós, G., & Lugasi, A. (2024). Consumer attitude research regarding food hypersensitivity. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 36, 100918. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100918>. EDN: <https://elibrary.ru/mzhxog>
42. Spendrup, S., Bergstrand, K.-J., Thörning, R., & Hultberg, M. (2024). Consumer attitudes towards hydroponic cultivation of vegetables - Specifically exploring the impact of the fertilisation strategy (using mineral origin or food waste as fertilisers). *Food Quality and Preference*, 113, 105085. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.105085>. EDN: <https://elibrary.ru/somldk>
43. Truong, V. A., Lang, B., & Conroy, D. M. (2022). When food governance matters to consumer food choice: Consumer perception of and preference for food quality certifications. *Appetite*, 168, 105688. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105688>. EDN: <https://elibrary.ru/gsetic>
44. Van der Merwe, D., Bosman, M., & Ellis, S. (2014). Consumers' opinions and use of food labels: Results from an urban-rural hybrid area in South Africa. *Food Research International*, 63, A. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.032>
45. Wahab, Y. A., Al-Ani, L. A., Khalil, I., Schmidt, S., Tran, N. N., Escribà-Gelionch, M., Wai Woo, M., Davey, K., Gras, S., Hessel, V., & Julkapli, N. M. (2024). Nanomaterials: A critical review of impact on food quality control and packaging. *Food Control*, 163, 110466. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110466>. EDN: <https://elibrary.ru/dcbhcy>
46. Wendt, M.-C., & Weinrich, R. (2023). Consumer Segmentation for Pesticide-free Food Products in Germany. *Sustainable Production and Consumption*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.005>. EDN: <https://elibrary.ru/ibtzrc>

47. Zaleskiewicz, H., Kulis, E., Siwa, M., Szczuka, Z., Banik, A., Grossi, F., Chrysoschou, P., Tore Nystrand, B., Perrea, T., Samoggia, A., Xhelili, A., Krystallis, A., & Luszczynska, A. (2024). Geographical context of European consumers' choices of alternative protein food: A systematic review. *Food Quality and Preference*, 117, 105174. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105174>. EDN: <https://elibrary.ru/adispj>
48. Zhao, S., Wu, J., Guo, Zh., Wang, D., Chen, J., Liu, Q., Ding, Ch., Guo, L., & Tao, T. (2024). Magnetic field technology in improving the quality of food refrigeration and freezing: Mechanisms, applications, and challenges. *Journal of Stored Products Research*, 106, 102254. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102254>. EDN: <https://elibrary.ru/vrlqtd>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Valentina A. Ivashova, Candidate of Social Sciences, Associate Professor, Head of the Department for Monitoring Educational and Social Processes
Stavropol State Agrarian University
12, Zootekhnicheskii Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation
vivashov@mail.ru
SPIN-code: 2416-6150
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7670-7278>
Scopus Author ID: 56203510400

Dmitry I. Gritsai, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of “Machines and Technologies of Agroindustrial complex”
Stavropol State Agrarian University
12, Zootekhnicheskii Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation
gritcay_kirill@mail.ru
SPIN-code: 4267-4394
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3277-9461>
Scopus Author ID: 57188722665

Lyubov I. Vysochkina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Processes and Machines in Agribusiness”

Stavropol State Agrarian University

12, Zootekhnicheskoy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation

lubasha_vis_67@list.ru

SPIN-code: 3608-6717

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-1585>

Scopus Author ID: 57189055693

Alexander P. Isaenko, Candidate of Economic Sciences, Dean of the Faculty, Associate Professor of the Department of Management

Moscow Finance and Law University

1A, Vvedensky Str., Moscow, 115191 Russian Federation

isaenko.aleksandr@bk.ru

SPIN-code: 8870-6697

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7086-7724>

Valerii V. Reimer, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economic Research

Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Center

All-Russian Scientific Research Institute of Soybean; Moscow Finance

and Law University

19, Ignatyevskoye Shosse, Blagoveshchensk, Amur Region, 675028, Russian Federation; 1A, Vvedensky Str., Moscow, 115191 Russian Federation

tion

Reymer.V@mfua.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5858-0464>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ивашова Валентина Анатольевна, к. социол. наук, доцент, начальник отдела мониторинга образовательных и социальных процессов
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет»

пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация

vivashov@mail.ru

Грицай Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Машины и технологии АПК»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет»
пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
gritcay_kirill@mail.ru

Высочкина Любовь Игоревна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Процессы и машины в агробизнесе»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет»
пер. Зоотехнический, 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация
lubasha_vis_67@list.ru

Исаенко Александр Павлович, кандидат экономических наук, декан факультета, доцент кафедры «Менеджмент»
Московский финансово-юридический университет
ул. Введенского, 1А, г. Москва, 115191, Российская Федерация
isaenko.aleksandr@bk.ru

Реймер Валерий Викторович, доктор экономических наук, профессор, зав. кафедрой экономических исследований
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр «Всероссийский научно-исследовательский институт сои»; Московский финансово-юридический университет
Игнатьевское шоссе, 19, г. Благовещенск, Амурская область, 675028, Российская Федерация; ул. Введенского, 1А, г. Москва, 115191, Российская Федерация
Reymer.V@mfua.ru

Поступила 26.07.2024

После рецензирования 07.11.2024

Принята 25.11.2024

Received 26.07.2024

Revised 07.11.2024

Accepted 25.11.2024

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ И СООБЩЕНИЯ

SCIENTIFIC REVIEWS AND REPORTS

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1142

EDN: UOPHUM

УДК 577.112.083:591.1.05:636.1



Научные обзоры

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОФОРЕЗА БЕЛКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ
МЕТАБОЛИЗМА ЛОШАДЕЙ
(ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)**

М.М. Атрощенко, Ю.А. Марсянова

Аннотация

Обоснование. Электрофорез является распространённым и эффективным методом оценки белкового профиля человека и животных. Метод разделения белков с помощью электрофореза хорошо зарекомендовал себя с момента открытия и в течение нескольких десятилетий развивался и совершенствовался. На современном этапе эта процедура не теряет актуальности и находит новые области применения.

Цель исследования. Изучить и проанализировать накопленный опыт в области применения методов детекции белков с помощью электрофореза, в частности для оценки метаболизма лошадей.

Материалы и методы. Литературный поиск производился по ключевым словам с использованием открытых баз данных: PubMed, eLibrary, Scopus, а также поисковой системы Академия Google. Были отобраны и проанализированы наиболее значимые работы по теме обзора.

Результаты. Молекулярная масса, размер и форма молекулы, а также её суммарный заряд – являются основными факторами, благодаря которым возможно разделение сложных смесей на отдельные фракции за счёт различия в скорости их движения. На успех разделения белковых смесей влияет не только природа протеинов, но и поддерживающая среда, которая должна соответствовать важным характеристикам: поддерживать оптимальный pH и пропускать молекулы

с определённой скоростью. Методы детекции белков также разнообразны, как и методы разделения: неселективное окрашивание с помощью кумасси бриллиантового синего, амидо-черного 10Б, серебра, флуоресцентных красителей, и селективное с помощью иммунопреципитации или энзимозлектрофореза.

Оценка метаболизма лошадей с помощью электрофореза распространяется практически на все области исследования: установление сезонных и возрастных изменений; анализ особенностей пород, субпопуляций и гибридов; оценка маркеров воспаления, некоторых патологий, таких, как язва, увеит, паразитарные и вирусные инфекции, миопатии, а также маркеров тренированности животных. В репродукции животных электрофорез может использоваться при оценке качества эякулята, для определения способности спермы к замораживанию, выявлении жизнеспособности сперматозоидов в том числе после криоконсервации, а также для выявления изменений во время жеребости кобыл.

Заключение. Метод электрофореза находит широкое применение в практике оценки метаболизма человека и животных, в том числе лошадей. Имеет высокую степень значимости для анализа популяционных, возрастно-половых и сезонных различий лошадей, а также находит своё применение в оценке работоспособности животных и репродуктивных технологиях.

Ключевые слова: нативный электрофорез; денатурирующий электрофорез; изоэлектрическое фокусирование; иммуноэлектрофорез; блоттинг; изоферменты; лошади; метаболизм

Для цитирования. Атрощенко, М. М., & Марсянова, Ю. А. (2025). Возможности использования электрофореза белков для оценки метаболизма лошадей (обзор литературы). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 500-528. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1142>

Scientific Reviews

POSSIBILITIES OF USING PROTEIN ELECTROPHORESIS TO ASSESS METABOLISM IN HORSES (LITERATURE REVIEW)

M.M. Atroshchenko, Yu.A. Marsyanova

Abstract

Background. Electrophoresis is a common and effective method for assessing the protein profile of humans and animals. The method of protein separation by electrophoresis has been well established since its discovery and has been devel-

oped and improved over several decades. At the present stage this procedure does not lose its relevance and finds new areas of application.

Purpose. To study and analyze the accumulated experience in the application of protein detection methods by electrophoresis, in particular for the assessment of equine metabolism.

Materials and methods. Literature search was performed by keywords using open databases: PubMed, eLibrary, Scopus, and Google Academic search engine. The most significant works on the topic of the review were selected and analyzed.

Results. The molecular weight, size and shape of the molecule as well as its total charge are the main factors that make it possible to separate complex mixtures into separate fractions due to differences in their velocity. Successful separation of protein mixtures is influenced not only by the nature of the proteins, but also by the supporting medium, which must fulfill important characteristics: maintain optimal pH and allow molecules to pass through at a certain speed. Protein detection methods are as varied as the separation methods: non-selective staining with Coomassie brilliant blue, amido black 10B, silver, fluorescent dyes, and selective by immuno-precipitation or enzyme electrophoresis.

The evaluation of equine metabolism by electrophoresis extends to virtually all areas of study: establishing seasonal and age-related changes; analyzing breed, subpopulation and hybrid traits; evaluating markers of inflammation, certain pathologies such as ulceration, uveitis, parasitic and viral infections, myopathies, and markers of animal fitness. In animal reproduction, electrophoresis can be used to assess the quality of ejaculate, to determine the ability of semen to freeze, to detect the viability of spermatozoa, including after cryopreservation, and to detect changes during mare foaling.

Conclusion. The electrophoresis method is widely used in the assessment of human and animal metabolism, including horses. It has a high degree of significance for the analysis of population, age-sex and seasonal differences in horses, and also finds its application in the assessment of animal performance and reproductive technologies.

Keywords: native electrophoresis; denaturing electrophoresis; isoelectric focusing; immunoelectrophoresis; blotting; isoenzymes; horses; metabolism

For citation. Atroshchenko, M. M., & Marsyanova, Yu. A. (2025). Possibilities of using protein electrophoresis to assess metabolism in horses (literature review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 500-528. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1142>

Уровень общего белка и определение активности ферментов являются наиболее распространёнными показателями в анализе биологических жид-

костей человека и животных [64]. Однако методы выделения индивидуальных белков, например, при исследовании белков острой фазы сыворотки крови [77] или определение активности отдельных изоферментов, как в случае с разделением внутриклеточных изоформ лактатдегидрогеназы [7], хотя и не относятся к рутинным, но являются весьма информативными и позволяют провести наиболее полный клинический лабораторный анализ.

Данный обзор посвящён методологическим вопросам применения на практике одного из распространённых способов выделения и детекции индивидуальных белков – электрофореза, а также оценке перспектив использования этого метода для исследования биологического материала лошадей.

Электрофорез и изoeлектрическое фокусирование

Метод электрофореза основан на способности белков двигаться в электрическом поле с разной скоростью, которая зависит от суммарного заряда белковой молекулы и её молекулярной массы [14]. Эти свойства протеинов задают требования всему методу: необходимость использования правильно подобранной поддерживающей среды и буферов с определённой pH в зависимости от объекта изучения, что позволяет фракционировать сложные смеси протеинов по определенным осям белково-химического пространства: молекулярной массе и заряду белка [61]. Поэтому в попытке обобщить сведения о процедуре электрофореза прежде всего стоит рассмотреть отдельно эти две составляющие, чтобы более полно понять, какая комбинация характеристик окажется наиболее полезной на практике.

В разные исторические периоды в качестве поддерживающей среды использовали проводящую жидкость, гели на основе крахмала, агарозы или целлюлозы, но наиболее широкое применение нашли полиакриламидные гели (ПААГ, PAGE, от англ. polyacrylamide gel electrophoresis), образующиеся при полимеризации растворов акриламида и бисакриламида, что позволяет получить носитель с заданной пористостью для выделения целевых белков [76]. Скорость движения белков в этом случае обратно пропорциональна массе молекулы, то есть, белки с высокой молекулярной массой останавливаются ближе к точке старта, где впоследствии детектируется так называемый бенд (от англ. band). Для более эффективного разделения белков последовательно применяют гели с разной плотностью: менее плотный для концентрирования образцов и более плотный – для разделения. Такую разновидность процедуры называют диск-электрофорез (от англ. discontinuous) [17]. Помимо плотности геля, то есть его пористости, поддерживающие среды при диск-электро-

форезе различаются значениями pH. Это также способствует лучшему разделению белковых смесей.

Общий заряд белка может оказать весомый вклад в скорость движения молекул, что используется при изоэлектрическом фокусировании. В этом случае гели имеют плавный градиент pH в тех областях значений, в которых лежит изоэлектрическая точка целевых белков. Протеины, движимые электрическим полем, останавливаются на определённом расстоянии от точки старта в той области геля, где значение pH среды равно их изоэлектрической точке, а суммарный заряд, соответственно, становится нулевым. В некоторых случаях полученные при изоэлектрическом фокусировании фракции белков повторно подвергают электрофорезу, где скорость движения зависит уже от молекулярной массы белка. Это позволяет получить более детальную протеинограмму. Такой подход получил название двумерный или 2D-электрофорез [14].

Основной проблемой разделения белков по массе является их способность образовывать молекулы различной пространственной конформации, что может повлиять на скорость их движения в плотной поддерживающей среде. Кроме того, в биологическом материале присутствуют белки разного состава, в том числе сложные белки, имеющие громоздкие небелковые компоненты, белки, ассоциированные с липидами, а также белок-белковые комплексы [52]. Непосредственно сам электрофорез [16] и некоторые комбинации методов позволяют решить проблему детектирования таких сложных молекул. Так, 2D-электрофорез применяют для установления некоторых особенностей внутримолекулярной структуры белков. Используя последовательно невосстановительные (при первом разделении) и восстановительные (при втором разделении) условия можно добиться определённой схемы расположения белков на пластине геля в зависимости от наличия внутри- и межмолекулярных дисульфидных сшивок. Такой метод за характерную диагональную линию, образованную белками, движущимися с одинаковой скоростью независимо от условий, назвали диагональный электрофорез [58].

С целью устранения влияния пространственной конформации белков на их разделение электрофорез проводят в так называемых денатурирующих условиях. Пробоподготовка при этом включает кипячение раствора протеина с додецилсульфатом натрия и меркаптоэтанолом, которые позволяют формировать на поверхности белка стабильный отрицательный заряд и препятствуют выпетливанию денатурированных цепей соответственно [25]. Наиболее популярной процедурой денатурирующего элек-

трофореза является модификация Леммли, описанная им ещё в 1970 году, но не теряющая актуальности [50]. Несмотря на то, что этот метод является наиболее популярным, он имеет существенный недостаток – невозможность исследовать свойства белка и установления его функции в нативной конформации. Поэтому наряду с денатурирующим электрофорезом также применяют нативный электрофорез или электрофорез в неденатурирующих условиях [17].

Для наблюдения за ходом движения фронта фореа применяют цветные низкомолекулярные заряженные вещества, так называемые отслеживающие красители, которые в силу своей природы движутся с более высокой скоростью, чем белки, и на электрофореграмме оказываются дальше от точки старта. Это позволяет наблюдать за ходом разделения в режиме реального времени и определить момент окончания работы по приближению фронта фореа к финишу, оценивать скорость процедуры по движению окрашенного вещества и качество полимеризации геля по плавности образуемой им линии [60]. А для определения молекулярной массы белков, составляющих тот или иной бенд, используют так называемые белковые маркеры – смесь белков известной молекулярной массы в комплексе с красителем, движение которых хорошо видно в процессе электрофореза, а окраска сохраняется и после проявления целевых белков [27].

Методы детекции белков

Поскольку содержание белков в загружаемых пробах невелико, невооружённым взглядом увидеть их распределение в поддерживающей среде невозможно. Для проявления бендов используют различные методы окраски: кумасси бриллиантовый синий, амидо-черный 10Б, серебро [17; 85], флуоресцентные красители [80]. Выбор красителя основан на их чувствительности, а, следовательно, зависит от содержания белков в исследуемом материале [69]. В некоторых случаях, когда концентрация белков слишком мала для обнаружения их стандартными методами, применяют реагенты, усиливающие сигнал от бендов, например, предварительная обработка флуоресцентными соединениями [86].

После окрашивания следует этап денситометрии, который включает сканирование гелей и обработку полученных снимков с помощью специальных программ, распознающих толщину бендов и интенсивность их окраски. Чем ярче проявляется окраска, тем больше бенд проявляет оптическую плотность, что расценивается, как высокое содержание белка, локализованного в этой точке поддерживающей среды [10; 69; 78]. Для

расшифровки электрофореграммы современные исследователи привлекают искусственный интеллект [41].

Красители, применяемые для детекции белков после электрофореза, связываются с белками неселективно, что позволяет получить полное представление о белковых фракциях, присутствующих в пробе. Однако этот способ не позволяет определить конкретные протеины. С этой целью применяют несколько различных методов: энзиматический метод окрашивания проб, иммуноэлектрофорез и блоттинг. Пористая природа геля позволяет низкомолекулярным субстратам проникать в поддерживающую среду и достигать активного центра фермента или связываться с белками по специфическим сайтам. Иммуноэлектрофорез сочетает электрофорез и иммунопреципитацию, что позволяет идентифицировать отдельные белки [29]. Метод энзиматического окрашивания, которое применяют только для нативного электрофореза, заключается в том, что субстраты подбираются таким образом, чтобы обеспечить высокую специфичность реакции и должны включать хромоген, обеспечивающий хороший аналитический эффект. При контакте с активным центром фермента, зафиксированного в поддерживающей среде, субстраты вступают в реакцию и хромоген проявляет свой цвет. Окрашенные пятна будут располагаться, соответственно, в местах локализации определяемого энзима, а интенсивность окрашивания будет пропорциональна его активности [17].

Реакции иммунопреципитации удобнее проводить не на гелевой пластинке, а на нитроцеллюлозной мембране. Для этого после разделения белков электрофорезом проводят процедуру переноса белковых фракций из одной среды в другую с помощью блоттинга [23; 51]. Большую популярность завоевал вестерн-блоттинг, который позволяет использовать сразу несколько антител для выявления целевых белков, что существенно облегчает работу и позволяет расширить границы применения метода [49]. Истерн-блоттинг применяется в основном для анализа посттрансляционных модификаций белков [73].

Практическое применение электрофореза и блоттинга: реальность и перспективы

Электрофорез используют не только для оценки молекулярной массы и количества белковых фракций в биоматериале, в том числе в сперме жеребцов [16; 28], но и для очистки биоматериала от молекул белково-пептидной природы [66] и анализа качества выделения целевых белков, например, гонадотропина сыворотки жеребых кобыл, который широко применяет-

ся в ветеринарии [13; 26; 70]. Кроме того, этот метод позволяет косвенно оценить модификацию белков по изменению скорости движения молекул [4; 22]. В сочетании с блоттингом возможности этого метода расширяются, а области применения охватывают не только диагностику состояния здоровья и научные исследования, но и производство диагностических наборов, обладающих высокой точностью анализа [5].

Кроме того, метод разделения белков с помощью электрофореза благодаря возможности изучать полиморфизм белков хорошо зарекомендовал себя в анализе особенностей генетической структуры пород лошадей [59; 75] и их субпопуляций [2; 3; 12], а также гибридов [33], что представляет большой интерес для селекции животных.

Показано, что протеомный состав плазмы крови лошадей меняется в зависимости от кормовой базы [72], сезона [1; 2] и возраста, что выявляется электрофорезом и может быть использовано для оценки биологического возраста животных и должно учитываться при биохимическом анализе крови [65]. Определение сывороточного амилоида А имеет более высокую прогностическую значимость, чем традиционные маркеры воспаления [18; 71]. Научный интерес представляет определение таких белков и их компонентов, как ферритин [37]. Метод электрофореза позволяет выявить белковые маркеры язвы желудка в крови [79] и слюне [53] лошадей, что имеет практическую значимость не только для диагностики патологии, но и для оценки качества лечения. Идентификация проангиогенных факторов в крови в сочетании с IgM, IgG4 HC, серотрансферрином, альфа-2HS-гликопротеином и фактором комплемента В могут быть использованы для оценки степени развития рецидивирующего увеита лошадей и прогнозирования рецидивов этого заболевания [89]. А тирозинкиназа KIT – клеточный гомолог вирусного онкогена, выявляемый с помощью вестерн-блоттинга, может быть использована для идентификации и выделения дифференцирующихся половых клеток жеребцов [44]. Диагностическую значимость имеет и маркер метаболизма железа гепсидин-25 [56].

С помощью методов выделения белков голландскими и японскими исследователями установлено, что миопатии, в частности острый рабдомиолиз, сопровождаются повышением экспрессии альфа-актина, альфа-цепи тропомиозина и М-цепи креатинкиназы в мышцах лошадей; определение этих протеинов в крови может быть использовано для постановки точного диагноза, прогнозирования возможности животных переносить физическую нагрузку [21], а уровень альфа-1-антитрипсина и изоформ миозина – как маркер эффективности тренировок [20; 62].

Бразильская команда учёных использовала электрофорез в сочетании с ферментативной реакцией, проанализировав содержание гликозаминогликанов синовиальной жидкости. Результаты этого исследования показали, что повреждение хряща происходит даже при бессимптомном остеохондрозе, что характеризует гликозаминогликаны, как маркеры состояния суставов [54]. Научный опыт специалистов из Турции демонстрирует, как исследовательский интерес к белкам сурфактанта синовиальной жидкости лошадей SP-A и SP-D [47] привёл к пониманию их биологической значимости в других тканях, например, в половых путях лошадей обоего пола, предстательной железе, семенниках и пузырьковидных железах у жеребцов [45; 46].

Метод электрофореза используется и для определения прогестерон-зависимых белков, вырабатывающихся на протяжении всей жеребости у кобыл: матерокалина и утероферрина [34], а также для выявления эндометриальных белков [36].

Анализ белкового профиля является ценным источником информации при исследовании эякулята жеребцов, например, при определении способности к замораживанию оценивают белки семенной плазмы, выделяя маркёры криоустойчивости [43], для прогнозирования фертильности по белковому профилю семенной плазмы [22]. Оценка белковых компонентов эякулята может проводиться с целью поиска терапевтических мишеней, как, например, описано в исследовании компонентов серотонинергической системы [42].

Не менее популярным направлением электрофореза, помимо определения протеинограммы, является детекция ДНК [11]. Однако и сами сперматозоиды благодаря наличию на их поверхности высокосиалированных белков обладают зарядом, что делает их пригодными для разделения с помощью электрического поля. На этом основан метод селекции сперматозоидов – электрофорез клеток, при котором отсеиваются нейтрально и положительно заряженные, повреждённые сперматозоиды, и появляется возможность отобрать для искусственного оплодотворения наиболее пригодные отрицательно заряженные клетки, что особенно важно при работе с криоконсервированной спермой [8; 68]. Помимо этого, электрофорез отдельных клеток используется для определения разрывов одно- и двуцепочечной ДНК сперматозоидов [15; 67]. Успех использования репродуктивных клеток после криоконсервации обусловлен не только сохранностью ДНК, но и целостностью митохондрий, что можно отследить с помощью электрофореза с лазерно-индуцированной флуоресценцией по количеству АТФ [88].

Выделение специфических белков используется, в том числе, для серологических исследований в диагностики паразитарных [57] и вирусных болезней [13]. Так, электрофорез и блоттинг применяются для выявления основного липопротеина однолюклярного эхинококка [55; 87], белковых маркеров стрептококка [40] и стафилококка [19], для диагностики лейшманиоза [31], протозойного миеоэнцефалита [38], трипаносомоза [30] и других. Также электрофорез применяют для очистки белковых смесей, с целью выделения антигенов для последующего использования их в качестве вакцин [32].

Особую диагностическую ценность представляет определение активности изоферментов, в том числе специфических которое успешно проводят с помощью электрофореза. Так, некоторые исследователи используют этот метод для определения аллелей белков и ферментов у разных пород лошадей [9], оценке активности изоформ ацилфосфатазы [63], терминального фермента электрон-транспортной цепи цитохромоксидазы [84], холинэстеразы [74], цитохрома P450 [24], протеинкиназы C [83], металлопротеиназ и циклооксигеназы [81; 82] и глутатионпероксидазы [39]. При этом исследования возможны как в биоматериале, полученном от животных, так и полученном с помощью технологий клеточного культивирования.

Однако, как и все методы, электрофорез имеет ограничения. Например, учёным из Онтарио не удалось установить тканевую принадлежность изоформ щелочной фосфатазы в сыворотке крови [35].

Оценка изоферментного спектра различных энзимов служит эффективным критерием отслеживания и прогнозирования адаптационных механизмов при различных патологических состояниях. Так, в условиях гипоксии при сохранении общей активности важнейшего фермента адаптации – лактатдегидрогеназы (ЛДГ) – существенно изменяется его изоферментный спектр, включающий не только цитоплазматическую, но и митохондриальную фракции, а в тканях мужской половой системы, представленный кроме основных пяти фракций ещё шестой – специфической изоформой [6, 7]. Эти колебания могут быть не замечены при рутинном исследовании активности фермента, но имеют глобальные последствия для метаболизма тканей. Отмечаются также возрастные изменения, связанные с распределением изоформ лактатдегидрогеназы мышц у лошадей, так, показано, что процентное содержание ЛДГ1 повышалась с возрастом, что ассоциировано с усилением использования лактата в качестве энергетического субстрата [48].

Заключение

Методы выделения и детекции белков, их изоформ и модификаций широко применяются современными исследователями не только в научных целях, но и в диагностике распространённых заболеваний лошадей, мониторинге состояния их здоровья при тренировках, смене рациона, взрослении и других физиологических изменениях, таких как беременность. Наиболее распространённым способом оценки белкового профиля является электрофорез – методика фракционирования биополимеров, основанная на их уникальных свойствах. Этот метод хорошо зарекомендовал себя с момента открытия и в течение нескольких десятилетий развивался и совершенствовался. Применение его модернизаций в сочетании с различными способами детекции открывает широкие перспективы его использования. В частности, электрофорез – доступный и относительно простой способ мониторинга репродуктивного здоровья лошадей на молекулярном уровне, распространяющийся на исследования как нативного биоматериала, так и материала, подвергшегося криоконсервации.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 20-16-00101-П.

Список литературы

1. Григорьева, Н. Н., & Григорьев, С. Н. (2022). Показатели аминокислотного состава крови якутской породы лошади. В *Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения)* (с. 412-418). Якутск: Издательство «Знание-М». EDN: <https://elibrary.ru/lnacaq>
2. Григорьева, Н. Н., & Павлова, А. И. (2008). Некоторые гематологические показатели лошадей якутской породы по экотипам. *Аграрный вестник Урала*, 1(43), 50-52. EDN: <https://elibrary.ru/iyqavz>
3. Додохов, В. В., & Филиппова, Н. П. (2015). Полиморфизм белков сыворотки крови лошадей якутской породы. *Потенциал современной науки*, 4(12), 70-75. EDN: <https://elibrary.ru/txnuwr>

4. Завьялова, О. А., Марсянова, Ю. А., Иштулин, А. Ф., и др. (2021). Влияние металлов переменной валентности на окислительную модификацию аминокислотных остатков альбумина. *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*, 9(3), 369-376. <https://doi.org/10.23888/HMJ202193369-376>. EDN: <https://elibrary.ru/dltlym>
5. Марданлы, С. Г., Авдонина, А. С., & Затевалов, А. М. (2021). Иммуный блоттинг для выявления специфических иммуноглобулинов класса «М» к коронавирусу SARS-CoV-2. *Известия ГГТУ. Медицина, фармацевтика*, 3, 45-53. EDN: <https://elibrary.ru/trmjll>
6. Марсянова, Ю. А., Звягина, В. И., Бельских, Э. С., и др. (2024). Аргинин и сукцинат как факторы, поддерживающие окислительное фосфорилирование митохондрий при гипоксии. *Известия ГГТУ. Медицина, фармацевтика*, 2, 10-18. <https://doi.org/10.51620/2687-1521-2024-2-18-10-18>. EDN: <https://elibrary.ru/qhlioe>
7. Марсянова, Ю. А., Звягина, В. И., & Соловых, Д. А. (2023). Влияние модуляции синтеза оксида азота (II) при хронической нормобарической гипоксии на изоферментный спектр лактатдегидрогеназы эпидидимиса крыс. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 26(1), 49-54. <https://doi.org/10.29296/25877313-2023-01-09>. EDN: <https://elibrary.ru/ibjovn>
8. Назаренко, Р. В., & Здановский, В. М. (2019). Методы селекции сперматозоидов для процедуры интрацитоплазматической инъекции сперматозоида в программах экстракорпорального оплодотворения (обзор литературы). *Проблемы репродукции*, 25(2), 83-89. <https://doi.org/10.17116/repro20192502183>. EDN: <https://elibrary.ru/rvnrrsh>
9. Ниятшин, Ф. И., Долматова, И. Ю., & Ганиева, И. Н. (2015). Анализ генетической структуры лошадей башкирской породы по полиморфным белкам и ферментам крови. В *Аграрная наука в инновационном развитии АПК: материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 85-летию Башкирского государственного аграрного университета, в рамках XXV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2015»* (Часть II, с. 139-143). Уфа: Башкирский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/ubayil>
10. Парахин, А. С., Габриелян, А. В., Деменин, В. Ю., и др. (2020). Применение комбинации методов очистки и анализа фракций белков на примере электрофоретического анализа амилолитических ферментов. В *Фундаментальные и прикладные исследования в сфере естествознания и технических наук: гипотезы, идеи, результаты: Сборник научных трудов по*

- материалам Международной научно-практической конференции (с. 24-28). Белгород: ООО «Агентство перспективных научных исследований». EDN: <https://elibrary.ru/jcplnk>
11. Тарасенко, С. В., Натальский, А. А., Песков, О. Д., Богомолов, А. Ю., Никифоров, А. А., Авилушкина, Е. О., & Тараканов, П. В. (2021). Возможности ранней диагностики и прогнозирования осложнённых клинических форм хронического панкреатита. *Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова*, 29(2), 267-275. <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ34887>. EDN: <https://elibrary.ru/rrlcpk>
 12. Целовальникова, М. И. (2010). Возможность использования полиморфных белков и ферментов сыворотки крови при контроле происхождения лошадей карачаевской породы. *Сельскохозяйственный журнал*, 3(1), 96-97. EDN: <https://elibrary.ru/nwawwb>
 13. Юров, Г. К., Алексеенкова, С. В., Диас Хименес, К. А., и др. (2013). Иммунологические методы диагностики инфекционной анемии лошадей. *Российский ветеринарный журнал*, 1, 28-30. EDN: <https://elibrary.ru/pyedot>
 14. Adams, L. D., & Gallagher, S. R. (2005). Two-dimensional gel electrophoresis. *Curr Protoc Immunol*, chapter 8:8.5.1-8.5.24. <https://doi.org/10.1002/0471142735.im0805s68>
 15. Agarwal, A., Barbăroşie, C., Ambar, R., et al. (2020). The Impact of Single- and Double-Strand DNA Breaks in Human Spermatozoa on Assisted Reproduction. *Int J Mol Sci*, 21(11), 3882. <https://doi.org/10.3390/ijms21113882>. EDN: <https://elibrary.ru/phkedt>
 16. Agrícola, R., Carvalho, H., Barbosa, M., et al. (2008). Blood lymphocyte subpopulations, neutrophil phagocytosis and proteinogram during late pregnancy and postpartum in mares. *Reprod Domest Anim*, 43(2), 212-217. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00879.x>
 17. Arakawa, T., Nakagawa, M., Sakuma, C., et al. (2024). Electrophoresis, a transport technology that transitioned from moving boundary method to zone method. *Eur Biophys J*, 53(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00249-023-01694-5>. EDN: <https://elibrary.ru/uaebpw>
 18. Belgrave, R. L., Dickey, M. M., Arheart, K. L., et al. (2013). Assessment of serum amyloid A testing of horses and its clinical application in a specialized equine practice. *J Am Vet Med Assoc*, 243(1), 113-119. <https://doi.org/10.2460/javma.243.1.113>
 19. Bergström, K., Aspan, A., Landén, A., et al. (2012). The first nosocomial outbreak of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in horses in Sweden. *Acta Vet Scand*, 54(1), 11. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-54-11>. EDN: <https://elibrary.ru/ghtefo>

20. Bouwman, F. G., van Ginneken, M. M., Noben, J. P., et al. (2010). Differential expression of equine muscle biopsy proteins during normal training and intensified training in young standardbred horses using proteomics technology. *Comp Biochem Physiol Part D Genomics Proteomics*, 5(1), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2009.11.001>
21. Bouwman, F. G., van Ginneken, M. M., van der Kolk, J. H., et al. (2010). Novel markers for tying-up in horses by proteomics analysis of equine muscle biopsies. *Comp Biochem Physiol Part D Genomics Proteomics*, 5(2), 178-183. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2010.03.009>
22. Brandon, C. I., Heusner, G. L., Caudle, A. B., et al. (1999). Two-dimensional polyacrylamide gel electrophoresis of equine seminal plasma proteins and their correlation with fertility. *Theriogenology*, 52(5), 863-873. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(99\)00178-8](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(99)00178-8)
23. Burnette, W. N. (1981). "Western blotting": electrophoretic transfer of proteins from sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gels to unmodified nitrocellulose and radiographic detection with antibody and radioiodinated protein A. *Anal Biochem*, 112(2), 195-203. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(81\)90281-5](https://doi.org/10.1016/0003-2697(81)90281-5)
24. Byard, J., Marshall, D. E., Houghton, E., et al. (1996). Novel approaches to the purification and identification of cytochrome P450 enzymes in the equine. *Biochem Soc Trans*, 24(2), 208S. <https://doi.org/10.1042/bst024208s>
25. Cannon-Carlson, S., & Tang, J. (1997). Modification of the Laemmli sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis procedure to eliminate artifacts on reducing and nonreducing gels. *Anal Biochem*, 246(1), 146-148. <https://doi.org/10.1006/abio.1997.2002>
26. Choudhary, S., Kumaresan, A., Kumar, M., et al. (2017). Effect of recombinant and native buffalo OVGPI on sperm functions and in vitro embryo development: a comparative study. *J Anim Sci Biotechnol*, 8, 69. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0201-5>. EDN: <https://elibrary.ru/irphkt>
27. Chubatsu, L. S., Gerhardt, E. C. M., & Souza, E. M. (2023). A simple preparation of prestained molecular markers for electrophoresis using inexpensive and readily available proteins. *Anal Biochem*, 1(676), 115231. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2023.115231>. EDN: <https://elibrary.ru/glbtcg>
28. Collinder, E., Berge, G. N., Grønvold, B., et al. (2000). Influence of bacitracin on microbial functions in the gastrointestinal tract of horses. *Equine Vet J*, 32(4), 345-350. <https://doi.org/10.2746/042516400777032165>
29. Csako, G. (2019). Immunoelectrophoresis: A Method with Many Faces. *Methods Mol Biol*, 1855, 249-268. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8793-1_21

30. de Menezes, V. T., Queiroz, A. O., Gomes, M. A., et al. (2004). Trypanosoma evansi in inbred and Swiss-Webster mice: distinct aspects of pathogenesis. *Parasitol Res*, 94(3), 193-200. <https://doi.org/10.1007/s00436-004-1207-4>. EDN: <https://elibrary.ru/qxpima>
31. Dedet, J. P. (2000). Les leishmanioses: actualités [Leishmaniasis: update]. *Presse Med*, 29(18), 1019-1026.
32. Dezhabad, A., Dalimi, A., Hoghooghi Rad, N., et al. (2023). Secretory Excretory and Somatic Immunogenic Antigens Profiles of Adult Fasciola spp. *Arch Razi Inst*, 78(1), 435-443. <https://doi.org/10.22092/ARI.2022.359262.2393>
33. Dias, G. M., López, M. L., Ferreira, A. T., et al. (2014). Thiol-disulfide proteins of stallion epididymal spermatozoa. *Anim Reprod Sci*, 145(1-2), 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2013.12.007>
34. Ellenberger, C., Wilsher, S., Allen, W. R., et al. (2008). Immunolocalisation of the uterine secretory proteins uterocalin, uteroferrin and uteroglobin in the mare's uterus and placenta throughout pregnancy. *Theriogenology*, 70(5), 746-757. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.04.050>
35. Ellison, R. S., & Jacobs, R. M. (1990). An attempt to determine the tissue origin of equine serum alkaline phosphatase by isoelectric focusing. *Can J Vet Res*, 54(1), 119-125.
36. Franco, M. M., Santos, J. B., Mendonça, A. S., et al. (2016). Quick method for identifying horse (Equus caballus) and donkey (Equus asinus) hybrids. *Genet Mol Res*, 15(3), gmr.15038895. <https://doi.org/10.4238/gmr.15038895>
37. González, P. M., & Puntarulo, S. (2011). Iron and nitrosative metabolism in the Antarctic mollusc Laternula elliptica. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*, 153(2), 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2010.11.003>
38. Granstrom, D. E. (1995). Recent advances in the laboratory diagnosis of equine parasitic diseases. *Vet Clin North Am Equine Pract*, 11(3), 437-442. [https://doi.org/10.1016/s0749-0739\(17\)30309-7](https://doi.org/10.1016/s0749-0739(17)30309-7)
39. Grignard, E., Morin, J., Vernet, P., et al. (2005). GPX5 orthologs of the mouse epididymis-restricted and sperm-bound selenium-independent glutathione peroxidase are not expressed with the same quantitative and spatial characteristics in large domestic animals. *Theriogenology*, 64(4), 1016-1033. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.01.008>
40. Groschup, M., Müller, H. P., Weiss, R., et al. (1990). Studies of antigenic components in acid extracts of group C streptococci with special reference to Streptococcus equi. *Zentralbl Bakteriol*, 273(4), 459-470. [https://doi.org/10.1016/s0934-8840\(11\)80453-6](https://doi.org/10.1016/s0934-8840(11)80453-6)
41. He, H., Wang, L., Wang, X., & Zhang, M. (2024). Artificial intelligence in serum protein electrophoresis: history, state of the art, and perspective. *Crit Rev Clin Lab Sci*, 61(3), 226-240. <https://doi.org/10.1080/10408363.2023.2274325>

42. Jiménez-Trejo, F., Coronado-Mares, I., Boeta, M., et al. (2018). Identification of serotonergic system components in stallion sperm. *Histol Histopathol*, 33(9), 951-958. <https://doi.org/10.14670/HH-11-989>
43. Jobim, M. I., Trein, C., Zirkler, H., et al. (2011). Two-dimensional polyacrylamide gel electrophoresis of equine seminal plasma proteins and their relation with semen freezability. *Theriogenology*, 76(4), 765-771. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.04.010>
44. Jung, H., Song, H., & Yoon, M. (2015). The KIT is a putative marker for differentiating spermatogonia in stallions. *Anim Reprod Sci*, 152, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.11.004>
45. Kankavi, O., Ata, A., & Akif Ciftcioglu, M. (2006). Surfactant protein A and D in the reproductive tract of stallion. *Theriogenology*, 66(5), 1057-1064. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2006.02.047>
46. Kankavi, O., Ata, A., & Gungor, O. (2007). Surfactant proteins A and D in the genital tract of mares. *Anim Reprod Sci*, 98(3-4), 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2006.03.009>
47. Kankavi, O., & Roberts, M. S. (2004). Detection of surfactant protein A (SP-A) and surfactant protein D (SP-D) in equine synovial fluid with immunoblotting. *Can J Vet Res*, 68(2), 146-149
48. Kitaoka, Y., Hoshino, D., Mukai, K., et al. (2011). Effect of growth on monocarboxylate transporters and indicators of energy metabolism in the gluteus medius muscle of Thoroughbreds. *Am J Vet Res*, 72(8), 1107-1111. <https://doi.org/10.2460/ajvr.72.8.1107>
49. Kurien, B. T., & Scofield, R. H. (2006). Western blotting. *Methods*, 38(4), 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2005.11.007>
50. Laemmli, U. K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, 227(5259), 680-685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
51. Landsberger, M., & Brinkmeier, H. (2023). Immunoblot Analysis of DIGE-Based Proteomics. *Methods Mol Biol*, 2596, 429-443. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2831-7_29
52. Lee, C. H. (2017). A Simple Outline of Methods for Protein Isolation and Purification. *Endocrinol Metab (Seoul)*, 32(1), 18-22. <https://doi.org/10.3803/EnM.2017.32.1.18>
53. López-Martínez, M. J., Lamy, E., Cerón, J. J., et al. (2024). Changes in the saliva proteome analysed by gel-proteomics in horses diagnosed with equine gastric ulcer syndrome (EGUS) at diagnosis and after successful treatment. *Res Vet Sci*, 167, 105112. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2023.105112>. EDN: <https://elibrary.ru/noxsyi>

-
54. Machado, T. S., Correia da Silva, L. C., Baccarin, R. Y., et al. (2012). Synovial fluid chondroitin sulphate indicates abnormal joint metabolism in asymptomatic osteochondritic horses. *Equine Vet J*, 44(4), 404-411. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2011.00539.x>
55. Maher, A., Toaleb, N. I., & Shaapan, R. M. (2024). Human and camel cystic echinococcosis - a polyclonal antibody-based sandwich ELISA for its serodiagnosis with molecular identification. *Vet Res Commun*, 26. <https://doi.org/10.1007/s11259-024-10375-3>. EDN: <https://elibrary.ru/almtgz>
56. Martin, G. B., Mansion, F., Servais, A. C., et al. (2009). CE-MS method development for peptides analysis, especially hepcidin, an iron metabolism marker. *Electrophoresis*, 30(15), 2624-2631. <https://doi.org/10.1002/elps.200800794>
57. Martínez-Torrecuadrada, J. L., Díaz-Laviada, M., Roy, P., et al. (1997). Serologic markers in early stages of African horse sickness virus infection. *J Clin Microbiol*, 35(2), 531-535. <https://doi.org/10.1128/jcm.35.2.531-535.1997>
58. McDonagh, B. (2012). Diagonal electrophoresis for the detection of protein disulfides. *Methods Mol Biol*, 869, 309-315. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-821-4_26
59. McGuire, T. R., & Weitkamp, L. R. (1980). Equine marker genes. Polymorphism for transferrin alleles, TfF1 and TfF2, in Thoroughbreds. *Anim Blood Groups Biochem Genet*, 11(2), 113-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.1980.tb01501.x>
60. Mendoza, L., Gunawardhana, T., Batchelor, W., et al. (2019). Nanocellulose for gel electrophoresis. *J Colloid Interface Sci*, 540, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.017>
61. Minden, J. (2007). Comparative proteomics and difference gel electrophoresis. *Biotechniques*, 43(6), 739-745. <https://doi.org/10.2144/000112653>
62. Miyata, H., Sugiura, T., Kai, M., et al. (1999). Muscle adaptation of Thoroughbred racehorses trained on a flat or sloped track. *Am J Vet Res*, 60(12), 1536-1539
63. Mizuno, Y., Ohba, Y., Fujita, H., et al. (1989). Activity staining of acylphosphatase after gel electrophoresis. *Anal Biochem*, 183(1), 46-49. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(89\)90169-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(89)90169-3)
64. Naumenkova, V. A., Khrabrova, L. A., & Atroshchenko, M. M. (2023). Analysis of the interconnection of stallion semen indicators with genetic markers of proteins. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(4), 197-209. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-197-209>. EDN: <https://elibrary.ru/hurkbr>
65. Paltrinieri, S., Giordano, A., Villani, M., et al. (2008). Influence of age and foaling on plasma protein electrophoresis and serum amyloid A and their possible

- role as markers of equine neonatal septicemia. *Vet J*, 176(3), 393-396. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.05.018>
66. Poltep, K., Tesena, P., Yingchutrakul, Y., et al. (2018). Optimisation of a serum albumin removal protocol for use in a proteomic study to identify the protein biomarkers for silent gastric ulceration in horses. *J Equine Sci*, 29(3), 53-60. <https://doi.org/10.1294/jes.29.53>
67. Qiu, Y., Yang, H., Li, C., et al. (2020). Progress in Research on Sperm DNA Fragmentation. *Med Sci Monit*, 26, e918746. <https://doi.org/10.12659/MSM.918746>. EDN: <https://elibrary.ru/uducde>
68. Rappa, K. L., Rodriguez, H. F., Hakkarainen, G. C., et al. (2016). Sperm processing for advanced reproductive technologies: Where are we today? *Biotechnol Adv*, 34(5), 578-587. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.01.007>
69. Ren, G., Okerberg, C. K., & Mathews, S. T. (2012). Ultrasensitive protein detection and imaging: comparison of Lumitein™, ProteoSilver™, SYPRO® Ruby, and Coomassie® Brilliant Blue gel stains. *Methods Mol Biol*, 869, 621-632. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-821-4_57
70. Rodriguez, M. C., Mussio, P. E., Villaraza, J., et al. (2023). Physicochemical Characterization of a Recombinant eCG and Comparative Studies with PMSG Commercial Preparations. *Protein J*, 42(1), 24-36. <https://doi.org/10.1007/s10930-023-10092-x>. EDN: <https://elibrary.ru/zbvlvc>
71. Sander, S. J., Joyner, P. H., Cray, C., et al. (2016). Acute phase proteins as a marker of respiratory inflammation in Przewalski's horse (*Equus Ferus Przewalskii*). *J Zoo Wildl Med*, 47(2), 654-658. <https://doi.org/10.1638/2015-0059.1>
72. Schultze, A. E., Rohrbach, B. W., Fribourg, H. A., et al. (1999). Alterations in bovine serum biochemistry profiles associated with prolonged consumption of endophyte-infected tall fescue. *Vet Hum Toxicol*, 41(3), 133-139.
73. Shan, S., Tanaka, H., & Shoyama, Y. (2001). Enzyme-linked immunosorbent assay for glycyrrhizin using anti-glycyrrhizin monoclonal antibody and an eastern blotting technique for glucuronides of glycyrrhetic acid. *Anal Chem*, 73(24), 5784-90. <https://doi.org/10.1021/ac0106997>
74. Shibata, H., & Shibuya, A. (1995). Cholinesterase. *Nihon Rinsho*, 53(5), 1173-1177. (на японском языке)
75. Shin, J. A., Yang, Y. H., Kim, H. S., et al. (2002). Genetic polymorphism of the serum proteins of horses in Jeju. *J Vet Sci*, 3(4), 255-263.
76. Smith, B. J. (1984). SDS Polyacrylamide Gel Electrophoresis of Proteins. *Methods Mol Biol*, 41-55. <https://doi.org/10.1385/0-89603-062-8>
77. Souto, P. C., Fonseca, L. A. D., Orozco, A. M. O., et al. (2019). Acute-Phase Proteins of Healthy Horses and Horses Naturally Affected by Colic Syndrome. *J Equine Vet Sci*, 80, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.06.002>

78. Tan, H. Y., Ng, T. W., & Liew, O. W. (2007). Effects of light spectrum in flat-bed scanner densitometry of stained polyacrylamide gels. *Biotechniques*, 42(4), 474-478. <https://doi.org/10.2144/0001124>
79. Tesena, P., Yingchutrakul, Y., Roytrakul, S., et al. (2019). Searching for serum protein markers of equine squamous gastric disease using gel electrophoresis and mass spectrometry. *Equine Vet J*, 51(5), 581-586. <https://doi.org/10.1111/evj.13068>
80. Tomioka, Y., Nakagawa, M., Sakuma, C., et al. (2022). Analysis of bovine serum albumin unfolding in the absence and presence of ATP by SYPRO Orange staining of agarose native gel electrophoresis. *Anal Biochem*, 654, 114817. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2022.114817>. EDN: <https://elibrary.ru/gneuml>
81. Tung, J. T., Fenton, J. I., Arnold, C., et al. (2002). Recombinant equine interleukin-1 β induces putative mediators of articular cartilage degradation in equine chondrocytes. *Can J Vet Res*, 66(1), 19-25.
82. Tung, J. T., Venta, P. J., Eberhart, S. W., et al. (2002). Effects of anti-arthritis preparations on gene expression and enzyme activity of cyclooxygenase-2 in cultured equine chondrocytes. *Am J Vet Res*, 63(8), 1134-1139. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2002.63.1134>
83. van Ginneken, M. M., Keizer, H. A., Wijnberg, I. D., et al. (2004). Immunohistochemical identification and fiber type specific localization of protein kinase C isoforms in equine skeletal muscle. *Am J Vet Res*, 65(1), 69-73. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2004.65.69>
84. Van Kuilenburg, A. B., Dekker, H. L., Van den Bogert, C., et al. (1991). Isoforms of human cytochrome-c oxidase. Subunit composition and steady-state kinetic properties. *Eur J Biochem*, 199(3), 615-622. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1991.tb16162.x>
85. Vincent, S. G., Cunningham, P. R., Stephens, N. L., et al. (1997). Quantitative densitometry of proteins stained with coomassie blue using a Hewlett Packard scanjet scanner and Scanplot software. *Electrophoresis*, 18(1), 67-71. <https://doi.org/10.1002/elps.1150180114>
86. Welsh, J. A., Jenkins, L. M., Kepley, J., et al. (2020). High Sensitivity Protein Gel Electrophoresis Label Compatible with Mass-Spectrometry. *Biosensors (Basel)*, 10(11), 160. <https://doi.org/10.3390/bios10110160>. EDN: <https://elibrary.ru/qkoihl>
87. Zhang, L. H., & McManus, D. P. (1996). Purification and N-terminal amino acid sequencing of Echinococcus granulosus antigen 5. *Parasite Immunol*, 18(12), 597-606. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3024.1996.d01-42.x>
88. Zinellu, A., Pasciu, V., Sotgia, S., et al. (2010). Capillary electrophoresis with laser-induced fluorescence detection for ATP quantification in spermatozoa

and oocytes. *Anal Bioanal Chem*, 398(5), 2109-2116. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-4186-6>

89. Zippies, J. K., Hauck, S. M., Schoeffmann, S., et al. (2010). Kininogen in autoimmune uveitis: decrease in peripheral blood stream versus increase in target tissue. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 51(1), 375-382. <https://doi.org/10.1167/iovs.09-4094>

References

1. Grigorieva, N. N., & Grigoriev, S. N. (2022). Indicators of amino acid composition of blood in Yakut breed horses. In *Strategy and prospects of development of agricultural technologies and forestry in Yakutia until 2050: Collection of scientific articles based on materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut ASSR and the 85th anniversary of the First President of the RS(Y) M. E. Nikolaev (Nikolaev Readings)* (pp. 412-418). Yakutsk: Publishing House «Znanie-M». EDN: <https://elibrary.ru/lnacaq>
2. Grigorieva, N. N., & Pavlova, A. I. (2008). Some hematological indicators of horses of Yakut breed by ecotypes. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 1(43), 50-52. EDN: <https://elibrary.ru/iyqvavz>
3. Dodokhov, V. V., & Filippova, N. P. (2015). Polymorphism of blood serum proteins in horses of Yakut breed. *Potential of Modern Science*, 4(12), 70-75. EDN: <https://elibrary.ru/txnuwr>
4. Zavyalova, O. A., Marsyanova, Yu. A., Ishtulin, A. F., et al. (2021). Effect of variable valence metals on oxidative modification of albumin amino acid residues. *Science of the Young (Eruditio Juvenium)*, 9(3), 369-376. <https://doi.org/10.23888/HMJ202193369-376>. EDN: <https://elibrary.ru/dltlym>
5. Mardanly, S. G., Avdonina, A. S., & Zatevalov, A. M. (2021). Immune blotting for detection of specific immunoglobulins class «M» to SARS-CoV-2 coronavirus. *Izvestiya GSTU. Medicine, Pharmacy*, 3, 45-53. EDN: <https://elibrary.ru/rmjjll>
6. Marsyanova, Yu. A., Zvyagina, V. I., Belskikh, E. S., et al. (2024). Arginine and succinate as factors supporting mitochondrial oxidative phosphorylation under hypoxia. *Izvestiya GSTU. Medicine, Pharmacy*, 2, 10-18. <https://doi.org/10.51620/2687-1521-2024-2-18-10-18>. EDN: <https://elibrary.ru/qlhioe>
7. Marsyanova, Yu. A., Zvyagina, V. I., & Solovykh, D. A. (2023). Effect of modulation of nitric oxide (II) synthesis under chronic normobaric hypoxia on lactate dehydrogenase isoenzyme spectrum of rat epididymis. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 26(1), 49-54. <https://doi.org/10.29296/25877313-2023-01-09>. EDN: <https://elibrary.ru/ibjovv>

8. Nazarenko, R. V., & Zdanovsky, V. M. (2019). Methods of sperm selection for intracytoplasmic sperm injection procedure in in vitro fertilization programs (literature review). *Reproduction Issues*, 25(2), 83-89. <https://doi.org/10.17116/repro20192502183>. EDN: <https://elibrary.ru/rvnrsh>
9. Niyatshin, F. I., Dolmatova, I. Yu., & Ganieva, I. N. (2015). Analysis of genetic structure of Bashkir breed horses by polymorphic proteins and blood enzymes. In *Agricultural science in innovative development of agro-industrial complex: Materials of the international scientific-practical conference dedicated to the 85th anniversary of Bashkir State Agrarian University within the framework of the XXV International specialized exhibition «Agrocomplex-2015» (Part II, pp. 139-143)*. Ufa: Bashkir State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/ubayil>
10. Parakhin, A. S., Gabrielyan, A. V., Demenin, V. Yu., et al. (2020). Application of combination of protein fraction purification and analysis methods using the example of electrophoretic analysis of amylolytic enzymes. In *Fundamental and applied research in natural sciences and technical sciences: hypotheses, ideas, results: Collection of scientific papers based on materials of the International scientific-practical conference (pp. 24-28)*. Belgorod: LLC «Agency for Advanced Scientific Research». EDN: <https://elibrary.ru/jcplnk>
11. Tarasenko, S. V., Natal'skiy, A. A., Peskov, O. D., Bogomolov, A. Yu., Nikiforov, A. A., Avilushkina, E. O., & Tarakanov, P. V. (2021). Possibilities of early diagnosis and prediction of complicated clinical forms of chronic pancreatitis. *I. P. Pavlov Russian Medical and Biological Herald*, 29(2), 267-275. <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ34887>. EDN: <https://elibrary.ru/rrlcpk>
12. Tseloval'nikova, M. I. (2010). Possibility of using polymorphic proteins and serum enzymes in origin control of Karachay breed horses. *Agricultural Journal*, 3(1), 96-97. EDN: <https://elibrary.ru/nwawwb>
13. Yurov, G. K., Alekseenkova, S. V., Diaz Jimenez, K. A., et al. (2013). Immunological methods for diagnosis of equine infectious anemia. *Russian Veterinary Journal*, 1, 28-30. EDN: <https://elibrary.ru/pyedot>
14. Adams, L. D., & Gallagher, S. R. (2005). Two-dimensional gel electrophoresis. *Curr Protoc Immunol*, chapter 8:8.5.1-8.5.24. <https://doi.org/10.1002/0471142735.im0805s68>
15. Agarwal, A., Barbăroșie, C., Ambar, R., et al. (2020). The Impact of Single- and Double-Strand DNA Breaks in Human Spermatozoa on Assisted Reproduction. *Int J Mol Sci*, 21(11), 3882. <https://doi.org/10.3390/ijms21113882>. EDN: <https://elibrary.ru/phkedt>
16. Agrícola, R., Carvalho, H., Barbosa, M., et al. (2008). Blood lymphocyte subpopulations, neutrophil phagocytosis and proteinogram during late pregnancy

- and postpartum in mares. *Reprod Domest Anim*, 43(2), 212-217. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00879.x>
17. Arakawa, T., Nakagawa, M., Sakuma, C., et al. (2024). Electrophoresis, a transport technology that transitioned from moving boundary method to zone method. *Eur Biophys J*, 53(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00249-023-01694-5>. EDN: <https://elibrary.ru/uaebspw>
 18. Belgrave, R. L., Dickey, M. M., Arheart, K. L., et al. (2013). Assessment of serum amyloid A testing of horses and its clinical application in a specialized equine practice. *J Am Vet Med Assoc*, 243(1), 113-119. <https://doi.org/10.2460/javma.243.1.113>
 19. Bergström, K., Aspan, A., Landén, A., et al. (2012). The first nosocomial outbreak of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in horses in Sweden. *Acta Vet Scand*, 54(1), 11. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-54-11>. EDN: <https://elibrary.ru/ghtefo>
 20. Bouwman, F. G., van Ginneken, M. M., Noben, J. P., et al. (2010). Differential expression of equine muscle biopsy proteins during normal training and intensified training in young standardbred horses using proteomics technology. *Comp Biochem Physiol Part D Genomics Proteomics*, 5(1), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2009.11.001>
 21. Bouwman, F. G., van Ginneken, M. M., van der Kolk, J. H., et al. (2010). Novel markers for tying-up in horses by proteomics analysis of equine muscle biopsies. *Comp Biochem Physiol Part D Genomics Proteomics*, 5(2), 178-183. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2010.03.009>
 22. Brandon, C. I., Heusner, G. L., Caudle, A. B., et al. (1999). Two-dimensional polyacrylamide gel electrophoresis of equine seminal plasma proteins and their correlation with fertility. *Theriogenology*, 52(5), 863-873. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(99\)00178-8](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(99)00178-8)
 23. Burnette, W. N. (1981). "Western blotting": electrophoretic transfer of proteins from sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gels to unmodified nitrocellulose and radiographic detection with antibody and radioiodinated protein A. *Anal Biochem*, 112(2), 195-203. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(81\)90281-5](https://doi.org/10.1016/0003-2697(81)90281-5)
 24. Byard, J., Marshall, D. E., Houghton, E., et al. (1996). Novel approaches to the purification and identification of cytochrome P450 enzymes in the equine. *Biochem Soc Trans*, 24(2), 208S. <https://doi.org/10.1042/bst024208s>
 25. Cannon-Carlson, S., & Tang, J. (1997). Modification of the Laemmli sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis procedure to eliminate artifacts on reducing and nonreducing gels. *Anal Biochem*, 246(1), 146-148. <https://doi.org/10.1006/abio.1997.2002>

26. Choudhary, S., Kumaresan, A., Kumar, M., et al. (2017). Effect of recombinant and native buffalo OVGP1 on sperm functions and in vitro embryo development: a comparative study. *J Anim Sci Biotechnol*, 8, 69. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0201-5>. EDN: <https://elibrary.ru/irphkt>
27. Chubatsu, L. S., Gerhardt, E. C. M., & Souza, E. M. (2023). A simple preparation of prestained molecular markers for electrophoresis using inexpensive and readily available proteins. *Anal Biochem*, 1(676), 115231. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2023.115231>. EDN: <https://elibrary.ru/glbtep>
28. Collinder, E., Berge, G. N., Grønvold, B., et al. (2000). Influence of bacitracin on microbial functions in the gastrointestinal tract of horses. *Equine Vet J*, 32(4), 345-350. <https://doi.org/10.2746/042516400777032165>
29. Csako, G. (2019). Immuno-electrophoresis: A Method with Many Faces. *Methods Mol Biol*, 1855, 249-268. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8793-1_21
30. de Menezes, V. T., Queiroz, A. O., Gomes, M. A., et al. (2004). Trypanosoma evansi in inbred and Swiss-Webster mice: distinct aspects of pathogenesis. *Parasitol Res*, 94(3), 193-200. <https://doi.org/10.1007/s00436-004-1207-4>. EDN: <https://elibrary.ru/qxpima>
31. Dedet, J. P. (2000). Les leishmanioses: actualités [Leishmaniasis: update]. *Presse Med*, 29(18), 1019-1026.
32. Dezhabad, A., Dalimi, A., Hoghooghi Rad, N., et al. (2023). Secretory Excretory and Somatic Immunogenic Antigens Profiles of Adult Fasciola spp. *Arch Razi Inst*, 78(1), 435-443. <https://doi.org/10.22092/ARI.2022.359262.2393>
33. Dias, G. M., López, M. L., Ferreira, A. T., et al. (2014). Thiol-disulfide proteins of stallion epididymal spermatozoa. *Anim Reprod Sci*, 145(1-2), 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2013.12.007>
34. Ellenberger, C., Wilsher, S., Allen, W. R., et al. (2008). Immunolocalisation of the uterine secretory proteins uterocalin, uteroferrin and uteroglobin in the mare's uterus and placenta throughout pregnancy. *Theriogenology*, 70(5), 746-757. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.04.050>
35. Ellison, R. S., & Jacobs, R. M. (1990). An attempt to determine the tissue origin of equine serum alkaline phosphatase by isoelectric focusing. *Can J Vet Res*, 54(1), 119-125.
36. Franco, M. M., Santos, J. B., Mendonça, A. S., et al. (2016). Quick method for identifying horse (Equus caballus) and donkey (Equus asinus) hybrids. *Genet Mol Res*, 15(3), gmr.15038895. <https://doi.org/10.4238/gmr.15038895>
37. González, P. M., & Puntarulo, S. (2011). Iron and nitrosative metabolism in the Antarctic mollusc Laternula elliptica. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*, 153(2), 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2010.11.003>

38. Granstrom, D. E. (1995). Recent advances in the laboratory diagnosis of equine parasitic diseases. *Vet Clin North Am Equine Pract*, 11(3), 437-442. [https://doi.org/10.1016/s0749-0739\(17\)30309-7](https://doi.org/10.1016/s0749-0739(17)30309-7)
39. Grignard, E., Morin, J., Vernet, P., et al. (2005). GPX5 orthologs of the mouse epididymis-restricted and sperm-bound selenium-independent glutathione peroxidase are not expressed with the same quantitative and spatial characteristics in large domestic animals. *Theriogenology*, 64(4), 1016-1033. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.01.008>
40. Groschup, M., Müller, H. P., Weiss, R., et al. (1990). Studies of antigenic components in acid extracts of group C streptococci with special reference to *Streptococcus equi*. *Zentralbl Bakteriol*, 273(4), 459-470. [https://doi.org/10.1016/s0934-8840\(11\)80453-6](https://doi.org/10.1016/s0934-8840(11)80453-6)
41. He, H., Wang, L., Wang, X., & Zhang, M. (2024). Artificial intelligence in serum protein electrophoresis: history, state of the art, and perspective. *Crit Rev Clin Lab Sci*, 61(3), 226-240. <https://doi.org/10.1080/10408363.2023.2274325>
42. Jiménez-Trejo, F., Coronado-Mares, I., Boeta, M., et al. (2018). Identification of serotonergic system components in stallion sperm. *Histol Histopathol*, 33(9), 951-958. <https://doi.org/10.14670/HH-11-989>
43. Jobim, M. I., Trein, C., Zirkler, H., et al. (2011). Two-dimensional polyacrylamide gel electrophoresis of equine seminal plasma proteins and their relation with semen freezability. *Theriogenology*, 76(4), 765-771. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.04.010>
44. Jung, H., Song, H., & Yoon, M. (2015). The KIT is a putative marker for differentiating spermatogonia in stallions. *Anim Reprod Sci*, 152, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.11.004>
45. Kankavi, O., Ata, A., & Akif Ciftcioglu, M. (2006). Surfactant protein A and D in the reproductive tract of stallion. *Theriogenology*, 66(5), 1057-1064. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2006.02.047>
46. Kankavi, O., Ata, A., & Gungor, O. (2007). Surfactant proteins A and D in the genital tract of mares. *Anim Reprod Sci*, 98(3-4), 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2006.03.009>
47. Kankavi, O., & Roberts, M. S. (2004). Detection of surfactant protein A (SP-A) and surfactant protein D (SP-D) in equine synovial fluid with immunoblotting. *Can J Vet Res*, 68(2), 146-149
48. Kitaoka, Y., Hoshino, D., Mukai, K., et al. (2011). Effect of growth on monocarboxylate transporters and indicators of energy metabolism in the gluteus medius muscle of Thoroughbreds. *Am J Vet Res*, 72(8), 1107-1111. <https://doi.org/10.2460/ajvr.72.8.1107>

-
49. Kurien, B. T., & Scofield, R. H. (2006). Western blotting. *Methods*, 38(4), 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2005.11.007>
 50. Laemmli, U. K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, 227(5259), 680-685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
 51. Landsberger, M., & Brinkmeier, H. (2023). Immunoblot Analysis of DIGE-Based Proteomics. *Methods Mol Biol*, 2596, 429-443. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2831-7_29
 52. Lee, C. H. (2017). A Simple Outline of Methods for Protein Isolation and Purification. *Endocrinol Metab (Seoul)*, 32(1), 18-22. <https://doi.org/10.3803/EnM.2017.32.1.18>
 53. López-Martínez, M. J., Lamy, E., Cerón, J. J., et al. (2024). Changes in the saliva proteome analysed by gel-proteomics in horses diagnosed with equine gastric ulcer syndrome (EGUS) at diagnosis and after successful treatment. *Res Vet Sci*, 167, 105112. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2023.105112>. EDN: <https://elibrary.ru/noxsyi>
 54. Machado, T. S., Correia da Silva, L. C., Baccarin, R. Y., et al. (2012). Synovial fluid chondroitin sulphate indicates abnormal joint metabolism in asymptomatic osteochondritic horses. *Equine Vet J*, 44(4), 404-411. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2011.00539.x>
 55. Maher, A., Toaleb, N. I., & Shaapan, R. M. (2024). Human and camel cystic echinococcosis - a polyclonal antibody-based sandwich ELISA for its serodiagnosis with molecular identification. *Vet Res Commun*, 26. <https://doi.org/10.1007/s11259-024-10375-3>. EDN: <https://elibrary.ru/almtgz>
 56. Martin, G. B., Mansion, F., Servais, A. C., et al. (2009). CE-MS method development for peptides analysis, especially hepcidin, an iron metabolism marker. *Electrophoresis*, 30(15), 2624-2631. <https://doi.org/10.1002/elps.200800794>
 57. Martínez-Torrecuadrada, J. L., Díaz-Laviada, M., Roy, P., et al. (1997). Serologic markers in early stages of African horse sickness virus infection. *J Clin Microbiol*, 35(2), 531-535. <https://doi.org/10.1128/jcm.35.2.531-535.1997>
 58. McDonagh, B. (2012). Diagonal electrophoresis for the detection of protein disulfides. *Methods Mol Biol*, 869, 309-315. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-821-4_26
 59. McGuire, T. R., & Weitkamp, L. R. (1980). Equine marker genes. Polymorphism for transferrin alleles, TfF1 and TfF2, in Thoroughbreds. *Anim Blood Groups Biochem Genet*, 11(2), 113-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.1980.tb01501.x>
 60. Mendoza, L., Gunawardhana, T., Batchelor, W., et al. (2019). Nanocellulose for gel electrophoresis. *J Colloid Interface Sci*, 540, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.017>

61. Minden, J. (2007). Comparative proteomics and difference gel electrophoresis. *Biotechniques*, 43(6), 739-745. <https://doi.org/10.2144/000112653>
62. Miyata, H., Sugiura, T., Kai, M., et al. (1999). Muscle adaptation of Thoroughbred racehorses trained on a flat or sloped track. *Am J Vet Res*, 60(12), 1536-1539
63. Mizuno, Y., Ohba, Y., Fujita, H., et al. (1989). Activity staining of acylphosphatase after gel electrophoresis. *Anal Biochem*, 183(1), 46-49. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(89\)90169-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(89)90169-3)
64. Naumenkova, V. A., Khrabrova, L. A., & Atroshchenko, M. M. (2023). Analysis of the interconnection of stallion semen indicators with genetic markers of proteins. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(4), 197-209. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-197-209>. EDN: <https://elibrary.ru/hurkbr>
65. Paltrinieri, S., Giordano, A., Villani, M., et al. (2008). Influence of age and foaling on plasma protein electrophoresis and serum amyloid A and their possible role as markers of equine neonatal septicaemia. *Vet J*, 176(3), 393-396. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.05.018>
66. Poltep, K., Tesena, P., Yingchutrakul, Y., et al. (2018). Optimisation of a serum albumin removal protocol for use in a proteomic study to identify the protein biomarkers for silent gastric ulceration in horses. *J Equine Sci*, 29(3), 53-60. <https://doi.org/10.1294/jes.29.53>
67. Qiu, Y., Yang, H., Li, C., et al. (2020). Progress in Research on Sperm DNA Fragmentation. *Med Sci Monit*, 26, e918746. <https://doi.org/10.12659/MSM.918746>. EDN: <https://elibrary.ru/uducde>
68. Rappa, K. L., Rodriguez, H. F., Hakkarainen, G. C., et al. (2016). Sperm processing for advanced reproductive technologies: Where are we today? *Biotechnol Adv*, 34(5), 578-587. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.01.007>
69. Ren, G., Okerberg, C. K., & Mathews, S. T. (2012). Ultrasensitive protein detection and imaging: comparison of Lumitein™, ProteoSilver™, SYPRO® Ruby, and Coomassie® Brilliant Blue gel stains. *Methods Mol Biol*, 869, 621-632. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-821-4_57
70. Rodriguez, M. C., Mussio, P. E., Villaraza, J., et al. (2023). Physicochemical Characterization of a Recombinant eCG and Comparative Studies with PMSG Commercial Preparations. *Protein J*, 42(1), 24-36. <https://doi.org/10.1007/s10930-023-10092-x>. EDN: <https://elibrary.ru/zbv1vc>
71. Sander, S. J., Joyner, P. H., Cray, C., et al. (2016). Acute phase proteins as a marker of respiratory inflammation in Przewalski's horse (*Equus Ferus Przewalskii*). *J Zoo Wildl Med*, 47(2), 654-658. <https://doi.org/10.1638/2015-0059.1>

72. Schultze, A. E., Rohrbach, B. W., Fribourg, H. A., et al. (1999). Alterations in bovine serum biochemistry profiles associated with prolonged consumption of endophyte-infected tall fescue. *Vet Hum Toxicol*, 41(3), 133-139.
73. Shan, S., Tanaka, H., & Shoyama, Y. (2001). Enzyme-linked immunosorbent assay for glycyrrhizin using anti-glycyrrhizin monoclonal antibody and an eastern blotting technique for glucuronides of glycyrrhetic acid. *Anal Chem*, 73(24), 5784-90. <https://doi.org/10.1021/ac0106997>
74. Shibata, H., & Shibuya, A. (1995). Cholinesterase. *Nihon Rinsho*, 53(5), 1173-1177. (на японском языке)
75. Shin, J. A., Yang, Y. H., Kim, H. S., et al. (2002). Genetic polymorphism of the serum proteins of horses in Jeju. *J Vet Sci*, 3(4), 255-263.
76. Smith, B. J. (1984). SDS Polyacrylamide Gel Electrophoresis of Proteins. *Methods Mol Biol*, 41-55. <https://doi.org/10.1385/0-89603-062-8>
77. Souto, P. C., Fonseca, L. A. D., Orozco, A. M. O., et al. (2019). Acute-Phase Proteins of Healthy Horses and Horses Naturally Affected by Colic Syndrome. *J Equine Vet Sci*, 80, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.06.002>
78. Tan, H. Y., Ng, T. W., & Liew, O. W. (2007). Effects of light spectrum in flat-bed scanner densitometry of stained polyacrylamide gels. *Biotechniques*, 42(4), 474-478. <https://doi.org/10.2144/0001124>
79. Tesena, P., Yingchutrakul, Y., Roytrakul, S., et al. (2019). Searching for serum protein markers of equine squamous gastric disease using gel electrophoresis and mass spectrometry. *Equine Vet J*, 51(5), 581-586. <https://doi.org/10.1111/evj.13068>
80. Tomioka, Y., Nakagawa, M., Sakuma, C., et al. (2022). Analysis of bovine serum albumin unfolding in the absence and presence of ATP by SYPRO Orange staining of agarose native gel electrophoresis. *Anal Biochem*, 654, 114817. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2022.114817>. EDN: <https://elibrary.ru/gneuml>
81. Tung, J. T., Fenton, J. I., Arnold, C., et al. (2002). Recombinant equine interleukin-1beta induces putative mediators of articular cartilage degradation in equine chondrocytes. *Can J Vet Res*, 66(1), 19-25.
82. Tung, J. T., Venta, P. J., Eberhart, S. W., et al. (2002). Effects of anti-arthritis preparations on gene expression and enzyme activity of cyclooxygenase-2 in cultured equine chondrocytes. *Am J Vet Res*, 63(8), 1134-1139. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2002.63.1134>
83. van Ginneken, M. M., Keizer, H. A., Wijnberg, I. D., et al. (2004). Immunohistochemical identification and fiber type specific localization of protein kinase C isoforms in equine skeletal muscle. *Am J Vet Res*, 65(1), 69-73. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2004.65.69>

84. Van Kuilenburg, A. B., Dekker, H. L., Van den Bogert, C., et al. (1991). Isoforms of human cytochrome-c oxidase. Subunit composition and steady-state kinetic properties. *Eur J Biochem*, 199(3), 615-622. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1991.tb16162.x>
85. Vincent, S. G., Cunningham, P. R., Stephens, N. L., et al. (1997). Quantitative densitometry of proteins stained with coomassie blue using a Hewlett Packard scanjet scanner and Scanplot software. *Electrophoresis*, 18(1), 67-71. <https://doi.org/10.1002/elps.1150180114>
86. Welsh, J. A., Jenkins, L. M., Kepley, J., et al. (2020). High Sensitivity Protein Gel Electrophoresis Label Compatible with Mass-Spectrometry. *Biosensors (Basel)*, 10(11), 160. <https://doi.org/10.3390/bios10110160>. EDN: <https://elibrary.ru/qkoihl>
87. Zhang, L. H., & McManus, D. P. (1996). Purification and N-terminal amino acid sequencing of Echinococcus granulosus antigen 5. *Parasite Immunol*, 18(12), 597-606. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3024.1996.d01-42.x>
88. Zinellu, A., Pasciu, V., Sotgia, S., et al. (2010). Capillary electrophoresis with laser-induced fluorescence detection for ATP quantification in spermatozoa and oocytes. *Anal Bioanal Chem*, 398(5), 2109-2116. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-4186-6>
89. Zipplies, J. K., Hauck, S. M., Schoeffmann, S., et al. (2010). Kininogen in autoimmune uveitis: decrease in peripheral blood stream versus increase in target tissue. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 51(1), 375-382. <https://doi.org/10.1167/iovs.09-4094>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Атрошенко Михаил Михайлович, канд. биол. наук, заведующий лабораторией криобиологии
*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-исследовательский институт коневодства»
пос. Дивово, Рыбновский р-н, Рязанская обл., 391105, Российская
Федерация
atromiks-77@mail.ru*

Марсянова Юлия Александровна, научный сотрудник лаборатории криобиологии; ассистент кафедры биологической химии
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт коневодства»; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
пос. Дивово, Рыбновский р-н, Рязанская обл., 391105, Российская Федерация; ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
yuliyamarsyanova@yahoo.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Mikhail M. Atroshchenko, Ph.D. Biol. Sc., Head of the Laboratory of Cryobiology
All-Russian Research Institute for Horse Breeding
Divovo, Rybnovskii district, Ryazan region, 391105, Russian Federation
atomiks-77@mail.ru
SPIN-code: 4509-6874
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6023-0332>
Researcher ID: R-6360-2016
Scopus Author ID: 36781771200

Yuliya A. Marsyanova, Researcher at the Laboratory of Cryobiology; Assistant at the Department of Biological Chemistry
All-Russian Research Institute for Horse Breeding; Ryazan State Medical University
Divovo, Rybnovskii district, Ryazan region, 391105, Russian Federation; 9, Vysokovolttnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation
yuliyamarsyanova@yahoo.com
SPIN-code: 4075-3169
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4948-4504>
Researcher ID: GLN-5372-2022
Scopus Author ID: 58037038700

Поступила 05.09.2024

После рецензирования 01.12.2024

Принята 20.12.2024

Received 05.09.2024

Revised 01.12.2024

Accepted 20.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1135

EDN: WDPICY

УДК 339



Научные обзоры

АНАЛИЗ МИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ЯЧМЕНЯ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАНЫМ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЁННЫХ НАЦИЙ

*И.А. Аксенов, Г.А. Трунин, М.С. Фабриков, М.С. Лисятников,
Е.С. Прусов, С.И. Рощина, М.А. Дубровин*

Аннотация

Обоснование. В исследовании проводится аналитический обзор мирового производства ячменя в динамике с 1992 по 2022 годы по статистическим данным Продовольственной и Сельскохозяйственной Организации Объединённых Наций.

Цель – выявление тенденций развития мирового рынка производства ячменя и понимание роли Российской Федерации на этом рынке.

Материалы и методы. Эмпирической основой исследования послужили статистические сведения Продовольственной и Сельскохозяйственной Организации Объединённых Наций. Теоретической основой исследования послужили труды известных российских и зарубежных ученых, непосредственно затрагивающие различные стороны мирового производства ячменя.

Методологическую основу исследования составили методы: сравнение, рецензентный анализ, систематизация данных.

Результаты. Сокращение объемов производства ячменя на мировом рынке за рассматриваемый период составило 3%. Уборная площадь ячменя уменьшилась более чем на 30% за последние 30 лет. Странами-лидерами по производству ячменя на сегодняшний день являются: Российская Федерация, Австралия, Франция, Германия.

Заключение. За последние 30 лет мировые объемы производства ячменя практически не изменились. Страны, которые занимались производством данной культуры в 1992 году, продолжают ее производство и сейчас. Сильное

наращивание объемов производства и площадей по данной культуре происходит в Австралии и Аргентине.

Ключевые слова: ячмень; мировое производство; ключевые производители; сельское хозяйство; ФАО ООН; уборные площади

Для цитирования. Аксенов, И. А., Трунин, Г. А., Фабриков, М. С., Лисятников, М. С., Прусов, Е. С., Рощина, С. И., & Дубровин, М. А. (2025). Анализ мирового производства ячменя по статистическим данным продовольственной и сельскохозяйственной организации объединённых наций. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 529-556. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1135>

Scientific Reviews

ANALYSIS OF GLOBAL BARLEY PRODUCTION ACCORDING TO THE STATISTICAL DATA OF THE FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS

*I.A. Aksenov, G.A. Trunin, M.S. Fabrikov, M.S. Lisyatnikov,
E.S. Prusov, S.I. Roshchina, M.A. Dubrovin*

Abstract

Background. The study provides an analytical review of world barley production dynamics from 1992 to 2022 based on statistics from the Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Purpose – identifying development trends in the global barley production market and understanding the role of the Russian Federation in this market.

Materials and methods. The empirical basis of the study was statistical data from the Food and Agriculture Organization of the United Nations. The theoretical basis of the study was the works of famous Russian and foreign scientists directly affecting various aspects of global barley production.

The methodological basis of the study was the following methods: comparison, time analysis, systematization of data.

Results. The reduction in barley production volumes on the world market for the period under review was 3%. The harvested area of barley has decreased by more than 30% over the past 30 years. The leading countries in barley production today are: the Russian Federation, Australia, France, Germany.

Conclusion. Over the past 30 years, global barley production volumes have remained virtually unchanged. Countries that were producing the crop in 1992

continue to do so today. Australia and Argentina are seeing significant increases in production volumes and areas of cultivation.

Keywords: barley; world production; key producers; agriculture; FAO UN; harvesting areas

For citation. Aksenov, I. A., Trunin, G. A., Fabrikov, M. S., Lisyatnikov, M. S., Prusov, E. S., Roshchina, S. I., & Dubrovin, M. A. (2025). Analysis of global barley production according to the statistical data of the food and agricultural organization of the United Nations. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 529-556. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1135>

Введение

В рамках исследования нами был проведен анализ мирового производства ячменя по статистическим данным Продовольственной и Сельскохозяйственной Организации Объединённых Наций.

Существует множество проблем на сегодняшний день, связанных с производством ячменя. К ним можно отнести: изменение климата, экономическую ситуацию в мире, а также изменения в спросе и потреблении.

К ключевым исследованиям в области данной темы можно отнести:

Исследования климатических особенностей производства ячменя:

И.П. Елисеев, А.Г. Ложкин, В.Л. Димитриев [4] в своем исследовании выявляют, что изменение погодных условий приводит к значительным колебаниям в объемах производства, что оказывает давление на мировые цены и стабильность поставок при производстве сельскохозяйственных продуктов, в том числе и ячменя.

Р.Р. Хайретдинов [17] в своем исследовании акцентирует внимание на изменении климата, который по мнению автора играет важнейшую роль при производстве ячменя. Изменение климата негативно влияет на производство ячменя. Повышение средней температуры воздуха и засуха сокращают урожайность и влияют на качество выращиваемого зерна.

Исследования экономических проблем производства ячменя:

А.В. Марченко [6] указывает на проблемы, связанные с низкой рентабельностью производства ячменя по сравнению с другими зерновыми культурами. Низкая рентабельность производства объясняется низкой рыночной стоимостью зерна, высокими затратами на производство, нестабильной урожайностью.

М.А. Евдокимова, В.С. Харитонов [3] фокусируются на экономической эффективности производства ячменя. В исследовании не рассматриваются в комплексе все факторы, влияющие на производство и рынок этой куль-

туры. В качестве основных факторов, влияющих на производство и рынок ячменя, авторы относят: климатические факторы, технологии, используемые при производстве, доступность сортов ячменя адаптированных к климатическим условиям определенных регионов.

Исследования агропромышленных проблем производства ячменя:

С.А. Чепец, Е.С. Чепец [18] проводят анализ возможных резервов повышения эффективности производства ячменя. В исследовании учитываются следующие аспекты производства: особенности развития сортов ячменя, применение различных технологий при его производстве, специфику применения различных удобрений для производства данной культуры.

Т.А. Серегина, Ю.А. Мажайский [12] проводят комплексный анализ особенностей производства ячменя в мире. В статье отражается технологический аспект производства ячменя, но достаточно слабо проводится экономический анализ производства данной культуры.

Несмотря на наличие ряда исследований, актуальное понимание тенденций на рынке ячменя остается фрагментарным. Для решения проблемы нестабильности на мировом рынке производства ячменя необходимо проведение комплексного аналитического обзора, который бы объединил различные аспекты его международного производства.

Производство ячменя для Российской Федерации является в настоящий момент важной отраслью производства зерновых (составляет порядка 15% от общего объема производства зерновых культур). Ячмень в основном используется как корм для крупного рогатого скота, а также для производства пива. Россия является крупнейшим экспортёром ячменя в мире. Ключевые рынки сбыта данной культуры: Саудовская Аравия, Иран, Ливия, Тунис.

Таким образом, актуальное понимание тенденций и проведение комплексного аналитического обзора производства ячменя на мировом рынке являются критически важными для стабилизации и улучшения положения этой отрасли. Существующие исследования предоставляют полезные данные, но их фрагментарность и недостаточное внимание к комплексным факторам требуют проведения более глубокого и всестороннего анализа.

Материалы и методы

В качестве материалов исследования была использована база данных Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций. Обращение к статистической базе данных Продовольственной и

сельскохозяйственной организации Объединённых Наций осуществлялось через программу написанной на языке программирования Python 3.12.3 выполненной на ядре ipykernel. Для работы с данными и их визуализации, которые отражены в рамках статьи, использовались библиотеки pandas 2.2.2, plotly 5.22.0 и ipywidgets 8.1.2. и модуль IPython.display.

Также, теоретической основой исследования послужили труды ученых в области сельского хозяйства:

В Работах [3; 4; 6; 12; 17; 18] выполнен анализ общемировых тенденций производства ячменя. Они сводятся к сокращению посевных площадей в пользу более прибыльных культур, таких как кукуруза и пшеница.

В работах [1; 2; 5; 7; 8; 9; 13; 14; 22] выполнен анализ роли Российской Федерации на мировом рынке сельского хозяйства. Россия играет ключевую роль на этом рынке, являясь одним из крупнейших экспортеров зерновых и важным участником глобальной торговли сельскохозяйственными товарами.

В работах [15; 18; 24] выполнен анализ технологий, которые сегодня используются в сельском хозяйстве. Основные выводы этих исследований помогли понять закономерности современного производства ячменя в мире. К ним относят рост спроса на пивоваренный ячмень и негативное влияние изменения климата на урожайность ячменя.

В работах [13; 16; 19; 20; 22; 24; 25; 26] выполнен анализ инноваций, применяемых в сельском хозяйстве. Основные выводы этих исследований указывают на важность цифровизации и интеллектуализации в сельском хозяйстве, в т. ч. и в производстве ячменя.

Результаты исследования

Согласно статистическим данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых Наций (ФАО ООН) в 1992 году в мире было собрано 159,55 млн. т. ячменя, а в 2022 году 154, 88 млн. т. Производство ячменя с 1992 по 2022 год сократилось на 3 %. (Рисунок 1)

На основе рисунка 1 также можно выявить, что объёмы мирового производства ячменя нестабильны, график имеет большую стохастическую составляющую. На основе графика видно, что за рассматриваемый период объёмы производства ячменя колеблется в диапазоне от 123,46 млн. т. (2010 г.) до 167,57 млн. т (1993 г.)

Для того, чтобы увидеть тенденцию мирового производства ячменя по странам, нами были построены диаграммы по объёму производства за 1992, 2002, 2022 года (Таблица 1-3).

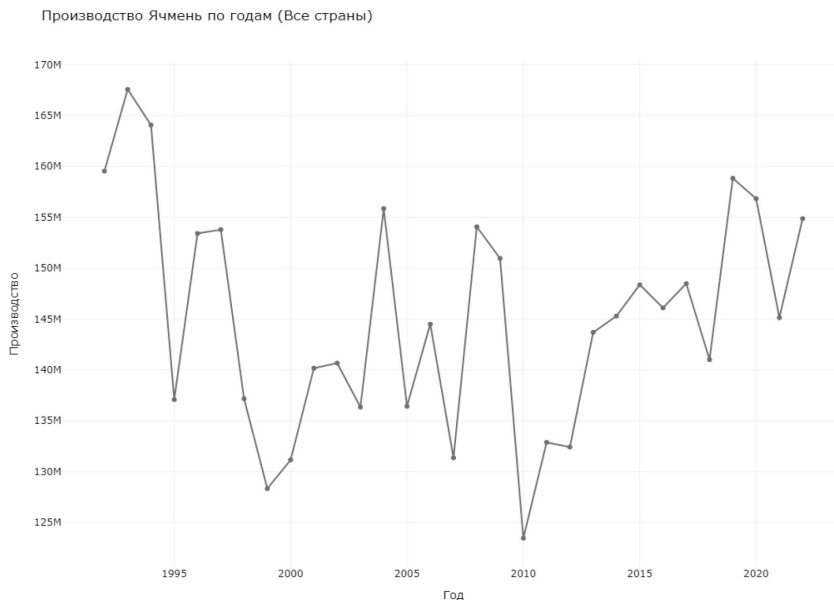


Рис. 1. Данные по мировому объему производства ячменя

Источник: составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

Таблица 1.

Производство ячменя по странам, 2022 г.

Страна	Объем производства, %
Российская Федерация	16,30%
Австралия	10,00%
Франция	7,88%
Германия	7,82%
Канада	6,97%
Турция	5,93%
Великобритания	5,15%
Испания	4,91%
Украина	3,91%
Аргентина	3,69%
Дания	2,88%
Соединенные Штаты Америки	2,65%
Казахстан	2,29%
Иран	2,09%

Польша	1,94%
Эфиопия	1,68%
Китай	1,37%
Чехия	1,31%
Румыния	1,19%
Алжир	1,12%
Венгрия	1,11%
Ирландия	1,08%
Швеция	1,05%
Финляндия	1,02%

Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

Таблица 2.

Производство ячменя по странам, 2002 г.

Страна	Объем производства, %
Российская Федерация	14,30%
Франция	8,43%
Германия	8,40%
Украина	7,96%
Испания	6,42%
Турция	6,38%
Австралия	6,36%
Канада	5,74%
Великобритания	4,71%
Соединенные Штаты Америки	3,80%
Дания	3,17%
Польша	2,59%
Китай	2,55%
Иран	2,37%
Казахстан	1,70%
Чехия	1,38%
Швеция	1,35%
Финляндия	1,34%
Беларусь	1,29%
Марокко	1,28%
Индия	1,09%
Болгария	0,93%
Италия	0,91%
Эфиопия	0,90%

Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

Таблица 3.

Производство ячменя по странам, 1992 г.

Страна	Объем производства, %
Российская Федерация	18,10%
Германия	8,16%
Канада	7,38%
Франция	6,98%
Украина	6,76%
Соединенные Штаты Америки	6,63%
Казахстан	5,70%
Великобритания	4,93%
Турция	4,62%
Испания	4,09%
Австралия	3,03%
Китай	2,94%
Иран	2,05%
Дания	1,99%
Беларусь	1,96%
Польша	1,89%
Италия	1,17%
Венгрия	1,15%
Индия	1,14%
Румыния	1,12%
Ирак	1,01%
Алжир	0,94%
Австрия	0,90%
Финляндия	0,89%

Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

На основании таблиц 1-3 была построена таблица 4, которая отражает крупнейшие страны по объему производства ячменя и темпы прироста объемов производства. Крупнейшими странами по объему производства ячменя мы считаем первую десятку стран-лидеров за каждый период.

Из таблиц 1-3 мы видим, что во всех рассматриваемых периодах стран-лидером по объему производства ячменя является Российская Федерация. Также исходя из таблиц 1-3 можно констатировать, что первая десятка стран-лидеров по производству ячменя меняется несильно, т.е. почти все страны, которые позиционировали себя в производстве данной культуры

в 1992 году, на этом рынке остаются и сегодня. Исключением являются Австралия и Аргентина (они очень сильно нарастили объемы производства за последнее десятилетие).

Отразим объемы производства ячменя каждой из стран-лидеров. Страна-лидерами будем считать первую десятку стран по объемам производства за каждый обозначенный год. Статистику по данным странам возьмем за период с 1992 по 2022 гг. (Таблица 4).

Таблица 4.

Страны-лидеры по объему производства ячменя 1992-2022 гг.

Основные страны	Место страны в мировом производстве ячменя и объемы производства в млн. т.						Темп при- роста в пе- риод с 1992 по 2022 гг., %
	1992		2002		2022		
	Объе- мы	Место	Объе- мы	Место	Объе- мы	Место	
РФ	26,99	1	18,68	1	23,39	1	-13
Германия	12,20	2	10,93	3	11,21	4	-8
Канада	11,03	3	7,47	8	9,99	5	-9
Франция	10,43	4	10,97	18	11,29	24	8
Украина	10,11	5	10,36	4	5,61	9	-45
США	9,91	6	4,94	10	3,80	12	-61
Казахстан	8,51	7	2,21	15	3,29	13	-61
Великобритания	7,36	8	6,13	9	7,39	7	0,4
Турция	6,9	9	8,3	6	8,5	6	23
Испания	6,11	10	8,36	5	7,03	8	15
Аргентина	0,58	-	0,55	-	5,30	10	813
Австралия	4,52	11	8,28	7	14,38	2	218

Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

Из сведений, отраженных в таблице 4, можно увидеть, что ряд стран сокращали объемы производства ячменя за рассматриваемый период. К числу этих стран можно отнести: Российскую Федерацию, Германию, Канаду, Украину, США, Казахстан. Увеличивали объемы производства ячменя следующие страны: Франция, Турция, Испания, Аргентина, Австралия.. Лидеры по относительным показателям увеличения производства – Аргентина и Австралия (увеличение объема производства ячменя на 813 и 218 процентов соответственно).

Более подробно анализ темпов прироста и убыли представлен в таблице 4, которая отражает крупнейшие страны по объему производства ячменя.

Понимая объемы производства каждой из стран-лидеров, нами была высчитана доля каждой из крупных стран по объемам производства ячменя (Таблица 5).

Таблица 5.

Доля страны в общемировом объеме производства ячменя

Основные страны	Доля в мировом производстве ячменя, %		
	1992	2002	2022
РФ	18,1	14,3	16,3
Германия	8,16	8,4	7,82
Канада	7,38	5,74	6,97
Франция	6,98	8,43	7,88
Украина	6,76	7,96	3,91
США	6,63	3,8	2,65
Казахстан	5,7	1,7	2,29
Великобритания	4,93	4,71	5,15
Турция	4,62	6,38	5,93
Испания	4,09	6,42	4,91
Аргентина	<1	<1	3,69
Австралия	3,03	6,36	10

Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

Для большей визуализации данных по объемам производства ячменя стран-лидеров, нами были выгружены сведения по тому, как менялась динамика производства в период с 1992 года по 2022 год (Рисунок 2).

На основе рисунка 2 можно сделать выводы, о том, что в период с 1992 по 2022 год производство ячменя очень нестабильно, очень сильно зависит от климатических факторов, и «культур-конкурентов» - этим и объясняется достаточно большая «стохастическая составляющая» на графиках объемов производства стран.

Но учитывая тот факт, что объемы производства ячменя в целом критично не меняются (в среднем за рассматриваемый период они стабильны), то стоит рассмотреть особенности того, как меняется уборная площадь данной культуры, чтобы понять эффективность ее использования (Рисунок 3).

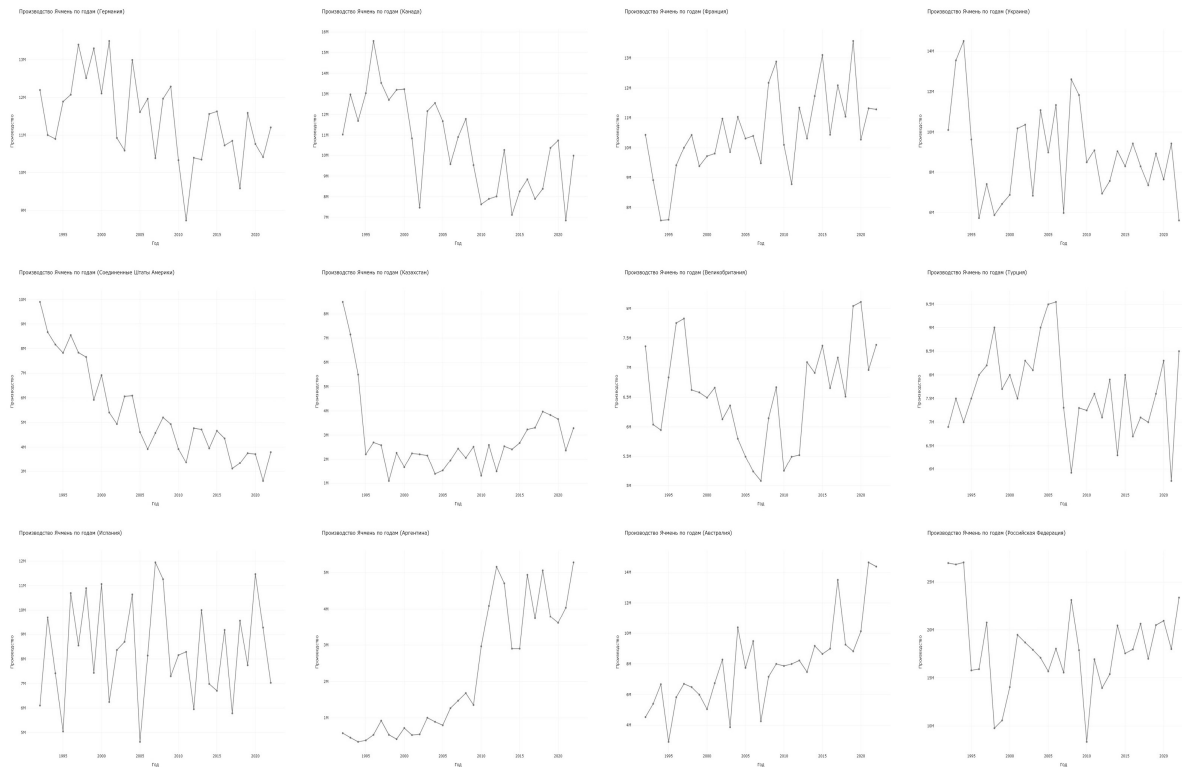


Рис. 2. Динамика производства ячменя странами-лидерами за период с 1991 по 2022 год.
Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]



Рис. 3. Изменение уборной площади мирового производства ячменя за период с 1992 по 2022 гг.

Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

На основе рисунка 3 мы можем увидеть, что уборная площадь данной культуры в период с 1992 года по 2022 год сократилась с 71,19 млн. га. до 47,15 млн. га. Следовательно, уборная площадь мирового производства ячменя сократилась на 34% в период с 1991 по 2022 год.

Для понимания того, какие конкретно страны увеличивали уборные площади, а какие их сокращали, проведем анализ уборных площадей по отдельным странам (см. рисунок 4).

Из рисунка 4 можно выявить, что почти все страны-лидеры сокращали количество уборных площадей, кроме Франции, Аргентины и Австралии.

Более детализированные сведения по уборным площадям ячменя представлены в таблице 6.

На основе данных из таблиц 4 и 6 можно увидеть, что все страны-лидеры по производству ячменя можно разделить на 3 группы:

Первой группе стран свойственно увеличение объемов производства ячменя с параллельным увеличением объемов уборных площадей: Франция, Аргентина и Австралия.

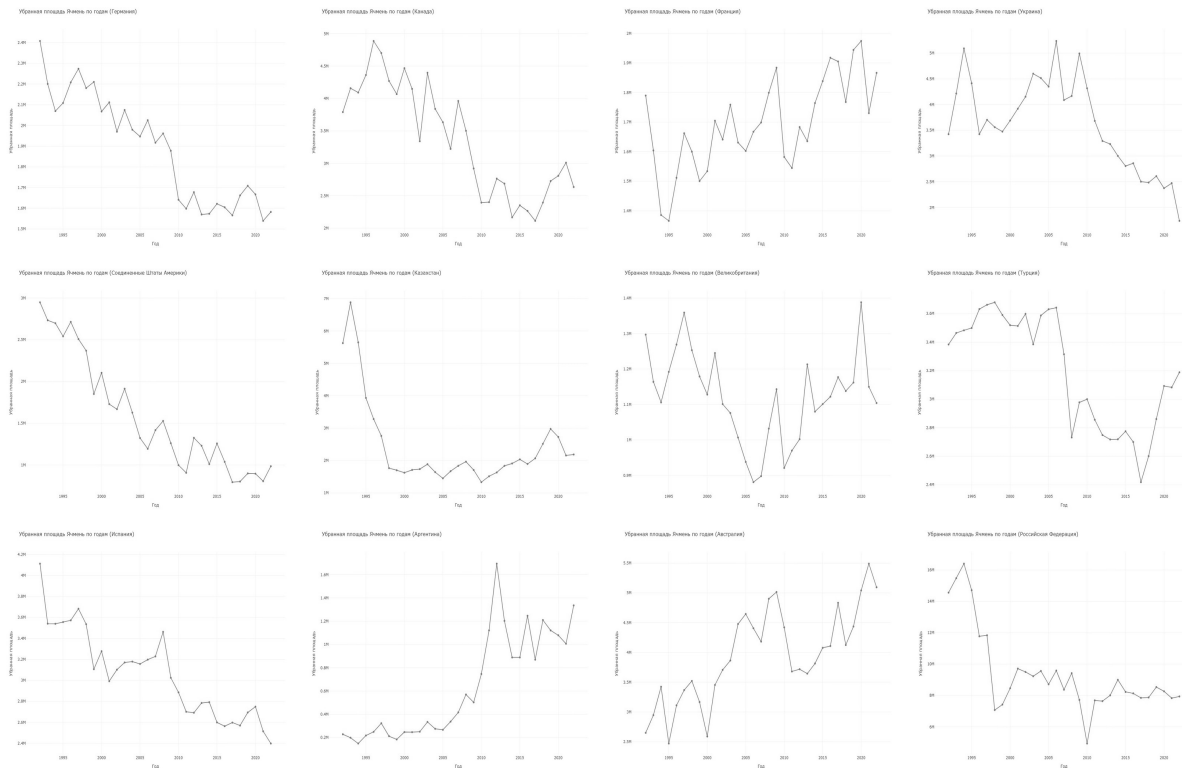


Рис. 4. Динамика уборных площадей ячменя стран-лидеров за период с 1991 по 2022 гг.
Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26])

Таблица 6.

Динамика уборных площадей ячменя

Основные страны	млн. га			Темп прироста в период с 1992 по 2022 гг., %
	1992	2002	2022	
РФ	14,56	9,50	7,94	-45
Германия	2,41	1,97	1,58	-34
Канада	3,79	3,34	2,64	-30
Франция	1,79	1,64	1,87	4
Украина	3,43	4,15	1,74	-49
США	2,95	1,67	0,98	-66
Казахстан	5,63	1,74	2,19	-61
Великобритания	1,30	1,10	1,10	-15
Турция	3,38	3,60	3,19	-6
Испания	4,11	3,10	2,40	-41
Аргентина	0,23	0,25	1,36	491
Австралия	2,65	3,71	5,09	92

Источник: Составлено авторами на основе статистических данных ФАО ООН [26]

В Франции происходил рост уборных площадей за рассматриваемый период на 4%, а валовый сбор на 8%.

В Аргентине происходил рост уборных площадей за рассматриваемый период на 491%, а валовый сбор на 813%.

В Австралии происходил рост уборных площадей за рассматриваемый период на 92%, а валовый сбор на 218%.

Из данной группы стран особенно выделяются Аргентина и Австралия.

В Австралии выращивание ячменя удачно сочетается с климатическими условиями, особенно в южных районах страны. Устойчивость ячменя к засухам делает его привлекательной культурой в регионах с ограниченными водными ресурсами. Также Австралия активно увеличивает объемы производства ячменя, по причине активного торгово-экономического сотрудничества по данной культуре с Китаем (порядка 70 процентов производимого ячменя в Австралии экспортируется в Китай).

В Аргентине также присутствуют благоприятные условия для выращивания ячменя, особенно в районах, расположенных на юге страны. Традиционная ориентация на экспорт зерновых поддерживает расширение посевных площадей.

Второй группе стран свойственно увеличение объемов производства ячменя с параллельным сокращением объемов уборных площадей: Великобритания, Турция, Испания.

В Великобритании происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый период на 15% , а валовый сбор увеличился на 0,4%.

В Турции происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый период на 6%, а валовый сбор увеличился на 23%.

В Испании происходило сокращение уборных площадей на 41%, а валовый сбор увеличился на 15%.

Третьей группе стран свойственно сокращение объемов производства с параллельным сокращением уборных площадей: Российская Федерация, Германия, Канада, Украина, США, Казахстан.

В РФ происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый период на 45% , а валовый сбор на 13%.

В Германии происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый на 34%, а валовый сбор на 8%.

В Канаде происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый на 30%, а валовый сбор на 9%.

На Украине происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый период на 49% , а валовый сбор на 45%.

В США происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый период на 66%, а валовый сбор на 61%.

В Казахстане происходило сокращение уборных площадей за рассматриваемый период на 61% , так же как и валовый сбор на 61%.

Из данной группы стран особенно выделяются Украина, США, Казахстан.

Сокращение уборных площадей ячменя на Украине на 49% и валового сбора на 45% связано с переходом к рыночной экономике после распада СССР, что привело к снижению инвестиций в сельское хозяйство. Также на ситуацию повлияли изменения в структуре агропроизводства, климатические условия и особенно снижение рентабельности выращивания ячменя.

Сокращение уборных площадей ячменя в США на 66% и валового сбора на 61% связано с переориентацией фермеров на более прибыльные культуры, такие как кукуруза и соя, а также с изменением спроса на ячмень для кормовых целей и пивоварения.

Сокращение уборочных площадей и валового сбора ячменя в Казахстане на 61% связано с переходом на более рентабельные культуры и снижением спроса на ячмень в сельском хозяйстве. Кроме того, постсоветские экономические реформы и перемены в структуре агропроизводства также сыграли значительную роль в сокращении объемов производства этой культуры.

Обсуждение

Настоящее исследование посвящено анализу динамики мирового рынка ячменя по статистическим данным ФАО ООН. Оно может быть полезно для производителей, инвесторов и аналитиков, желающих понять тенденции в отрасли и принять соответствующие решения.

Однако исследование имеет некоторые ограничения. Оно основано на статистических данных ФАО ООН, которые могут не учитывать все аспекты производства ячменя в разных странах. Также в исследовании не рассматриваются в полной мере вопросы, которые влияют на производство ячменя, такие как цены на ресурсы и удобрения, современные сельскохозяйственные инновации.

Данный материал является важным шагом в изучении мирового производства ячменя и может послужить отправной точкой для дальнейших исследований. На основе данного материала можно продолжить исследование мирового производства ячменя и учесть такие факторы как экономическая эффективность урожайности ячменя; анализ технологий выращивания ячменя и изучение роли государственных программ поддержки сельского хозяйства в развитии отрасли. Эти направления могут помочь более глубоко понять процессы, происходящие в мировом производстве ячменя, и разработать рекомендации по его развитию.

Заключение

На основании проведенного исследования можно выявить:

1. Объемы производства ячменя на мировом рынке уменьшились в период с 1992 по 2022 гг. на 3%. Это связано с совокупностью следующих факторов:

Потребление ячменя снижается как из-за изменения предпочтений потребителей (в том числе и ферм, использующих данную культуру для корма скота), так и своеобразной переориентацией производства на другие злаки (пшеница и кукуруза).

Внедрение инноваций в сельское хозяйство способствовало повышению урожайности других культур, по сравнению с ячменем, который очень чувствителен к климатическим условиям, что сделало их более привлекательными для фермеров.

2. Уборная площадь ячменя уменьшилась на 34% за последние 30 лет.

В первую очередь, на наш взгляд, это связано со сменой приоритетов при выборе агрокультур. Сельхозпроизводители переходят на производство более прибыльных и менее трудозатратных культур.

3. Ключевые страны производители ячменя:

К основным лидерам странам производителям ячменя на сегодняшний день можно отнести Российскую Федерацию, Австралию, Францию, Германию.

Российская Федерация на сегодня является крупнейшим производителем ячменя. Российский ячмень имеет высокое качество продукции.

Австралия также является значимым производителем ячменя на сегодняшний день. Проводя анализ объемов производства ячменя Австралией, можно констатировать, что страна сформировала устойчивый тренд на увеличение объемов производства данной культуры. Это связано в первую очередь с двумя факторами:

1. В ряде регионов Австралии ячмень очень хорошо приспособляется к засушливым условиям, по сравнению с другими зерновыми культурами, в связи с этим в стране были увеличены посевные площади для данной культуры, что повысило объемы производства.

2. Австралия в последние года наращивает объемы экспорта ячменя в Азиатские страны (Китай, Япония, Таиланд).

Франция и Германия производят ячмень в основном для европейского рынка.

На основании проведенного исследования также можно выявить страны с восходящей тенденцией производства ячменя. К таким странам можно отнести Аргентину и Австралию.

В целом, на основании анализа статических данных ФАО ООН, можно констатировать, что в мире отсутствует тенденция увеличения совокупного производства ячменя, что отражает комплексное взаимодействие экономических, агротехнических, климатических и социальных факторов.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Информация о спонсорстве. Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию (наименование темы научного исследования «Разработка и реализация стратегии развития внешнеэкономических связей сельского хозяйства и агропромышленного комплекса Российской Федерации с учетом санкционных ограничений и новых приоритетов экономического сотрудничества с зарубежными странами»; код научной темы, присвоенной учредителем, - FZUN-2024-0007).

Список литературы

1. Аксенов, И. А. (2021). Развитие государственной поддержки экспорта сельскохозяйственной продукции как элемент интеграционной политики Евразийского экономического союза. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(4), 273-296. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-4-273-296>. EDN: <https://elibrary.ru/zrmwgo>
2. Барыкин, С. Е., Шарапаев, П. А., Лавская, К. К. (2022). Интеграция в сфере торговли между Республикой Казахстан и Российской Федерацией на примере сельскохозяйственной продукции. В *Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе: Сборник материалов XII Международной научно-практической конференции* (с. 255-261). Москва: ООО «Издательство АЛЕФ». <https://doi.org/10.34755/IROK.2022.40.92.089>. EDN: <https://elibrary.ru/kpetry>
3. Евдокимова, М. А., Харитонов, В. С. (2016). Экономическая эффективность производства зерна ячменя пригодного для пивоварения. *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*, (18), 48-50. EDN: <https://elibrary.ru/wykrzv>
4. Елисеев, И. П., Ложкин, А. Г., Дмитриев, В. Л. (2020). Агрометеорологические условия, производство и цена зерна яркого ячменя в Чувашской Республике, в статистике и прогнозах. В *Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: Сборник материалов международной научно-практической конференции* (Часть 1, с. 122-127). Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/jgnrrt>
5. Жиялков, Д. И. (2021). Роль государства в повышении эффективности сельскохозяйственных организаций. *Экономические науки*, (194), 74-77. <https://doi.org/10.14451/1.194.74>. EDN: <https://elibrary.ru/xnqucs>
6. Марченко, А. В. (2019). Оценка потребительских свойств и перспективы увеличения объемов производства зерна яркого ячменя в Пермском крае. *Московский экономический журнал*, (9), 27. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-19039>. EDN: <https://elibrary.ru/rbskjj>
7. Минаков, А. В., Сафиуллин, И. Н., Михайлова, Л. В. (2023). Развитие сельского хозяйства России и направления повышения его конкурентоспособности на международном рынке. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*, 18(2(70)), 191-198. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-191-198>. EDN: <https://elibrary.ru/pcojmb>
8. Петрушина, О. В. (2021). Экспортно-ориентированная стратегия зернового производства. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*, (2), 90-97. EDN: <https://elibrary.ru/eeztwj>

9. Петрушина, О. В., Соловьева, Т. Н. (2014). Потенциал развития зернопроизводящих регионов на основе кластерного подхода. *Экономика и управление: научно-практический журнал*, (4(120)), 34-37. EDN: <https://elibrary.ru/sjmvd1>
10. Петрушина, О. В. (2020). Совершенствование электронной торговли зерном в условиях цифровой трансформации АПК. В *Современная экономика: актуальные проблемы, задачи и траектории развития: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции* (с. 204-209). Курск: Курская ГСХА им. проф. И.И. Иванова. EDN: <https://elibrary.ru/pehrjg>
11. Позубенкова, Э. И., Носов, А. В., & Фудина, Е. В. (2021). Механизм внедрения генетических технологий в агропромышленное производство. *Нива Поволжья*, 3(60), 17-21. <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.007>. EDN: <https://elibrary.ru/nijuts>
12. Сeregина, Т. А., & Мажайский, Ю. А. (2020). Производство ячменя в мире: сравнительный анализ. В *Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции* (Том 1, с. 459-462). Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева. EDN: <https://elibrary.ru/nnvtdq>
13. Сидоренко, О. В., Шабанникова, Н. Н., & Сергеева, С. А. (2022). Эффективное развитие зерновой отрасли как стратегический приоритет аграрной политики РФ. *Вестник аграрной науки*, 3(96), 147-153. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.3.147>. EDN: <https://elibrary.ru/oipzkgf>
14. Соловьева, Т. Н., Петрушина, О. В., & Золотарева, А. А. (2011). Зерновой рынок - системообразующее звено продовольственного рынка России. *Вестник Курской ГСХА*, 1, 39-41. EDN: <https://elibrary.ru/ndfuoj>
15. 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>
16. Титаренко, Д. В., & Бакуменко, М. А. (2020). Цифровая экономика в отраслях промышленности и сельского хозяйства, государственном и муниципальном управлении Российской Федерации. В *Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2020)* (с. 369-373). Симферополь: ИП Корниенко А.А. EDN: <https://elibrary.ru/oeqhgx>
17. Хайретдинов, Р. Р. (2023). Продуктивность растений ярового ячменя на разных уровнях интенсификации производства в условиях лесостепи Омской области. В *Сборник материалов XXIX научно-технической студенческой*

- конференции агротехнологического факультета (с. 18-21). Омск: Омский ГАУ им. П.А. Столыпина. EDN: <https://elibrary.ru/htavci>
18. Чепец, С. А., & Чепец, Е. С. (2007). Сорта и удобрения - резервы повышения эффективности производства зерна озимого ячменя. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ*, 26, 301-308. EDN: <https://elibrary.ru/jwxtvp>
19. 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>
20. 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: VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*, 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339002011>. EDN: <https://elibrary.ru/uxltrv>
21. Nechaev, V. I., & Arzhantsev, S. A. (2018). Concept of the development of the agricultural technological platform of the EAEU member states. *Econ Russ Agric*, 8, 85-92. EDN: <https://elibrary.ru/xxrped>
22. Nilova, L., Malyutenkova, S., Chudin, S., & Naumenko, N. (2019). IOT in the development of information support of food products for healthy nutrition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 497, 012112. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/497/1/012112>. EDN: <https://elibrary.ru/ffxqhk>
23. Paptsov, A., Nechaev, V., & Mikhailushkin, P. (2019). Towards a single innovation space in the agrarian sector of the member states of the Eurasian economic union: A case study. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(1), 637-648. [https://doi.org/10.9770/jesi.2019.7.1\(45\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2019.7.1(45)). EDN: <https://elibrary.ru/foosk>
24. Skvortsova, T. A., Denisova, I. P., Romanenko, N. G., & Sukhovenko, A. V. (2018). Innovations and support for quality in agriculture: A case study. *European Research Studies Journal*, 21(Special Issue 1), 423-431. <https://doi.org/10.35808/ersj/1192>. EDN: <https://elibrary.ru/roqgix>
25. Skvortsova, T. A., Nikitina, A. A., Pasikova, T. A., & Tagaev, A. V. (2019). Concepts and criteria for the classification of small and medium-sized business in Russia. *International Journal of Economics and Business Administration*, 7, 417-425. <https://doi.org/10.35808/ijeba/287>. EDN: <https://elibrary.ru/siwwnu>
26. FAO (2022). FAO publications catalogue 2022. Rome. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/#home> (дата обращения: 01.08.2024)

References

1. Aksenov, I. A. (2021). Development of state support for agricultural exports as an element of the integration policy of the Eurasian Economic Union. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(4), 273-296. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-4-273-296>. EDN: <https://elibrary.ru/zrmwgo>
2. Barykin, S. E., Sharapayev, P. A., & Lavskaya, K. K. (2022). Integration in trade between the Republic of Kazakhstan and the Russian Federation on the example of agricultural products. In *Modern problems of civilization and sustainable development in the information society*: Collection of materials of the XII International Scientific-Practical Conference (pp. 255-261). Moscow: LLC «Publishing House ALEF». <https://doi.org/10.34755/IROK.2022.40.92.089>. EDN: <https://elibrary.ru/kpetry>
3. Evdokimova, M. A., & Kharitonov, V. S. (2016). Economic efficiency of barley grain production suitable for brewing. *Current Issues of Improving Technology for Production and Processing of Agricultural Products*, (18), 48-50. EDN: <https://elibrary.ru/wykrzv>
4. Eliseev, I. P., Lozhkin, A. G., & Dimitriev, V. L. (2020). Agrometeorological conditions, production and price of bright barley grain in the Chuvash Republic, in statistics and forecasts. In *Scientific, educational and applied aspects of production and processing of agricultural products*: Collection of materials of the international scientific-practical conference (Part 1, pp. 122-127). Cheboksary: Chuvash State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/jgnrrt>
5. Zhilyakov, D. I. (2021). The role of the state in improving the efficiency of agricultural organizations. *Economic Sciences*, (194), 74-77. <https://doi.org/10.14451/1.194.74>. EDN: <https://elibrary.ru/xnqucs>
6. Marchenko, A. V. (2019). Assessment of consumer properties and prospects for increasing the production of bright barley grain in the Perm Krai. *Moscow Economic Journal*, (9), 27. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-19039>. EDN: <https://elibrary.ru/rbskjj>
7. Minakov, A. V., Safiullin, I. N., & Mikhailova, L. V. (2023). Development of agriculture in Russia and directions for increasing its competitiveness in the international market. *Bulletin of Kazan State Agrarian University*, 18(2(70)), 191-198. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-191-198>. EDN: <https://elibrary.ru/pcojmb>
8. Petrushina, O. V. (2021). Export-oriented strategy of grain production. *Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*, 2, 90-97. EDN: <https://elibrary.ru/eeztwj>
9. Petrushina, O. V., & Solovyova, T. N. (2014). Development potential of grain-producing regions based on cluster approach. *Economics and Management: Scientific and Practical Journal*, 4(120), 34-37. EDN: <https://elibrary.ru/sjmvdI>

10. Petrushina, O. V. (2020). Improvement of electronic grain trade in conditions of digital transformation of agro-industrial complex. In *Complex approach to scientific and technical support of agriculture: Materials of the All-Russian (national) scientific-practical conference* (pp. 204-209). Kursk: Kursk GSAA named after Prof. I.I. Ivanov. EDN: <https://elibrary.ru/pehrjg>
11. Pozubenkova, E. I., Nosov, A. V., & Fudina, E. V. (2021). Mechanism of implementation of genetic technologies in agro-industrial production. *Niva of Volga Region*, 3(60), 17-21. <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.007>. EDN: <https://elibrary.ru/nijuts>
12. Seregina, T. A., & Mazhaisky, Yu. A. (2020). Barley production in the world: comparative analysis. In *Integrated approach to scientific and technical support of agriculture: Materials of the International scientific-practical conference* (Vol. 1, pp. 459-462). Ryazan: RGATU named after P.A. Kostychev. EDN: <https://elibrary.ru/nnvtdq>
13. Sidorenko, O. V., Shabannikova, N. N., & Sergeeva, S. A. (2022). Effective development of grain industry as a strategic priority of agricultural policy of the Russian Federation. *Bulletin of Agrarian Science*, 3(96), 147-153. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.3.147>. EDN: <https://elibrary.ru/oipzkgf>
14. Solovyova, T. N., Petrushina, O. V., & Zolotareva, A. A. (2011). Grain market as a backbone component of Russian food market. *Bulletin of Kursk GSAA*, 1, 39-41. EDN: <https://elibrary.ru/ndfuoj>
15. Stelmashonok, E. V., & Stelmashonok, V. L. (2021). Digital transformation of 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>
16. Titarenko, D. V., & Bakumenko, M. A. (2020). Digital economy in industries and agriculture, state and municipal management of the Russian Federation. In *Analysis, modeling, management, development of socio-economic systems (AMUR-2020)* (pp. 369-373). Simferopol: IP Kornienko A.A. EDN: <https://elibrary.ru/oeqhgx>
17. Khayretdinov, R. R. (2023). Productivity of spring barley plants at different levels of production intensification in the forest-steppe conditions of Omsk region. In *Collection of materials of the XXIX scientific-technical student conference of the agrotechnological faculty* (pp. 18-21). Omsk: Omsk SAU named after P.A. Stolypin. EDN: <https://elibrary.ru/htavci>
18. Chepets, S. A., & Chepets, E. S. (2007). Varieties and fertilizers as reserves for increasing efficiency of winter barley grain production. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban SAU*, 26, 301-308. EDN: <https://elibrary.ru/jwxtvp>

19. 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>
20. 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: VIII International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*, 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339002011>. EDN: <https://elibrary.ru/uxlrtrv>
21. Nechaev, V. I., & Arzhantsev, S. A. (2018). Concept of the development of the agricultural technological platform of the EAEU member states. *Econ Russ Agric*, 8, 85-92. EDN: <https://elibrary.ru/xxrped>
22. Nilova, L., Malyutenkova, S., Chudin, S., & Naumenko, N. (2019). IOT in the development of information support of food products for healthy nutrition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 497, 012112. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/497/1/012112>. EDN: <https://elibrary.ru/ffxqhk>
23. Paptsov, A., Nechaev, V., & Mikhailushkin, P. (2019). Towards to a single innovation space in the agrarian sector of the member states of the Eurasian economic union: A case study. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(1), 637-648. [https://doi.org/10.9770/jesi.2019.7.1\(45\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2019.7.1(45)). EDN: <https://elibrary.ru/foocsk>
24. Skvortsova, T. A., Denisova, I. P., Romanenko, N. G., & Sukhovenko, A. V. (2018). Innovations and support for quality in agriculture: A case study. *European Research Studies Journal*, 21(Special Issue 1), 423-431. <https://doi.org/10.35808/ersj/1192>. EDN: <https://elibrary.ru/roqgix>
25. Skvortsova, T. A., Nikitina, A. A., Pasikova, T. A., & Tagaev, A. V. (2019). Concepts and criteria for the classification of small and medium-sized business in Russia. *International Journal of Economics and Business Administration*, 7, 417-425. <https://doi.org/10.35808/ijeba/287>. EDN: <https://elibrary.ru/siwnvu>
26. FAO (2022). FAO publications catalogue 2022. Rome. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

ВКЛАД АВТОРОВ

Аксенов И.А.: анализ показателей, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Трунин Г.А.: выявление тенденций, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Фабриков М.С.: общее руководство направлением исследования, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Лисятников М.С.: визуализация показателей исследования, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Прусов Е.С.: выгрузка показателей из БД ФАО ООН, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Рощина С.И.: общее руководство направлением исследования, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

Дубровин М.А.: систематизация выводов, интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ilia A. Aksenov: analysis of indicators, interpretation of results, preparation of the text of the article.

Grigory A. Trunin: identifying trends, interpreting results, preparing the text of the article.

Maksim S. Fabrikov: general management of the research direction, interpretation of the results, preparation of the article text.

Mikhail S. Lisyatnikov: visualization of research indicators, interpretation of results, preparation of the article text.

Evgeny S. Prusov: uploading indicators from the UN FAO database, interpreting the results, preparing the text of the article.

Svetlana I. Roshchina: general management of the research direction, interpretation of the results, preparation of the article text.

Mikhail A. Dubrovin: systematization of conclusions, interpretation of results, preparation of the text of the article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Аксенов Илья Антонович, кандидат экономических наук, доцент кафедры государственное право и управление таможенной деятельностью

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация
il_aks@mail.ru*

Трунин Григорий Александрович, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Финансовое право и таможенная деятельность»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация
trunin_gr@mail.ru*

Фабриков Максим Сергеевич, кандидат педагогических наук, доцент, проректор по экономике и развитию инфраструктуры, заведующий кафедрой технологического и экономического образования

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация
fabrikoff@mail.ru*

Лисятников Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация
mlisyatnikov@mail.ru*

Прусов Евгений Сергеевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент кафедры технологии функциональных и конструкционных материалов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация
eprusov@mail.ru*

Рощина Светлана Ивановна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительных конструкций

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация
rsi3@mail.ru*

Дубровин Михаил Андреевич, старший преподаватель кафедры теории и истории государства и права

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация
301507@bk.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ilia A. Aksenov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of State Law and Management of Customs Activities
*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87, Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation*

Il_aks@mail.ru

SPIN-code: 4145-4764

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0541-327X>

ResearcherID: O-6110-2017

Scopus Author ID: 57216752275

Grigory A. Trunin, Ph.D., Associate Professor of the Department of Financial Law and Customs

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87, Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation*

trunin_gr@mail.ru

SPIN-code: 5224-4863

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0035-0903>

Maksim S. Fabrikov, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Economics and Infrastructure Development, Head of the Department of Technological and Economic Education

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87, Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation
fabrikoff@mail.ru
SPIN-code: 9291-8518
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7063-7529>
Scopus Author ID: 57202913121

Mikhail S. Lisyatnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Construction
Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87, Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation
mlisyatnikov@mail.ru
SPIN-code: 4089-7216
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>
ResearcherID: V-6057-2018
Scopus Author ID: 56195815500

Evgeny S. Prusov, Doctor of Technical Sciences, Lead Researcher, Associate Professor of the Department of Structural and Functional Materials Technology
Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87, Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation
eprusov@mail.ru
SPIN-code: 9271-9470
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4189-877X>
ResearcherID: K-5461-2016
Scopus Author ID: 54416217300

Svetlana I. Roshchina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building construction
Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87, Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation
rsi3@mail.ru
SPIN-code: 4159-8639
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>
ResearcherID: A-7722-2019
Scopus Author ID: 57131029400

Mikhail A. Dubrovin, Senior Lecturer at the Department of Theory and History of State and Law

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87, Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation*

301507@bk.ru

SPIN-code: 6873-8735

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6726-824X>

Поступила 05.09.2024

После рецензирования 29.10.2024

Принята 07.11.2024

Received 05.09.2024

Revised 29.10.2024

Accepted 07.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1143

EDN: XXCSTI

УДК 636.088.31: 636.088.5



Научные обзоры

РЕАЛИЗАЦИЯ ВОСПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ BOS TAURUS ПОСРЕДСТВОМ ГОРМОНАЛЬНОЙ РЕГУЛЯЦИИ (ОБЗОР)

*А.Н. Фролов, О.А. Завьялов, Т.Б. Алдыяров,
Е.С. Медетов, З.А. Галиева*

Аннотация

Обоснование. Гормоны – биологически активные вещества, взаимодействуя между собой регулируют физиологические, метаболические процессы в организме сельскохозяйственных животных. Любой сбой в гормональном гомеостазе организма приводит к снижению продуктивных и репродуктивных качеств животных и как следствие экономическим потерям. Несмотря на значительные достижения в понимании гормональной регуляции полового цикла коровы, существует серьезный недостаток, отсутствие комплексных исследований по взаимодействию гормонов с рецепторами в целевых клетках-мишенях, активации или подавлении ими экспрессии определенных генов участвующих в синтезе белков и ферментов, а также механизмам регуляции гормональных систем. Это является серьезной проблемой поскольку отсутствие таких данных не раскрывает полный механизм действия определенного гормона, его роль в воспроизводительной способности. В этом обзоре мы постарались систематизировать имеющиеся данные по изучаемому вопросу. Объектами изучения стали научные публикации, посвященные различным аспектам гормональной регуляции половой функции крупного рогатого скота. Поиск осуществлялся в базах данных PubMed, Elsevier, Академии Google, Elibrary и других открытых интернет-источниках. По результатам которых систематизированы данные по механизму действия половых гормонов крупного рогатого скота: фолликулостимулирующего, лютеинизирующего, эстрогенов, прогестерона, тестостерона и простагландинов. Особое внимание в статье уделено проблемам гормональных нарушений и их влияние на репродуктивное здоровье животного. Понимание этих вопросов позволяет по-иному оценивать механизмы действия и уровень влияния гормонов на воспроизводительные

качества, что очень важно для модернизации репродуктивных технологий и повышения эффективности сельскохозяйственного производства.

Цель исследования. Проанализировать существующие научные данные о гонадотропных и гонадальных гормонах, влияющих на воспроизводительную функцию крупного рогатого скота.

Ключевые слова: крупный рогатый скот; половая функция; гормоны; фолликулостимулирующий гормон; лютеинизирующий гормон; обзор

Для цитирования. Фролов, А. Н., Завьялов, О. А., Алдыаров, Т. Б., Медетов, Е. С., & Галиева, З. А. (2025). Реализация воспроизводительной способности *Bos taurus* посредством гормональной регуляции (обзор). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 557-578. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1143>

Scientific Reviews

REALIZATION OF BOS TAURUS REPRODUCTIVE CAPACITY BY MEANS OF HORMONAL REGULATION (REVIEW)

*A.N. Frolov, O.A. Zavyalov, T.B. Aldyarov,
E.S. Medetov, Z.A. Galieva*

Abstract

Background. Hormones are biologically active substances that interact with each other and regulate physiological and metabolic processes in the body of farm animals. Any failure in the hormonal homeostasis of the body leads to a decrease in the productive and reproductive qualities of animals and, as a consequence, to economic losses. Despite significant advances in understanding the hormonal regulation of the cow's sexual cycle, there is a serious lack of comprehensive studies on the interaction of hormones with receptors in target cells, their activation or suppression of the expression of certain genes involved in the synthesis of proteins and enzymes, as well as the mechanisms of regulation of hormonal systems. This is a serious problem, since the lack of such data does not reveal the full mechanism of action of a particular hormone and its role in reproductive capacity. In this review, we tried to systematize the available data on the issue under study. The objects of study were scientific publications devoted to various aspects of hormonal regulation of the sexual function of cattle. The search was carried out in the PubMed, Elsevier, Google Scholar, Elibrary and other open Internet sources. Based on the search

results, data on the mechanism of action of cattle sex hormones were systematized: follicle-stimulating, luteinizing, estrogens, progesterone, testosterone and prosta-glandins. Particular attention in the article is paid to the problems of hormonal disorders and their impact on the reproductive health of the animal. Understanding these issues allows us to differently evaluate the mechanisms of action and the level of influence of hormones on reproductive qualities, which is very important for the modernization of reproductive technologies and increasing the efficiency of agricultural production.

Purpose. To analyze the existing scientific data on gonadotropic and gonadal hormones affecting the reproductive function of cattle.

Keywords: overview; cattle; sexual function; hormones; follicle stimulating hormone; luteinizing hormone; review

For citation. Frolov, A. N., Zavyalov, O. A., Aldyarov, T. B., Medetov, E. S., & Galieva, Z. A. (2025). Realization of *Bos taurus* reproductive capacity by means of hormonal regulation (review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 557-578. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1143>

Введение

Гормональная регуляция является фундаментальным аспектом ре-продуктивной системы крупного рогатого скота. Эндокринная система животных, включая разнообразие гормонов, таких как гонадотропины, эстрогены, прогестерон и андрогены, играет ключевую роль в управлении фертильностью и определяет воспроизводительные качества животных. Эти биоактивные вещества координируют сложные процессы, начиная от полового созревания и заканчивая успешным размножением, влияя на овуляцию, имплантацию, лактацию и многие другие важные функции ор-ганизма [1].

Изучение гормонального влияния на воспроизводительные процессы имеет не только теоретическое значение, но и практическую значимость, поскольку позволяет оптимизировать управление стадом для повышения его продуктивности. В этом контексте, понимание роли гормонов дает возможность для разработки новых подходов в селекции, ветеринарии и животноводстве, направленных на улучшение репродуктивного здоровья и общей продуктивности крупного рогатого скота [2; 3; 4].

Эффективная репродуктивная система обеспечивает положительное воспроизводство и в дальнейшем выход той или иной продукции и является ключевым фактором в экономической эффективности животноводства. Вот основные аспекты, подчеркивающие это значение:

1. Генетическое улучшение стада. Репродуктивная система позволяет внедрять программы селекции для улучшения генетических качеств стада. Скорость воспроизводства влияет на возможность быстрого распространения желаемых генетических черт.

2. Устойчивость популяции. Постоянное получение молодняка поддерживает численность стада, что важно для устойчивости производства продукции животноводства.

3. Производственная эффективность. Высокая фертильность и низкий уровень репродуктивных расстройств напрямую связаны с производственной эффективностью. Успешное размножение обеспечивает постоянный поток молодняка для мясного и молочного производства.

4. Экономическая выгода. Репродуктивное здоровье влияет на сокращение затрат на ветеринарное обслуживание и лечение. Улучшение репродуктивных показателей способствует повышению общей прибыльности фермы.

В целом, оптимизация репродуктивной системы крупного рогатого скота имеет далеко идущие положительные последствия для продуктивности и экономической эффективности, что делает её важной областью для исследований и улучшений в сельскохозяйственной отрасли.

Материалы и методы

Объектами изучения являлись научные публикации, посвящённые различным аспектам гормональной регуляции половой функции крупного рогатого скота. Поиск осуществлялся в базах данных PubMed, Elsevier, Академии Google, Elibrary и других открытых интернет-источниках, были использованы материалы, опубликованные в период с 1974 по 2024 годы.

Обзор основных половых гормонов и их функций

Половые гормоны крупного рогатого скота можно классифицировать по различным критериям, включая их происхождение, функции и механизм действия. Основные классы половых гормонов — это гонадотропины (фолликулостимулирующий гормон, лютеинизирующий гормон), стероидные гормоны (эстрогены, прогестерон, тестостерон) и простагландины (простагландин F2). Эти гормоны обеспечивают сложное взаимодействие между собой, регулируя репродуктивные функции и влияя на продуктивность крупного рогатого скота [5].

В настоящее время известно, что фолликулостимулирующий гормон (ФСГ) играет ключевую роль в репродуктивной системе крупного рогатого скота. ФСГ вырабатывается передней долей гипофиза под контролем

гонадотропин-релизинг гормона (ГнРГ) из гипоталамуса [6]. Основными целевыми клетками для ФСГ являются клетки фолликулов в яичниках у самок и клетки Сертоли в семенниках у самцов [7]. У самок ФСГ стимулирует рост и развитие фолликулов в яичниках [8].

Это включает в себя увеличение числа гранулезных клеток, которые производят эстрогены, особенно эстрадиол. У самцов ФСГ стимулирует клетки Сертоли, которые необходимы для поддержания сперматогенеза и выработки ингибина, регулирующего уровень ФСГ [9].

Известно, что механизм действия ФСГ заключается на взаимодействии с рецепторами, на мембранах своих клеток-мишеней в яичниках и яичках, что приводит к стимуляции системы аденилатциклазы. Нарушения в работе ФСГ могут привести к репродуктивным проблемам, таким как бесплодие или низкая фертильность [10].

Лютеинизирующий гормон (ЛГ) производится в передней доле гипофиза и секретируется в ответ на гонадотропин-релизинг гормон (ГнРГ), который выделяется гипоталамусом [11]. У самок целевыми клетками ЛГ являются клетки теки фолликулов в яичниках, а у самцов – клетки Лейдига в семенниках. У самок ЛГ вызывает овуляцию – выпуск зрелой яйцеклетки из фолликула. После овуляции ЛГ стимулирует превращение остатков фолликула в желтое тело, которое вырабатывает прогестерон [12; 13]. У самцов синтез ЛГ стимулирует клетки Лейдига к синтезу тестостерона, который необходим для сперматогенеза и развития половых признаков присущих самцам [14; 15; 16].

Это обеспечивает нормальное функционирование репродуктивной системы и важно для поддержания продуктивности животных. Нарушения в работе ЛГ могут привести к ановуляции или недостаточному развитию желтого тела [17].

Эстрадиол является основным эстрогенным гормоном. Он вырабатывается в яичниках, в основном в фолликулах во время их роста и в желтом теле после овуляции [18; 19; 20]). Уровень эстрадиола регулируется гонадотропинами (ФСГ и ЛГ), которые вырабатываются в гипофизе и контролируются гонадотропин-релизинг-гормоном (ГнРГ) [21]. Эстрадиол действует на репродуктивные органы и молочные железы. Также стимулирует рост и развитие половых органов, подготавливает эндометрий к имплантации эмбриона и регулирует выработку слизи шейки матки и вызывает клинические признаки половой охоты у самок. В молочных железах эстрадиол способствует развитию и подготовке к лактации [22].

Механизм действия эстрадиола заключается в связывании с эстрогенными рецепторами в целевых клетках, что приводит к активации или по-

давлению экспрессии определенных генов. Это влияет на синтез белков и ферментов, необходимых для репродуктивных и других физиологических функций. Нарушения в выработке или действии эстрадиола может привести к репродуктивным дисфункциям и снижению фертильности [23].

Эстриол – это один из эстрогенных гормонов, который присутствует у крупного рогатого скота, хотя его концентрация в крови обычно ниже, чем у других эстрогенов, таких как эстрадиол. Эстриол в основном образуется из предшественников (эстрадиол и эстрон). Его уровень повышается во время беременности, так как он также вырабатывается плацентой [24]. Как и другие эстрогены, уровень эстриола регулируется гонадотропинами и зависит от фазы репродуктивного цикла. Эстриол способствует подготовке эндометрия к имплантации эмбриона и поддержанию беременности. Он менее активен по сравнению с эстрадиолом и действует на репродуктивные органы, молочные железы и другие ткани, которые содержат эстрогенные рецепторы [25].

Механизм действия эстриола заключается в связывании с эстрогенными рецепторами в клетках, что приводит к изменению экспрессии генов, необходимых для поддержания беременности и других репродуктивных процессов.

Эстрон – это один из трех основных эстрогенных гормонов, наряду с эстрадиолом и эстриолом, и он играет важную роль в репродуктивной системе крупного рогатого скота. Эстрон образуется в яичниках, желтом теле и плаценте. Он также может образовываться из андростендиона в периферических тканях. Уровень эстрогена в организме регулируется гонадотропинами – ФСГ и ЛГ и участвует в снижении их секреции. Эстрон действует на многие ткани, включая репродуктивные органы, молочные железы и кости. Эстрон помогает поддерживать репродуктивные функции. Он участвует в регуляции эструса (течки) у самок, вызывает пролиферацию эндометрия, стимулирует развитие матки, фаллопиевых труб, вторичных женских половых признаков, оказывает влияние на формирование скелета [26].

Эстрон может превращаться в более активный эстрадиол или менее активный эстриол, в зависимости от физиологических потребностей организма.

Эстрон, хотя и менее активен, чем эстрадиол, но все же важен для поддержания нормального репродуктивного здоровья и функционирования у крупного рогатого скота. Нарушения в его выработке или действии могут привести к репродуктивным проблемам и снижению фертильности.

Прогестерон вырабатывается в основном желтым телом яичников после овуляции и плацентой во время беременности. Уровень прогестерона регулируется гонадотропными гормонами, такими как ЛГ (лютеинизирующий гормон), и изменяется в зависимости от стадии эструса. Прогестерон действует на матку, подготавливая эндометрий к имплантации оплодотворенной яйцеклетки и поддерживая беременность. Он уменьшает сократительную активность матки и способствует развитию молочных желез. Прогестерон регулирует половой цикл, влияя на его фазы, особенно на лютеиновую фазу, когда его уровень повышается [27; 28].

Прогестерон также метаболизируется в печени, где он может превращаться в другие стероидные гормоны или выводиться из организма [29]. Нарушения в его выработке или действии может привести к репродуктивным проблемам, таким как прерывание беременности или аномалии эструсного цикла [30].

Тестостерон – это основной мужской половой гормон, который также играет важную роль в репродуктивной системе крупного рогатого скота. Тестостерон вырабатывается в яичках у самцов, а также в небольших количествах в яичниках и надпочечниках у самок [31]. Уровень тестостерона регулируется гонадотропными гормонами, такими как ФСГ (фолликулостимулирующий гормон) и ЛГ (лютеинизирующий гормон). У самцов тестостерон участвует в сперматогенезе, оказывает влияние на жизнеспособность и активность сперматозоидов, стимулирует развитие вторичных половых признаков, таких как увеличение мышечной массы, рост волос и глубина голоса [32].

Тестостерон связывается с андрогенными рецепторами в целевых клетках, что приводит к активации или подавлению определенных генов, влияющих на рост, развитие и репродуктивное поведение [33]. Тестостерон усиливает синтез белка и рост мышц, что важно для развития. У самцов тестостерон может влиять на агрессивное и доминирующее поведение, что имеет значение для репродуктивного цикла [34].

Тестостерон необходим для нормального функционирования репродуктивной системы и общего здоровья крупного рогатого скота. Нарушения в его синтезе или функции могут привести к различным проблемам, включая снижение репродуктивной способности и изменения в поведении.

Простагландины представляют собой класс биологически активных липидов, которые синтезируются в теле из определённых полиненасыщенных жирных кислот через ферментативные реакции. Эти соединения обладают двадцатуглеродной структурой и выполняют функцию меди-

аторов, оказывая значительное влияние на различные физиологические процессы. Простагландины также являются производными простановых кислот, что подчёркивает их роль в организме [35].

Один из типов простагландинов является F2 α (PGF2 α) относящийся к лютеолитическим агентам, способствуя регрессии желтого тела (лютеолиз), что важно для начала нового полового цикла. Также он вызывает сокращение гладких мышц матки, что может способствовать отторжению старого эндометрия во время менструации у самок и помогать в процессе родов. Простагландин влияет на сосудистый тонус и кровоток в яичниках, что важно для поддержания функции желтого тела и развития фолликулов. Как и другие простагландины, PGF2 α участвует в воспалительных процессах, которые могут быть важны для защиты от инфекций и восстановления тканей. PGF2 α является ключевым компонентом репродуктивной системы и его действие тесно связано с поддержанием нормального репродуктивного здоровья и функционирования у крупного рогатого скота [36; 37; 38; 39].

Нейрогуморальная регуляция половых гормонов

Крупный рогатый скот характеризуется полиэстричным репродуктивным поведением, при котором продолжительность эструса составляет в среднем 21 день. В течение этого периода происходит циклическое колебание уровней специфических гормонов, которые играют важную роль в регуляции репродуктивных функций. Эти гормональные изменения обеспечивают подготовку организма к овуляции и возможному естественному или искусственному оплодотворению [40; 41].

Контроль за репродуктивными функциями самок крупного рогатого скота осуществляется через сложную систему нервно-гуморальной регуляции. Сенсорные раздражители, такие как свет, температура и т.д., активируют экстерорецепторы и интерорецепторы, которые отправляют сигналы в мозг. В коре головного мозга эти сигналы обрабатываются и направляются в гипоталамус, где нейросекреторные клетки вырабатывают релизинг-гормоны. Эти гормоны стимулируют гипофиз к выделению гонадотропных гормонов, включая фолликулостимулирующий, лютеинизирующий и лактотропный (ЛТГ) гормоны [42; 43; 44].

ФСГ способствует росту и созреванию фолликулов в яичниках, которые в свою очередь вырабатывают эстрогены, в том числе эстрадиол, вызывающий эструс. Эстрогены увеличивают размер матки, стимулируют рост эпителия и активизируют секрецию половых путей, а также усиливают сокращения матки и чувствительность к окситоцину [45].

С увеличением уровня эстрогенов возрастает их воздействие на нервную систему, вызывая половое возбуждение. Высокие концентрации эстрогенов влияют на гипоталамо-гипофизарную систему, снижая выработку ФСГ и увеличивая выделение ЛГ и ЛТГ, что приводит к овуляции и формированию желтого тела. Желтое тело вырабатывает прогестерон, который подготавливает матку к имплантации зародыша и поддерживает беременность на ранних стадиях [46].

Прогестерон также регулирует рост фолликулов и овуляцию, предотвращая сокращение матки. Высокие уровни прогестерона подавляют выработку ЛГ и стимулируют выделение ФСГ, что способствует формированию новых фолликулов и началу нового полового цикла. Важную роль в регуляции половых процессов играют также гормоны других желез, включая эпифиз, надпочечники и щитовидную железу [47].

Гормональная регуляция полового цикла зависит от двух основных типов гормонов: гонадотропных, вырабатываемых гипофизом, и гонадальных, производимых яичниками. Эстрогены, включая эстрадиол, эстрон и эстриол, вырабатываются в фолликулах и других тканях, включая плаценту и надпочечники [48].

ФСГ и эстрогены взаимодействуют между собой, вызывая развитие фолликулов и эструс, в то время как прогестерон поддерживает беременность и регулирует половой цикл. Внешние факторы, такие как питание, свет и присутствие самца, также влияют на половой цикл, обеспечивая поступление необходимых стероидов и витаминов.

Созревание половой системы контролируется гипоталамусом, чувствительность которого к половым гормонам со временем меняется. После рождения, гипоталамус чувствителен к низким уровням половых гормонов, что предотвращает преждевременное созревание. С возрастом увеличивается выработка гонадотропинов и половых гормонов, что приводит к наступлению половой зрелости [49].

Изучение гормональных процессов, происходящих в организме крупного рогатого скота, дает возможность применения различных методов индукции полового цикла [50].

Заключение

Изучение роли гормонов в репродуктивных процессах крупного рогатого скота имеет фундаментальное значение для ветеринарной науки и животноводства. Гормональная регуляция оказывает прямое влияние на фертильность, здоровье и продуктивность животных. Фолликулоstimу-

лирующий и лютеинизирующий гормоны, вырабатываемые гипофизом, а также эстрогены и прогестерон, производимые яичниками, играют ключевую роль в овуляции, эструсе и поддержании беременности.

Понимание механизмов действия этих гормонов позволяет разрабатывать методы управления репродуктивной функцией, что способствует улучшению воспроизводительных качеств и повышению продуктивности стада.

В заключении, гормоны играют центральную роль в репродуктивной системе крупного рогатого скота, и их изучение открывает новые перспективы для оптимизации репродуктивных технологий и повышения эффективности сельскохозяйственного производства.

Заключение комитета по этике. Исследование проводили в соответствии с требованиями Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в научных целях (ETS No123, Страсбург, 1986) и Приказа МЗ РФ No 708 Н от 28 августа 2010 г.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-16-00093).

Список литературы

1. Федотов, С. В., Олейникова, Е. Е., & Бурых, А. А. (2020). Регуляция репродукции крупного рогатого скота. В *Аграрная наука — сельскому хозяйству: Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции* (Том 2, с. 372-374). Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/fagqvh>
2. Савенко, Н. А. (2008). *Программа совершенствования молочного скота Подмосковья (2007-2015 гг.)*. Москва: Минсельхозпрод МО. 80 с.
3. Федотов, С. В., Белозерцева, Н. С., Гоминюк, В. В., & Мясникова, И. Р. (2016). Совершенствование диагностики и терапии акушерско-гинекологических заболеваний коров в условиях крупного животноводческого предприятия. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2(136), 106-114. EDN: <https://elibrary.ru/vqspsl>
4. Бексеитов, Т. К., & Абельдинов, Р. Б. (2018). Полиморфизм и молочная продуктивность коров симментальской породы в зависимости от генотипа по гену гормона гипофиза пролактина. В *Кормопроизводство, продуктивность, долголетие и благополучие животных: Материалы международной научно-практической конференции* (с. 9-13). Новосибирск: Издательский центр НГАУ «Золотой колос». EDN: <https://elibrary.ru/mgysnv>

5. Назаров, М. В., Гринь, В. А., & Горпинченко, Е. А. (2017). Гормональная регуляция воспроизводительной функции коров и телок. *Ветеринария Кубани*, 4, 10-12. EDN: <https://elibrary.ru/zduikn>
6. Park, S. R., Kim, S. R., Kim, S. K., Park, J. R., & Hong, I. S. (2022). A novel role of follicle-stimulating hormone (FSH) in various regeneration-related functions of endometrial stem cells. *Exp Mol Med*, 54(9), 1524-1535. <https://doi.org/10.1038/s12276-022-00858-1>. EDN: <https://elibrary.ru/gkejiw>
7. Crépieux, P., Marion, S., Martinat, N., Fafeur, V., Vern, Y. L., Kerboeuf, D., Guillou, F., & Reiter, E. (2001). The ERK-dependent signalling is stage-specifically modulated by FSH, during primary Sertoli cell maturation. *Oncogene*, 20(34), 4696-709. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1204632>
8. ГОСТ 27775-2014 Искусственное осеменение сельскохозяйственных животных. Термины и определения. (2015). Москва: Стандартинформ.
9. Bhartiya, D., & Patel, H. (2021). An overview of FSH-FSHR biology and explaining the existing conundrums. *J Ovarian Res*, 14, 144. <https://doi.org/10.1186/s13048-021-00880-3>. EDN: <https://elibrary.ru/righdjg>
10. Casarini, L., & Crépieux, P. (2019). Molecular Mechanisms of Action of FSH. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 10, 305. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00305>
11. Hillier, S. (2004). Rôles respectifs des gonadotrophines sur la croissance folliculaire et la maturation ovocytaire. *J Gynecol Obstet Biol Reprod (Paris)*, 33(6 Pt 2), 3S11-4.
12. Hugues, J. N., & Cedrin-Durnerin, I. (2000). Le rôle de l'hormone lutéinisante dans la physiologie du follicule et du corps jaune [Role of luteinizing hormone in follicular and corpus luteum physiology]. *Gynecol Obstet Fertil*, 28(10), 738-744. [https://doi.org/10.1016/s1297-9589\(00\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s1297-9589(00)00005-9).
13. Чуличкова, С. А. (2016). Особенности гормонального статуса коров на ранних сроках стельности. В *Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов* (с. 271-274). Троицк: Южно-Уральский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/wmxiueh>
14. Болдонова, Н. А., & Дружинина, Е. Б. (2014). Фолликуло- и оогенез: химические свойства и биологическое действие лютеинизирующего гормона. *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*, 129(6), 28-31. EDN: <https://elibrary.ru/tneooyz>
15. Ковалева, Ю. В. (2011). Роль лютеинизирующего гормона в фолликулогенезе и индукции овуляции. *Балтийский журнал современной эндокринологии*, 2, 21-28. EDN: <https://elibrary.ru/pfwbyh>

16. Шевлюк, Н. Н., & Стадников, А. А. (2010). *Клетки Лейдига семенников позвоночных: (онтогенез, ультраструктура, цитофизиология, факторы и механизмы регуляции)*. Оренбург: Оренбургская государственная медицинская академия. 484 с. ISBN: 978-5-91924-011-2. EDN: <https://elibrary.ru/tbdzht>
17. Luo, W., Gumen, A., Haughian, J. M., & Wiltbank, M. C. (2011). The role of luteinizing hormone in regulating gene expression during selection of a dominant follicle in cattle. *Biol Reprod*, 84(2), 369-378. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.110.085274>. EDN: <https://elibrary.ru/oankod>
18. Довжикова, И. В., & Андриевская, И. А. (2019). Рецепторы эстрогенов (обзор литературы). Часть 1. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*, 72, 120-127. https://doi.org/10.12737/article_5d0ad2e5d54867.15780111. EDN: <https://elibrary.ru/wdqnkp>
19. Карева, Е. Н., & Шимановский, Н. Л. (2011). Молекулярная фармакология эстрогенов. *Молекулярная медицина*, 1, 10-18. EDN: <https://elibrary.ru/ndnxhf>
20. Шантанова, Е. В., & Свиная, Ю. С. (2020). Строение и физико-химические свойства эстрадиола. В *Актуальные вопросы фармацевтических и естественных наук: Сборник статей Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием* (с. 69-72). Иркутск: Иркутский государственный медицинский университет. EDN: <https://elibrary.ru/nkqsim>
21. Lin, Y. P., Kwon, H. B., Petrino, T. R., & Schuetz, A. W. (1988). Studies on the Mechanism of Action of Estradiol in Regulating Follicular Progesterone Levels: Effects on cAMP Mediated Events and 3 β -Hydroxysteroid Dehydrogenase. *Developmental Growth & Differentiation*, 30(6), 611-618. <https://doi.org/10.1111/j.1440-169X.1988.00611.x>. PMID: 37282213
22. Луценко, М. Т., Андриевская, И. А., & Довжикова, И. В. (2016). Роль эстрадиола в поддержании фетоплацентарной системы. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*, 61, 75-79. <https://doi.org/10.12737/21458>. EDN: <https://elibrary.ru/wmbrll>
23. Васильева, С. В., & Конопатов, Ю. В. (2009). *Клиническая биохимия крупного рогатого скота*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины. 179 с. EDN: <https://elibrary.ru/vfarxp>
24. Абилов, А. И., Митяшова, О. С., Мымрин, С. В., и др. (2018). Содержание эндогенных гормонов у быков-производителей с учетом возраста, аутоиммунного состояния и продуктивности материнских предков. *Сельскохозяйственная биология*, 53(4), 743-752. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.743rus>. EDN: <https://elibrary.ru/uzblqs>

25. Довжикова, И. В., Андриевская, И. А., & Петрова, К. К. (2018). Рецепторы прогестерона: репродуктивная роль. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*, 70, 104-112. https://doi.org/10.12737/article_5c1278d242a333.68376622. EDN: <https://elibrary.ru/yrptad>
26. Kuhl, H. (2005). Pharmacology of estrogens and progestogens: influence of different routes of administration. *Climacteric*, 8 Suppl 1, 3-63. <https://doi.org/10.1080/13697130500148875>.
27. Brann, D. W., & Mahesh, V. B. (1991). Detailed examination of the mechanism and site of action of progesterone and corticosteroids in the regulation of gonadotropin secretion: hypothalamic gonadotropin-releasing hormone and catecholamine involvement. *Biology of Reproduction*, 44(6), 1005-1015. <https://doi.org/10.1095/biolreprod44.6.1005>.
28. Репина, М. А. (2011). Прогестерон и беременность. *Журнал акушерства и женских болезней*, 60(3), 130-135. EDN: <https://elibrary.ru/ofsqvf>
29. Довжикова, И. В., Андриевская, И. А., & Петрова, К. К. (2018). Рецепторы прогестерона: репродуктивная роль. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*, 70, 104-112. https://doi.org/10.12737/article_5c1278d242a333.68376622. EDN: <https://elibrary.ru/yrptad>
30. Клинский, Ю. Д. (2011). Нейрогуморальная регуляция функции размножения у коров. В *Практическое использование современных научных разработок в воспроизводстве и селекции крупного рогатого скота: Материалы пленарного заседания международной научно-практической конференции* (с. 181-195). Дубровицы: ГНУ ВИЖ Россельхозакадемии. EDN: <https://elibrary.ru/qokywx>
31. Абилов, А. И., Митяшова, О. С., Мымрин, С. В., и др. (2018). Содержание эндогенных гормонов у быков-производителей с учетом возраста, аутоиммунного состояния и продуктивности материнских предков. *Сельскохозяйственная биология*, 53(4), 743-752. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.743rus>. EDN: <https://elibrary.ru/uzblq5>
32. Bridges, N. A., Hindmarsh, P. C., Pringle, P. J., Matthews, D. R., & Brook, C. G. (1993). The relationship between endogenous testosterone and gonadotrophin secretion. *Clin Endocrinol (Oxf)*, 38(4), 373-378. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2265.1993.tb00517.x>
33. Амерханов, Х. А., Абилов, А. И., Ескин, Г. В., и др. (2014). Содержание тестостерона и холестерина в сыворотке крови у быков-производителей в зависимости от типа продуктивности, возраста и сезона года. *Сельскохозяйственная биология*, 49(2), 59-66. EDN: <https://elibrary.ru/sbjjqv>
34. Горецкая, М. Я., & Беме, И. Р. (2020). Тестостерон в регуляции различных аспектов поведения и физиологии птиц. *Зоологический журнал*, 99(12),

- 1415-1423. <https://doi.org/10.31857/S0044513420090093>. EDN: <https://elibrary.ru/ttjqju>
35. Павлов, С. А., Кутаев, Е. М., & Олейников, Н. А. (2017). Роль простагландиновых соединений в репродуктивной системе животных. В *Актуальные проблемы биотехнологии и ветеринарной медицины: Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых* (с. 142-152). Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского. EDN: <https://elibrary.ru/xzghnr>
36. Downie, J., Poyser, N. L., & Wunderlich, M. (1974). Levels of prostaglandins in human endometrium during the normal menstrual cycle. *J Physiol*, 236(2), 465-472. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1974.sp010446>
37. Hooper, S. B., Watkins, W. B., & Thorburn, G. D. (1986). Oxytocin, oxytocin-associated neurophysin, and prostaglandin F2 alpha concentrations in the utero-ovarian vein of pregnant and nonpregnant sheep. *Endocrinology*, 119(6), 2590-2597. <https://doi.org/10.1210/endo-119-6-2590>
38. Peter, C. (2004). *The Eicosanoids*. In Peter Curtis-Prior (Ed.). Wiley. ISBN: 978-0-471-48984-9
39. Samuelsson, B. (1978). Prostaglandins and thromboxanes. *Recent Prog Horm Res*, 34, 239-258. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-571134-0.50010-7>
40. Белик, С. В., & Лозовой, Н. М. (2022). Современное представление о половом цикле коров и его регуляции. В *Актуальные вопросы ветеринарной медицины, ветеринарно-санитарной экспертизы и зоотехнии: Тезисы по материалам Круглого стола* (с. 19-21). Воронеж: Воронежский ГАУ. EDN: <https://elibrary.ru/whmhcc>
41. Зубкова, Л. И., Москаленко, Л. П., & Гангур, В. Я. (2012). *Воспроизводство крупного рогатого скота*. Ярославль: Ярославская ГСХА. 150 с. ISBN: 978-5-98914-112-8. EDN: <https://elibrary.ru/ukighd>
42. Прокофьев, М. И. (1983). *Регуляция размножения сельскохозяйственных животных*. Ленинград: Наука. EDN: <https://elibrary.ru/uhjfm1>
43. Смирнов, Е. П., & Короткова, Д. А. (2021). Гипоталамо-гипофизарная система и ее роль в организме животных. В *Студенческая наука - первый шаг к цифровизации сельского хозяйства* (с. 111-113). Чебоксары: Чувашский ГАУ. EDN: <https://elibrary.ru/tvijbo>
44. Эрнст, Л. К., & Варнавский, А. Н. (2007). *Репродукция животных*. Дубровицы: Инфосервис. 282 с.
45. Якубова, Д. Р., & Калашникова, М. В. (2022). Нейрогуморальная регуляция половых функций при искусственном осеменении животных. В *Успехи молодежной науки в агропромышленном комплексе* (с. 158-166). Тюмень: ГАУ Северного Зауралья. EDN: <https://elibrary.ru/fcqioz>

46. Клинский, Ю. Д. (2011). Нейрогуморальная регуляция функции размножения у коров. В *Практическое использование современных научных разработок в воспроизводстве и селекции крупного рогатого скота* (с. 181-195). Дубровицы: ВИЖ Россельхозакадемии. EDN: <https://elibrary.ru/qokywx>
47. Писаренко, Н. А. (2006). *Нейроэндокринная регуляция половой функции сельскохозяйственных животных*. Ставрополь: Ставропольский НИИЗК. 21 с. EDN: <https://elibrary.ru/vnduyn>
48. Няненко, О. А., & Няненков, А. А. (2022). Роль нервной и эндокринной регуляции организма. В *В мире научных открытий* (с. 1699-1702). Ульяновск: УГАУ. EDN: <https://elibrary.ru/bgiowo>
49. Бардин, В. С., Шубина, О. С., & Волкова, Н. С. (2017). Строение и функции гипоталамо-гипофизарной системы (обзор литературы). В *Евсеевские чтения* (с. 4-8). Саранск: МГПУ. EDN: <https://elibrary.ru/zfxfn>
50. Сердюченко, И. В., Хорошайло, Т. А., & Козубов, А. С. (2022). Влияние разных способов синхронизации половой охоты коров на их воспроизводительные качества. *Вестник Рязанского ГАУ*, 14(4), 65-72. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.47.28.010>. EDN: <https://elibrary.ru/ldpoyo>

References

1. Fedotov, S. V., Oleinikova, E. E., & Burykh, A. A. (2020). Regulation of reproduction in cattle. In *Agrarian science — for agriculture: Collection of materials of the XV International scientific-practical conference* (Vol. 2, pp. 372-374). Barnaul: Altai State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/fagqvh>
2. Savenko, N. A. (2008). *Program for improvement of dairy cattle in Moscow region (2007-2015)*. Moscow: Minselkhozprod MO. 80 p.
3. Fedotov, S. V., Belozertseva, N. S., Gominuk, V. V., & Myasnikova, I. R. (2016). Improvement of diagnostics and therapy of obstetric and gynecological diseases in cows at large livestock enterprises. *Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2(136), 106-114. EDN: <https://elibrary.ru/vqpspl>
4. Bekseitov, T. K., & Abeldinov, R. B. (2018). Polymorphism and milk productivity of Simmental cows depending on genotype of pituitary hormone prolactin gene. In *Fodder production, productivity, longevity and welfare of animals: Materials of the international scientific-practical conference* (pp. 9-13). Novosibirsk: Publishing Center of NSAU «Golden Ear». EDN: <https://elibrary.ru/mgysnv>
5. Nazarov, M. V., Grin', V. A., & Gorpichenko, E. A. (2017). Hormonal regulation of reproductive function in cows and heifers. *Veterinary Science of Kuban*, 4, 10-12. EDN: <https://elibrary.ru/zduikn>

6. Park, S. R., Kim, S. R., Kim, S. K., Park, J. R., & Hong, I. S. (2022). A novel role of follicle-stimulating hormone (FSH) in various regeneration-related functions of endometrial stem cells. *Exp Mol Med*, 54(9), 1524-1535. <https://doi.org/10.1038/s12276-022-00858-1>. EDN: <https://elibrary.ru/gkejiw>
7. Crépieux, P., Marion, S., Martinat, N., Fafeur, V., Vern, Y. L., Kerboeuf, D., Guillou, F., & Reiter, E. (2001). The ERK-dependent signalling is stage-specifically modulated by FSH, during primary Sertoli cell maturation. *Oncogene*, 20(34), 4696-709. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1204632>
8. *GOST 2775-2014 Artificial insemination of farm animals. Terms and definitions* (2015). Moscow: Standartinform.
9. Bhartiya, D., & Patel, H. (2021). An overview of FSH-FSHR biology and explaining the existing conundrums. *J Ovarian Res*, 14, 144. <https://doi.org/10.1186/s13048-021-00880-3>. EDN: <https://elibrary.ru/righdg>
10. Casarini, L., & Crépieux, P. (2019). Molecular Mechanisms of Action of FSH. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 10, 305. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00305>
11. Hillier, S. (2004). Rôles respectifs des gonadotrophines sur la croissance folliculaire et la maturation ovocytaire. *J Gynecol Obstet Biol Reprod (Paris)*, 33(6 Pt 2), 3S11-4.
12. Hugues, J. N., & Cedrin-Durnerin, I. (2000). Le rôle de l'hormone lutéinisante dans la physiologie du follicule et du corps jaune [Role of luteinizing hormone in follicular and corpus luteum physiology]. *Gynecol Obstet Fertil*, 28(10), 738-744. [https://doi.org/10.1016/s1297-9589\(00\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s1297-9589(00)00005-9).
13. Chulichkova, S. A. (2016). Features of hormonal status in cows at early stages of pregnancy. In *Young scientists in solving urgent scientific problems: Materials of the international scientific-practical conference of young scientists and specialists* (pp. 271-274). Troitsk: South Ural State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/wmxuex>
14. Boldonova, N. A., & Druzhinina, E. B. (2014). Folliculo- and oogenesis: chemical properties and biological action of luteinizing hormone. *Siberian Medical Journal (Irkutsk)*, 129(6), 28-31. EDN: <https://elibrary.ru/tneoyz>
15. Kovaleva, Yu. V. (2011). Role of luteinizing hormone in folliculogenesis and ovulation induction. *Baltic Journal of Modern Endocrinology*, 2, 21-28. EDN: <https://elibrary.ru/pfwbyh>
16. Shevlyuk, N. N., & Stadnikov, A. A. (2010). *Leydig cells of vertebrate testes: (ontogenesis, ultrastructure, cytophysiology, factors and mechanisms of regulation)*. Orenburg: Orenburg State Medical Academy. 484 p. ISBN: 978-5-91924-011-2. EDN: <https://elibrary.ru/tbdzht>

17. Luo, W., Gumen, A., Haughian, J. M., & Wiltbank, M. C. (2011). The role of luteinizing hormone in regulating gene expression during selection of a dominant follicle in cattle. *Biol Reprod*, 84(2), 369-378. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.110.085274>. EDN: <https://elibrary.ru/oankod>
18. Dovzhikova, I. V., & Andrievskaya, I. A. (2019). Estrogen receptors (literature review). Part 1. *Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*, 72, 120-127. https://doi.org/10.12737/article_5d0ad2e5d54867.15780111. EDN: <https://elibrary.ru/wdqnpk>
19. Kareva, E. N., & Shimanovsky, N. L. (2011). Molecular pharmacology of estrogens. *Molecular Medicine*, 1, 10-18. EDN: <https://elibrary.ru/ndnxhf>
20. Shantanova, E. V., & Svinareva, Yu. S. (2020). Structure and physicochemical properties of estradiol. In *Current issues in pharmaceutical and natural sciences*: Collection of articles of the All-Russian student scientific-practical conference with international participation (pp. 69-72). Irkutsk: Irkutsk State Medical University. EDN: <https://elibrary.ru/nkqsim>
21. Lin, Y. P., Kwon, H. B., Petrino, T. R., & Schuetz, A. W. (1988). Studies on the Mechanism of Action of Estradiol in Regulating Follicular Progesterone Levels: Effects on cAMP Mediated Events and 3 β -Hydroxysteroid Dehydrogenase. *Developmental Growth & Differentiation*, 30(6), 611-618. <https://doi.org/10.1111/j.1440-169X.1988.00611.x>. PMID: 37282213
22. Lutsenko, M. T., Andrievskaya, I. A., & Dovzhikova, I. V. (2016). Role of estradiol in maintenance of fetoplacental system. *Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*, 61, 75-79. <https://doi.org/10.12737/21458>. EDN: <https://elibrary.ru/wmbrll>
23. Vasilieva, S. V., & Konopatov, Yu. V. (2009). *Clinical biochemistry of cattle*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Academy of Veterinary Medicine. 179 p. EDN: <https://elibrary.ru/vfarxn>
24. Abilov, A. I., Mityashova, O. S., Mymrin, S. V., et al. (2018). Content of endogenous hormones in bulls-producers considering age, autoimmune status and productivity of maternal ancestors. *Agricultural Biology*, 53(4), 743-752. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.743rus>. EDN: <https://elibrary.ru/uzblqs>
25. Dovzhikova, I. V., Andrievskaya, I. A., & Petrova, K. K. (2018). Progesterone receptors: reproductive role. *Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*, 70, 104-112. https://doi.org/10.1537/article_5c1278d242a333.68376622. EDN: <https://elibrary.ru/yrptad>
26. Kuhl, H. (2005). Pharmacology of estrogens and progestogens: influence of different routes of administration. *Climacteric*, 8 Suppl 1, 3-63. <https://doi.org/10.1080/13697130500148875>.

27. Brann, D. W., & Mahesh, V. B. (1991). Detailed examination of the mechanism and site of action of progesterone and corticosteroids in the regulation of gonadotropin secretion: hypothalamic gonadotropin-releasing hormone and catecholamine involvement. *Biology of Reproduction*, 44(6), 1005-1015. <https://doi.org/10.1095/biolreprod44.6.1005>.
28. Repina, M. A. (2011). Progesterone and pregnancy. *Journal of Obstetrics and Women's Diseases*, 60(3), 130-135. EDN: <https://elibrary.ru/ofsqvf>
29. Dovzhikova, I. V., Andrievskaya, I. A., & Petrova, K. K. (2018). Progesterone receptors: reproductive role. *Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*, 70, 104-112. https://doi.org/10.1537/article_5c1278d242a333.68376622. EDN: <https://elibrary.ru/yrptad>
30. Клинский, Yu. D. (2011). Neurohumoral regulation of reproductive function in cows. In *Practical use of modern scientific developments in reproduction and selection of cattle: Materials of the plenary session of the international scientific-practical conference* (pp. 181-195). Dubrovitsy: Russian Academy of Agricultural Sciences. EDN: <https://elibrary.ru/qokywx>
31. Abilov, A. I., Mityashova, O. S., Mymrin, S. V., et al. (2018). Content of endogenous hormones in bulls-producers considering age, autoimmune status and productivity of maternal ancestors. *Agricultural Biology*, 53(4), 743-752. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.743rus>. EDN: <https://elibrary.ru/uzblqs>
32. Bridges, N. A., Hindmarsh, P. C., Pringle, P. J., Matthews, D. R., & Brook, C. G. (1993). The relationship between endogenous testosterone and gonadotrophin secretion. *Clin Endocrinol (Oxf)*, 38(4), 373-378. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2265.1993.tb00517.x>
33. Amerkhanov, Kh. A., Abilov, A. I., Eskin, G. V., et al. (2014). Content of testosterone and cholesterol in blood serum of bull-producers depending on type of productivity, age and season of the year. *Agricultural Biology*, 49(2), 59-66. EDN: <https://elibrary.ru/sbjjqv>
34. Goretskaya, M. Ya., & Beme, I. R. (2020). Testosterone in regulation of various aspects of behavior and physiology in birds. *Zoological Journal*, 99(12), 1415-1423. <https://doi.org/10.31857/S0044513420090093>. EDN: <https://elibrary.ru/ttjqju>
35. Pavlov, S. A., Kutaev, E. M., & Oleinikov, N. A. (2017). Role of prostaglandin compounds in reproductive system of animals. In *Current problems of biotechnology and veterinary medicine: Materials of the international scientific-practical conference of young scientists* (pp. 142-152). Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky. EDN: <https://elibrary.ru/xzghnr>
36. Downie, J., Poyser, N. L., & Wunderlich, M. (1974). Levels of prostaglandins in human endometrium during the normal menstrual cycle. *J Physiol*, 236(2), 465-472. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1974.sp010446>

37. Hooper, S. B., Watkins, W. B., & Thorburn, G. D. (1986). Oxytocin, oxytocin-associated neurophysin, and prostaglandin F2 alpha concentrations in the utero-ovarian vein of pregnant and nonpregnant sheep. *Endocrinology*, 119(6), 2590-2597. <https://doi.org/10.1210/endo-119-6-2590>
38. Peter, C. (2004). *The Eicosanoids*. In Peter Curtis-Prior (Ed.). Wiley. ISBN: 978-0-471-48984-9
39. Samuelsson, B. (1978). Prostaglandins and thromboxanes. *Recent Prog Horm Res*, 34, 239-258. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-571134-0.50010-7>
40. Belik, S. V., & Lozovoy, N. M. (2022). Modern understanding of the sexual cycle of cows and its regulation. In *Current issues in veterinary medicine, veterinary and sanitary examination and animal science: Abstracts of the Round Table materials* (pp. 19-21). Voronezh: Voronezh State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/whmhcc>
41. Zubkova, L. I., Moskalenko, L. P., & Ganguar, V. Ya. (2012). *Reproduction of cattle*. Yaroslavl: Yaroslavl State Agricultural Academy. 150 p. ISBN: 978-5-98914-112-8. EDN: <https://elibrary.ru/ukighd>
42. Prokofiev, M. I. (1983). *Regulation of reproduction in farm animals*. Leningrad: Nauka. EDN: <https://elibrary.ru/uhjfm1>
43. Smirnov, E. P., & Korotkova, D. A. (2021). Hypothalamic-pituitary system and its role in animal organism. In *Student science — the first step to digitalization of agriculture* (pp. 111-113). Cheboksary: Chuvash State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/tvijbo>
44. Ernst, L. K., & Varnavsky, A. N. (2007). *Animal reproduction*. Dubrovitsy: Infoservice. 282 p.
45. Yakubova, D. R., & Kalashnikova, M. V. (2022). Neurohumoral regulation of sexual functions during artificial insemination of animals. In *Successes of youth science in agro-industrial complex* (pp. 158-166). Tyumen: Northern Trans-Urals State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/fcqioz>
46. Klinsky, Yu. D. (2011). Neurohumoral regulation of reproductive function in cows. In *Practical use of modern scientific developments in reproduction and selection of cattle* (pp. 181-195). Dubrovitsy: Russian Academy of Agricultural Sciences. EDN: <https://elibrary.ru/qokywx>
47. Pisarenko, N. A. (2006). *Neuroendocrine regulation of sexual function in farm animals*. Stavropol: Stavropol Research Institute of Crop Production. 21 p. EDN: <https://elibrary.ru/vnduyn>
48. Nyankenkova, O. A., & Nyankenkov, A. A. (2022). Role of nervous and endocrine regulation of the organism. In *In the world of scientific discoveries* (pp. 1699-1702). Ulyanovsk: USAU. EDN: <https://elibrary.ru/bgiowo>

49. Bardin, V. S., Shubina, O. S., & Volkova, N. S. (2017). Structure and functions of the hypothalamic-pituitary system (literature review). In *Evseiev readings* (pp. 4-8). Saransk: MPGU. EDN: <https://elibrary.ru/zfxfnm>
50. Serdyuchenko, I. V., Khoroshaylo, T. A., & Kozubov, A. S. (2022). Influence of different methods of synchronization of cows' sexual heat on their reproductive qualities. *Bulletin of Ryazan State Agrarian University*, 14(4), 65-72. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.47.28.010>. EDN: <https://elibrary.ru/ldpoyo>

ВКЛАД АВТОРОВ

Фролов А.Н., Завьялов О.А.: разработка концепции научной работы, составление черновика рукописи.

Алдыряров Т.Б., Медетов Е.С., Галиева З.А.: разработка концепции научной работы, редактирование черновика рукописи, написание рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alexey N. Frolov, Oleg A. Zavyalov: development of the concept of scientific work, drafting of the manuscript.

Timur B. Aldyarov, Erlan S. Medetov, Zulfiya A. Galieva: development of the concept of scientific work, editing of the draft manuscript, writing the manuscript.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Фролов Алексей Николаевич, доктор биологических наук, заведующий отделом технологии мясного скотоводства и производства говядины
*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»
ул. 9 января, 29 г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
forleh@mail.ru*

Завьялов Олег Александрович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины
*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»
ул. 9 января, 29 г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
oleg-zavyalov83@mail.ru*

Алдыяров Тимур Бажикенович, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»*

*ул. 9 января, 29 г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
aldyyarov97@mail.ru*

Медетов Ерлан Сагитович, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»*

*ул. 9 января, 29 г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
erlanmedetov29@mail.ru*

Галиева Зульфия Асхатовна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии мясных, молочных продуктов и химии

ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет

*ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Российская Федерация
zulfia2704@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexey N. Frolov, Dr. of Bio. Sc.

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

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

forleh@mail.ru

SPIN-code: 8129-5450

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2554>

Oleg A. Zavyalov, Dr. of Bio. Sc.

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

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

oleg-zavyalov83@mail.ru

SPIN-code: 6946-7296

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2033-3956>

Timur B. Aldyarov, Candidate of Agricultural Sciences, Junior Researcher at the Department of Technology of Beef Cattle Breeding and Beef Production

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

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

aldyyarov97@mail.ru

SPIN-code: 9730-0812

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8636-7553>

Erlan S. Medetov, Candidate of Agricultural Sciences, Junior Researcher at the Department of Technology of Beef Cattle Breeding and Beef Production

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

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

erlanmedetov29@mail.ru

SPIN-code: 3783-7465

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9424-4254>

Zulfiya A. Galieva, Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Department of Technology of Meat, Dairy Products and Chemistry

Bashkir State Agrarian University

34, 50th anniversary October's Str., Ufa, 450001, Russian Federation

zulfiya2704@mail.ru

SPIN-code: 5315-9065

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9973-7165>

Поступила 05.09.2024

После рецензирования 25.11.2024

Принята 01.12.2024

Received 05.09.2024

Revised 25.11.2024

Accepted 01.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1131

EDN: YWNYKM

УДК 579.22: 615.281.9



Научные обзоры

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ, МЕХАНИЗМЫ, СКОРОСТЬ РАЗВИТИЯ, ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ К АНТИБИОТИКАМ

П.А. Веденеев, А.В. Бюлер, И.А. Лебедева, Е.Г. Ковалева

Аннотация

Проблема антибиотикорезистентности сейчас как никогда актуальна. Кризис, связанный с распространением устойчивости к антибиотикам, приближается с каждым днем. Новых антибактериальных препаратов и методов, позволяющих эффективно бороться с устойчивыми микроорганизмами, не появляется, следовательно, появляется серьезнейший вызов для всего человечества, так как от эффективности антибиотиков напрямую зависят такие важные для жизни человека сферы как медицина и сельское хозяйство.

Цель исследования. Данная статья позволяет сформировать системный взгляд на явление антибиотикорезистентности.

Материал и методы. Для анализа литературы были использованы материалы из ресурсов PubMed и PubMed Central Национальной медицинской библиотеки США, Google Scholar, Elsevier Clinical Key и Elsevier Science Direct. Выборку составили научные статьи, посвященные антибиотикорезистентности.

Результат. В статье раскрываются причины появления, механизмы, скорость развития, способы и пути распространения антибиотикорезистентности, а также последствия приобретения устойчивости для микроорганизмов и способы сдерживания антибиотикорезистентности.

Ключевые слова: антибиотикорезистентность; устойчивость к антибиотикам; механизмы устойчивости; скорость развития; пути распространения; последствия устойчивости

Для цитирования. П.А. Веденеев, А.В. Бюлер, И.А. Лебедева, Е.Г. Ковалева (2025). Причины появления, механизмы, скорость развития, пути распространения и последствия устойчивости к антибиотикам. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 579-613. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1131>

Scientific Reviews

**CAUSES OF EMERGENCE, MECHANISMS,
RATE OF DEVELOPMENT, PATHWAYS OF SPREAD,
AND CONSEQUENCES OF ANTIBIOTIC RESISTANCE**

P.A. Vedeneyev, A.V. Buhler, I.A. Lebedeva, E.G. Kovaleva

Abstract

The problem of antibiotic resistance is more relevant than ever. The crisis associated with the spread of resistance to antibiotics is approaching every day. New antibacterial drugs and methods that allow for effective combating of resistant microorganisms are not emerging, therefore posing a serious challenge to humanity, as the effectiveness of antibiotics directly impacts important areas of human life such as medicine and agriculture.

Purpose. The article provides a systematic view of the phenomenon of antibiotic resistance.

Materials and methods. To analyze the literature, materials from the PubMed and PubMed Central resources of the US National Library of Medicine, Google Scholar, Elsevier Clinical Key and Elsevier Science Direct. The sample consisted of scientific papers devoted to antibiotic resistance.

Results. The article reveals the causes of emergence, mechanisms, rate of development, pathways of spread of antibiotic resistance and consequences of acquiring resistance for microorganisms and methods of containing antibiotic resistance.

Keywords: antibiotic resistance; mechanisms of resistance; rate of development; pathways of spread; consequences of resistance

For citation. P.A. Vedeneyev, A.V. Buhler, I.A. Lebedeva, E.G. Kovaleva (2025). Causes of emergence, mechanisms, rate of development, pathways of spread, and consequences of antibiotic resistance. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 579-613. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1131>

Введение

Устойчивость к противомикробным препаратам (УПП) – это явление, возникающее, когда микроорганизмы перестают реагировать на противомикробные препараты. Появление лекарственной устойчивости ведет к тому, что антибиотики и другие противомикробные препараты, в концентрациях которых ранее считались эффективными, перестают работать, а инфекции становится трудно или невозможно лечить [18].

Термины «антибиотик» и «противомикробный» часто используются взаимозаменяемо, но не являются синонимами. Антибиотики – это вещества, синтезированные микроорганизмами, а термин «противомикробный» относится к любому веществу, которое уничтожает микробы, включая синтетические соединения [5]. Антибиотикорезистентность формируется, когда в среде обитания микроорганизмов (как правило бактерий) появляются антибиотики. В современном мире антибиотики крайне широко применяются для лечения и/или профилактики заболеваний человека и животных, поэтому бактерии вынуждены приспосабливаться. Снижение смертности, обеспечиваемое эффективными антибиотиками при бактериальных инфекциях всех типов, настолько огромно, что благодаря ним спасено бесчисленное количество жизней людей и животных.

Антибиотикорезистентность – это одна из серьезнейших проблем современного мира. По прогнозу Всемирного банка до 2050 года, антибиотикорезистентность может привести к сокращению мирового ВВП на 1,3-3,8%, потери в бедных странах могут превысить 5% ВВП. Объем реального мирового экспорта может сократиться на 1,1–3,8%. Расходы на здравоохранение в мире могут увеличиться на 300 миллиардов долларов в год в хорошем сценарии и более чем 1 триллион долларов в год в плохом сценарии. Мировое животноводство может сократиться на 2,6–7,5% в год [7].

Столь значительное влияние на мировую экономику привлекает внимание ученых со всего мира. Актуальность проблемы видна по ежегодно увеличивающемуся количеству исследований по теме антибиотикорезистентности (рис. 1).

Борьба с устойчивостью к антибактериальным препаратам интересует не только ученых, но и международные организации. В 2001 году Всемирная организация здравоохранения опубликовала документ «Глобальная стратегия ВОЗ по сдерживанию устойчивости к противомикробным препаратам», в котором указываются основные причины возникновения антибиотикорезистентности и предлагаются меры по борьбе с ней [1]. Однако в последующие 15 лет нерациональное использование антибиотиков только возросло. Поэтому в 2015 году Всемирная организация здравоохранения приняла «Глобальный план действий по борьбе с устойчивостью к противомикробным препаратам» [2]. В России в 2017 году распоряжением Правительства Российской Федерации утверждена “Стратегия предупреждения распространения антимикробной резистентности в Российской Федерации на период до 2030 года” [4]. Дан-

ная стратегия устанавливает цели и задачи России в области борьбы с антибиотикорезистентностью, а также предлагает меры по предупреждению и ограничению распространения и возбудителей с УПП. Стратегия является основой для организации деятельности и взаимодействия органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, государственных и иных организаций, принимающих участие в реализации мер, направленных на предупреждение и ограничение распространения устойчивости микроорганизмов к противомикробным препаратам.

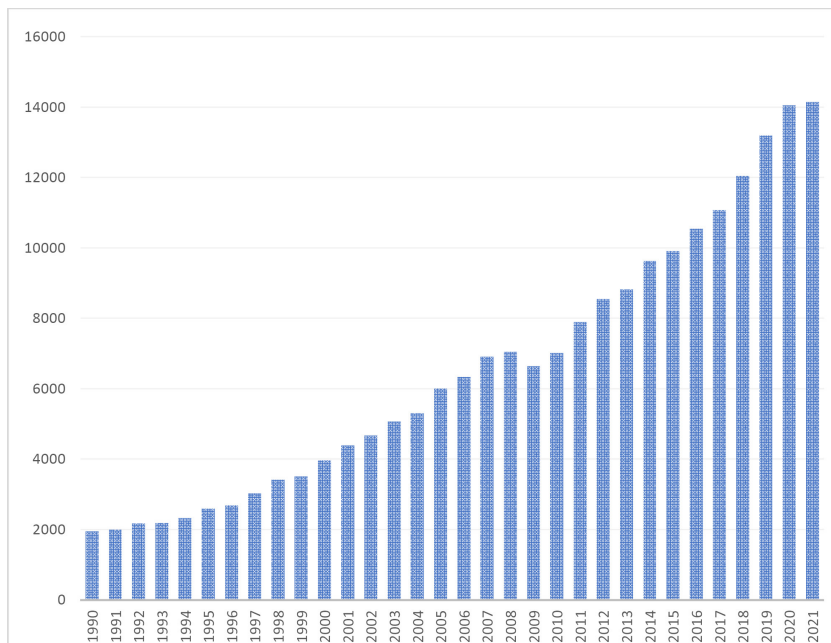


Рис. 1. Количество исследований по теме «antibiotic resistance» по данным Pubmed [101]

Также в России в 2018 году было выпущено последнее издание программы СКАТ (Стратегия Контроля Антимикробной Терапии) [3]. Задачи данной программы: профилактика распространения возбудителей нозокомиальных инфекций, резистентных к антибиотикам; рациональное применение антибиотиков с лечебной и профилактической целью, повышение

эффективности эмпирической антибактериальной терапии; оптимизация (снижение) расходов медицинской организации на антимикробные средства, пребывание пациента в стационаре, лечение нозокомиальных осложнений.

Данная статья призвана помочь широкому кругу читателей сформировать системный взгляд на явление антибиотикорезистентности. В статье рассматриваются причины появления, механизмы, скорость развития, пути распространения и последствия устойчивости к антибиотикам.

Причины возникновения устойчивости

Микроорганизмы вынуждены искать способ выжить в мире, где широко распространены противомикробные препараты. В этом им помогает их хорошая генетическая пластичность. С эволюционной точки зрения бактерии используют две основные стратегии для формирования устойчивости к антибиотикам: мутации в собственных генах и горизонтальный перенос генов (ГПГ) из других организмов (как правило других бактерий) [86, 83, 43]. Главными путями горизонтального переноса генов являются трансформация, трансдукция и конъюгация. Важнейшую роль в развитии и распространении устойчивости к антибиотикам среди бактерий играют плазмиды, которые передают гены сопротивления между организмами [106].

Главной причиной широкого распространения устойчивости к антибиотикам сегодня является нерациональное применение антибиотиков человеком, к которому можно отнести: использование антибиотиков в медицинской практике чрезмерно часто; неправильное применение препаратов по причине отсутствия практики исследования профиля устойчивости возбудителя; широкое использование антибиотиков в сельском хозяйстве, включая их профилактическое применение и использование в качестве стимуляторов роста; применение стратегии постоянной разработки новых антибиотиков взамен старых, что провоцирует развитие устойчивости к новым препаратам; ошибки в регуляции и контроле распространения антибиотиков со стороны государства [126].

Механизмы устойчивости

Устойчивость антибиотикам может возникать различными способами. Устойчивость к фторхинолонам может быть достигнута тремя разными способами, которые могут использоваться одновременно и дополнять друг

друга или по отдельности. Эти пути включают: мутации в генах, отвечающих за сайт-мишень фторхинолонов (ДНК-гираза и топоизомераза IV) [59], сверхэкспрессию эффлюксных насосов для удаления молекул антибиотика за пределы клетки [39; 58] и защиту сайта-мишени фторхинолона с помощью белка Qnr [9; 87; 107].

Однако разные виды бактерий предпочитают определенные механизмы устойчивости. Например, у грамотрицательных бактерий преобладающим механизмом устойчивости к β -лактамам является продукция β -лактамаз, тогда как у грамположительных организмов устойчивость к этим соединениям в основном достигается путем модификации сайта-мишени пенициллин-связывающего белка (ПСБ).

Механизмы формирования устойчивости к антибиотикам можно разделить на несколько групп: модификации молекулы антибиотика, предотвращение попадания антибиотика к мишени, Устойчивость из-за глобальных адаптивных процессов, а также изменение и/или обход целевых сайтов.

Модификация молекулы антибиотика

Химические модификации молекулы антибиотика

Выработка ферментов, способных вносить химические изменения в молекулу антибиотика, является хорошо известным механизмом устойчивости, который встречается как у грамотрицательных, так и у грамположительных бактерий. Примером этого механизма может служить устойчивость к аминогликозидам.

Специальные ферменты микроорганизма модифицируют гидроксильные или аминогруппы молекулы аминогликозида. На сегодняшний день описано несколько подобных реакций, и они стали преобладающим механизмом устойчивости к аминогликозидам во всем мире [68]. Гены, кодирующие эти ферменты обычно содержатся в мобильных генетических элементах (МГЭ), но также были обнаружены как часть хромосомы [104].

Разрушение связей в молекуле антибиотика

Основной механизм устойчивости к β -лактамам основан на разрушении этих соединений под действием ферментов β -лактамаз. Эти ферменты разрушают амидную связь в β -лактамном кольце, так формируется устойчивость к β -лактамам у многих видов микроорганизмов. Зачастую гены, кодирующие β -лактамазы локализованы в плазмидах, что приводит к быстрому распространению устойчивости [25].

Предотвращение попадания соединения к мишени***Снижение проницаемости***

Многие антибактериальные вещества должны проникать через наружную и/или цитоплазматическую мембрану для проявления противомикробного действия. Бактерии имеют механизмы, предотвращающие проникновение антибактериального вещества к внутриклеточной или периплазматической мишени. В основном антибиотики попадают внутрь клетки через специальные белки – порины. Уменьшение захвата антибиотика из окружающей среды происходит именно за счет изменения поринов. Эти изменения могут быть достигнуты тремя основными способами: изменением типа экспрессируемых поринов; изменением уровня экспрессии поринов; нарушением функции поринов. Изменения проницаемости посредством любого из этих механизмов часто приводят к низкоуровневой устойчивости и часто связаны с другими механизмами, такими как повышенная экспрессия эффлюксных насосов [94]. Примером формирования устойчивости этим способом является продукция абберантного порина OprD в *P. aeruginosa*. Посредством данного порина обычно в клетку проникают аминокислоты и антибиотики, например, имипенем. Исследования *in vitro* показали, что изменения порина OprD могут вызывать устойчивость отдельно или в сочетании с гиперэкспрессией эффлюксного насоса и/или продукцией фермента, гидролизующего антибиотик, что приводит к высокому уровню устойчивости к карбапенемам [102].

Эффлюксные насосы

Сложные механизмы, способные выталкивать токсичное соединение из клетки характерны для большого количества разных видов микроорганизмов как грамотрицательных, так и грамположительных. Эффлюксные насосы могут быть как субстрат-специфичные (например, tet-определители для тетрациклина или mef-гены для макролидов), так и способные откачивать широкий спектр антибактериальных препаратов, что чаще всего наблюдается у бактерий с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ) [100].

Устойчивость из-за глобальных адаптивных процессов

Бактерии благодаря своей генетической пластичности способны быстро подстраиваться под изменяющуюся среду с помощью большого количества небольших изменений. Примером появления такого типа устойчивости являются штаммы *S. aureus* hVISA/VISA. Изоляты hVISA/VISA обычно появляются у пациентов с инфекцией MRSA, после длитель-

ного курса ванкомицина. Развитие hVISA/VISA не происходит в результате ГПГ. Фенотип, по-видимому, является результатом последовательных и упорядоченных генетических изменений, которые еще предстоит полностью изучить. Имеющиеся данные показывают, что регуляторные системы, наиболее часто вовлеченные в этот механизм устойчивости — это YycFG (WalKR), VraSR (гомолог LiaFSR) и GraRS [61; 62; 74]. Эти двух- и трехкомпонентные регуляторные системы определяют строение клеточной стенки, что подтверждает представление о том, что появление фенотипа hVISA/VISA включает перестройку клеточной стенки, что помогает бактериям выживать в присутствии ванкомицина. Помимо вышеупомянутых регуляторных систем, еще одним изменением, которое часто связывают с фенотипом hVISA/VISA, являются мутации в гене *groB*, кодирующем субъединицу РНК-полимеразы. Однако механизмы, с помощью которых мутация *groB* привела к устойчивости к ванкомицину не до конца изучены [128]. Фенотипически штаммы hVISA/VISA демонстрируют различные метаболические характеристики, которые могут включать: повышенное использование фруктозы; повышенный метаболизм жирных кислот; нарушение метаболизма ацетата и цикла трикарбоновых кислот; снижение доступности глутамата; повышенная экспрессия генов синтеза клеточной стенки. Эти глобальные гомеостатические изменения, по-видимому, приводят к снижению активности ванкомицина, в связи с утолщением клеточной стенки и увеличением количества свободного D-Ala-D-Ala дипептида, а также меньшим количеством перекрестных связей в пептидогликане [50; 60].

Изменения и/или обход целевых сайтов

Защита целевого сайта

Механизм защиты целевого сайта от присоединения к нему молекулы антибиотика довольно широко распространен среди микроорганизмов. Одним из классических и наиболее изученных примеров этого механизма являются детерминанты устойчивости к тетрациклинам Tet(M) и Tet(O). Tet(M) первоначально была описана в *Streptococcus spp.*, а Tet(O) в *Campylobacter jejuni*, но в настоящее время они широко распространены среди различных видов бактерий, вероятно, потому что они были обнаружены в плазмидах и транспозонах. Tet(M) и Tet(O) взаимодействуют с рибосомой и вытесняют тетрациклин из его сайта связывания [29]. Кроме того, взаимодействие с Tet(O) и Tet(M) изменяет конформацию рибосомы, предотвращая повторное попадание антибиотика к мишени [37; 78].

Мутации, обеспечивающие изменение целевого сайта

Мутации могут трансформировать целевой сайт так, чтобы молекула противомикробного препарата не могла к нему присоединиться. Примером может служить развитие устойчивости к рифампицину. Рифампицин блокирует процесс транскрипции путем ингибирования ДНК-зависимой РНК-полимеразы, которая состоит из нескольких субъединиц. Мишень рифампицина находится в β -субъединице РНК-полимеразы. После связывания антибиотика с целевым сайтом транскрипция прерывается [27]. Устойчивость к рифампицину главным образом возникает из-за одноэтапных точечных мутаций, приводящих к заменам аминокислот в гене *rpoB*. Несмотря на снижение сродства рифампицина к мишени, эти мутации обычно не влияют на активность полимеразы, что позволяет продолжать транскрипцию [46].

Ферментативное изменение целевого сайта

Ферменты могут модифицировать целевой сайт так, чтобы уменьшить его сродство к антибактериальному препарату. Примером устойчивости, возникающей путем ферментативной модификации сайта-мишени, является метилирование рибосомы с помощью фермента, закодированного геном *Erm*, что приводит к устойчивости к макролидам. Эти ферменты могут моно- или диметилировать остаток аденина в позиции A2058 домена V 23pРНК 50S-субъединицы рибосомы. Это изменение мешает связыванию антибиотиков с целевым сайтом. Экспрессия *Erm*-генов обеспечивает перекрестную устойчивость всем членам группы MLSb (макролиды, линкозамиды и стрептограмин В), так как эти антибиотики имеют перекрывающиеся сайты связывания в рРНК [75; 131].

Полная замена или обход целевого сайта

Бактерии способны создавать новые или изменять уже имеющиеся мишени антибиотиков так, что они будут выполнять сходные биохимические функции с исходной мишенью, но не будут подвержены воздействию антибиотика. Важным примером такой стратегии является устойчивость к ванкомицину. Гликопептиды, такие как ванкомицин и тейкопланин, уничтожают бактерии, ингибируя синтез клеточной стенки, аналогично β -лактамам. Однако, для препятствия образованию клеточной стенки они не взаимодействуют напрямую с ПСБ, а связываются с D-Ala-D-Ala пентапептидной части пептидогликана и предотвращают его перекрестную сшивку, что приводит к гибели бактерий [105]. Устойчивость к ванкомицину у энтерококков связана с кластерами *van*-генов (*van* от ванкомицин), которые заменяют последний D-Ala на D-лактат (устойчивость высокого уровня) или D-серин (устойчивость низкого уровня) [90].

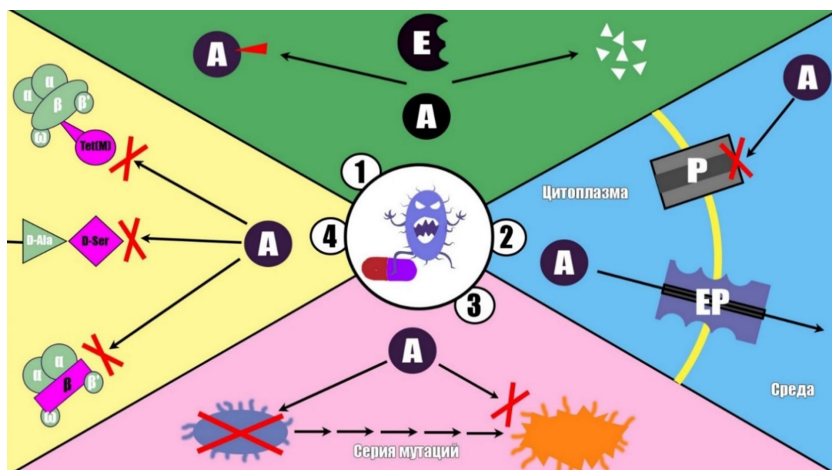


Рис. 2. Механизмы устойчивости. 1 - модификация молекулы антибиотика, А – антибиотик, Е - фермент; 2 - Предотвращение попадания соединения к мишени, Р – порин, EP – эффлюксный насос; 3 - Устойчивость из-за глобальных адаптивных процессов; 4 - изменения и/или обход целевых сайтов.

Скорость возникновения устойчивости

Антибиотики были в первый раз использованы для лечения серьезных инфекций в 1940-х годах, первым широко применяемым антибиотиком был пенициллин, β -лактамный антибиотик. Хотя ещё в 1940 году, до введения пенициллина в медицинскую практику были обнаружены ферменты β -лактамазы. Пенициллин успешно справлялся с бактериальными инфекциями у военнослужащих времен Второй мировой войны. Но к нему со временем сформировалась устойчивость. Появилась необходимость постоянно разрабатывать новые антибиотики. К сожалению, почти ко всем из них появилась устойчивость [17]. Видно, что во последние 20 лет устойчивость к новым препаратам развивается в течение примерно 1 года, в то время как в XX веке антибиотик мог оставаться эффективным около 10 лет.

Скорость развития устойчивости *in vitro* в модели *E. coli* крайне быстра. При обработке тремя антибиотиками: хлорамфениколом, доксициклином и триметопримом, полулетальная концентрация увеличилась в ~870 (за 25 дней), ~10 (за 25 дней) и ~1680 (за 20 дней) раз соответственно [122].

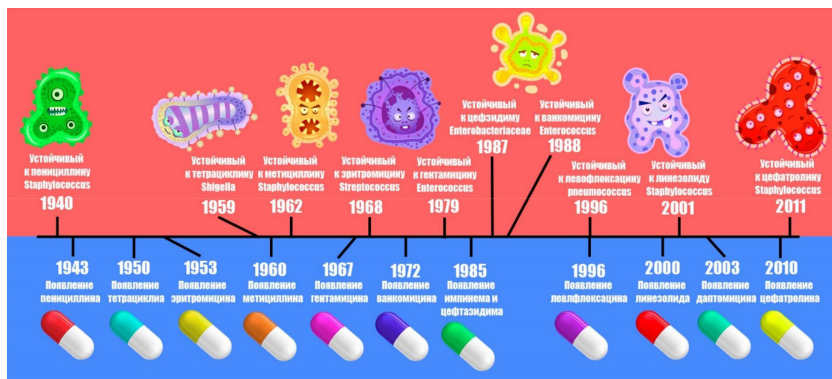


Рис. 3. Год появления антибиотика и устойчивого к нему микроорганизма

Распространение устойчивости

В сельском хозяйстве

Сегодня антибиотики должны применяться исключительно в терапевтических дозах и только для лечения инфекций домашнего скота, однако ранее их также применяли профилактически, для предотвращения заболеваний. И что более важно, субтерапевтические дозы давались скоту в течение длительных периодов времени качестве кормовых добавок для стимуляции роста [14]. Кормление домашнего скота антибиотиками в течение длительного срока создает селективный отбор в пользу устойчивых микроорганизмов. Устойчивые бактерии могут заражать работников мясной промышленности. Изоляты *S. aureus*, найденные у сотрудников свиноводни, были устойчивы к широкому спектру антибиотиков [93]. Загрязнение продуктов животного происхождения устойчивыми к противомикробным препаратам бактериями распространяется по всей цепочке поставок продуктов [71; 92]. Даже если для уничтожения бактерий применяются какие-либо методы обработки продуктов, мертвые клетки могут оставаться неповрежденными или подвергаться лизису, высвобождая гены устойчивости к антибиотикам (ГУА) [127]. Последующее распространение устойчивых бактерий и/или ГУА может происходить на кухне во время приготовления или при употреблении пищи [31].

Распространению устойчивости также способствует использование антибиотиков для защиты растений от инфекций [72]. Применение антибиотиков в растениеводстве может привести к возникновению бактерий, устойчивых антибиотикам, которые будут распространяться через расти-

тельные продукты. Кроме того, комбинированное использование антибиотиков и биопестицидов, состоящих из видов бактерий, отобранных на основе их способности производить антибиотики и выживать в присутствии антибиотиков, а также колонизировать растения, представляет еще одну серьезную угрозу [28; 35; 66].

Аквакультура является самым быстрорастущим сектором производства продуктов питания, составляющим 47% мирового производства рыбы (80 миллионов тонн), стоимость сектора на 2018 год оценивается в 231,6 миллиарда долларов США [121]. Рост этого сектора экономики выгоден для производства продуктов питания для растущего населения мира, однако вызывает тревогу факт, что антибиотики часто используются для профилактики и без государственного регулирования в странах, являющихся крупнейшими производителями рыбы [92]. Одним из методов “профилактики” является применение антибиотиков с кормом в открытых бассейнах для выращивания рыбы, что позволяет антибиотикам попадать в окружающую среду и отложения, особенно при отсутствии систем очистки [26]. Отходы аквакультуры также используются в качестве удобрения для сельского хозяйства на суше, что представляет еще одну угрозу распространения устойчивых бактерий и/или их генов [129]. Рыбы и моллюски могут быть переносчиками бактерий, устойчивых к клинически важным классам антибиотиков, включая тетрациклины, β -лактамы, аминогликозиды и хинолоны, что приводит к распространению ГУА по всей цепи поставок [49; 56; 109; 112].

В воде

Неметаболизированные антибиотики в сточных водах попадают на очистные сооружения, где удаление антибиотиков может быть неполным, что в итоге приводит к попаданию антибиотиков в природные водоемы [116]. Концентрация антибиотиков на поверхности воды может составлять доли микрограмма на литр [44; 73]. В результате бактерии, находящиеся в этих водоемах, вынуждены приобретать устойчивость к антибиотикам, чтобы выжить. Следовательно, существует возможность появления и распространения ГУА через городские и естественные водные системы [45]. Вклад сточных вод в распространении ГУА довольно значительный [99]. Поскольку большая часть очистных сооружений не предназначены для полного удаления загрязняющих веществ антибиотики попадают в естественные водоемы, а также из очистных сооружений используются в качестве удобрений [48]. ГУА можно также найти как в прудах для содержания скота [133], так и в пробах воды, собранных по всему Тихо-

му океану [53]. Исследования в Антарктике выявили важные сведения о распространении ГУА в водной среде с минимальным воздействием человека [69; 103].

В почве

Антибиотики, применяемые в сельском хозяйстве и антибиотики, содержащиеся в сточных водах, используемых для орошения, могут накапливаться в почве [32; 81; 82], по этой причине у почвенных бактерий обнаруживают ГУА [47]. Обнаружение почвенных бактерий с МЛУ позволяет предположить, что почва может быть резервуаром для передачи ГУА, что способствует увеличению уровня патогенных бактерий [30], так как ГУА могут передаваться между непатогенными почвенными бактериями и патогенными бактериями такими как *Acinetobacter baylyi* и *E. coli* [47; 80].

В медицинских учреждениях

Больницы являются идеальным местом для появления бактерий с антибиотикорезистентностью из-за относительно высокой плотности пациентов с бактериальными инфекциями и широкого использования противомикробных средств. Неудивительно, что часто обнаруживается присутствие устойчивых штаммов бактерий в больницах и их системах водоснабжения [38; 63; 130]. Обилие ГУА в больницах значительно повышает риск распространения устойчивых форм бактерий. Описан конъюгативный перенос плазмиды устойчивости к мупироцину между *Staphylococcus epidermidis* и MRSA [64]. В другом исследовании удалось показать вероятный перенос плазмиды между *E. coli* и *K. pneumoniae* у пациента, и та же самая плазида, вероятно, была передана ещё одному пациенту [42]. По этой причине в больницах обычной практикой является постоянное проведение исследований устойчивости к антибиотикам путем выделения и анализа отдельных клинических изолятов.

Посредством животных

Животные также могут способствовать распространению ГУА среди бактерий, присутствующих в их микробиомах. Эта возможность была экспериментально продемонстрирована на тараканах, которые тесно связаны с человеком. Они обитают всюду, где есть люди, включая дома, фермы и больницы [11]. Детальный анализ микробиома *Blattella germanica* показали наличие большого количества МГЭ и ГУА [36]. Также было описано, что тараканы, отловленные в медицинских учреждениях, имеют в своем кишечнике множество патогенных бактерий, циркулирующих в данных учреждениях [88]. Другие животные, сосуществующие с людьми, такие как крысы или мухи также могут способствовать горизонтальному пере-

носу ГУА. Анализ микробиома *Rattus norvegicus*, пойманной в больнице, показал наличие большого количества генов устойчивости к ванкомицину, связанных с транспозоном Tn1549, по сравнению с другими средами [52]. Более того, существуют исследования, показывающие, что ГУА могут эффективно передаваться внутри микробиома крыс и мух, живущих рядом с человеком [8; 67]. Все эти результаты подтверждают, что животные могут участвовать в распространении ГУА через ГПП среди различных бактерий, которые впоследствии могут распространяться среди других хозяев.

Мигрирующие животные такие как чайки могут также способствовать распространению ГУА [132]. Различные исследования показали, что микробиомы диких птиц часто содержат патогенные микроорганизмы [98; 117]. Даже в образцах, полученных при исследовании арктических птиц, то есть из мест с низким загрязнением антибиотиками и малым количеством людей, были обнаружены ГУА [113]. Недавний анализ, основанный на сочетании биологических, фенотипических, генотипических подходов и спутниковой телеметрии для отслеживания перемещений чаек, также показал, что эти птицы могут переносить ГУА из антропогенных источников между континентами [6]. Среди водных животных на большие расстояния перемещаются морские черепахи. Они могут выступать в качестве переносчиков для распространения ГУА в водных экосистемах. ГУА были обнаружены в черепахах *Caretta caretta* из Средиземного моря [10; 124].

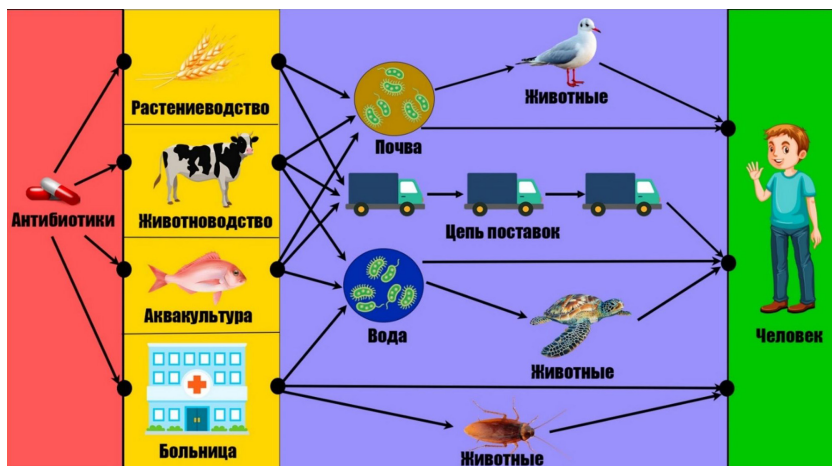


Рис. 4. Общая схема появления и распространения генов устойчивости

Последствия устойчивости для микроорганизмов

Приобретение устойчивости к противомикробным препаратам требует от микроорганизмов дополнительных метаболических затрат, обоснование этой гипотезы исходит из анализа механизмов устойчивости [16; 21]. В зависимости от пути приобретения устойчивости посредством мутаций или ГПГ влияние на физиологию бактерий отличается. В случае ГПГ устойчивый штамм должен получать дополнительную нагрузку, так как для репликации, транскрипции и трансляции приобретенного МГЭ требуются ресурсы [19]. В случае устойчивости, вызванной мутациями, нагрузка возникает из-за физиологической значимости генов, в которых эти мутации происходят [84]. Различные исследования подтвердили, что приобретение устойчивости к противомикробным препаратам связано с повышенной метаболической нагрузкой [33; 51; 79; 89; 110; 115; 118]. Таким образом, если устойчивость требует от организмов дополнительных затрат, связанных с её приобретением, то в среде, без противомикробных препаратов, наличие устойчивости создает дополнительную метаболическую нагрузку для организма, следовательно, микроорганизмы, обладающие генами устойчивости, будут вытеснены чувствительными микроорганизмами, у которых дополнительная нагрузка отсутствует. Теоретически стратегии циклического применения антибиотиков могут помочь решить проблему устойчивости [13]. Однако циклические стратегии оказываются не столь эффективными, как можно было бы ожидать [70]. Кроме того, устойчивые к антибиотикам организмы можно найти почти в любой экосистеме, несмотря на то что устойчивость к антибиотикам может приводить к дополнительной метаболической нагрузке, эти затраты не так существенно влияют на физиологию бактерий [20; 85]. В действительности при возникновении устойчивости шансы на ее исчезновение довольно малы [12; 15; 119]. Существуют различные механизмы, которые снижают затраты, связанные с устойчивостью, и позволяют сохранить ГУА [16; 76; 77]. Однако также бывают случаи, когда наличие устойчивости создает дополнительную уязвимость, связанную с побочной чувствительностью. Например, у *E. coli* устойчивость к гентамицину повышает чувствительность к цефуроксиму, а устойчивость к цефуроксиму повышает чувствительность к гентамицину, что открывает возможность для последовательного использования этих антибиотиков [65].

Компенсации, связанные с мутациями

Некоторые мутации, дающие устойчивость к антибиотикам, не требуют дополнительных метаболических затрат. Например, замена K42R в 30S

рибосомном белке S12 в *S. Typhimurium*, *Escherichia coli* и *Mycobacterium tuberculosis*, обеспечивает устойчивость к стрептомицину без заметных затрат [13].

В некоторых случаях обнаруживается, что мутации, связанные с приобретением устойчивости, даже улучшают приспособленность бактерий [40]. Например, устойчивость к карбапенемам благодаря мутации в гене *oprD* в *P. aeruginosa*, по-видимому, делает бактерии более эффективными в колонизации слизистых оболочек и диссеминации в селезенку [114].

Дополнительные мутации могут нивелировать затраты, связанные с устойчивостью. Для этого существует несколько способов: замена мутантного белка, которые больше не способен выполнять свою функцию; уменьшение потребности в той функции, которую выполнял мутантный белок; восстановление активности белка [13]. Например, *S. typhimurium* с мутацией в гене *grsL*, кодирующем один из рибосомальных белков, компенсируется мутациями в *grsD/E*, что позволяет сохранить скорость и эффективность трансляции [22; 23].

Одним из важных аспектов компенсаторных мутаций является то, что компенсация может быть вызвана за счет другой мутации, приводящей к устойчивости. Примером такой компенсации является мутация, обеспечивающая устойчивость к рифампицину. Данная мутация компенсирует затраты на мутацию в гене *grsL* K88E, которая придает устойчивость к стрептомицину. Причем нет необходимости обрабатывать популяцию рифампицином. Это означает, что следует избегать применения рифампицина для лечения у пациентов, инфицированных бактериями, которые устойчивыми стрептомицину благодаря мутации в гене *grsL* K88E [123].

Компенсации, связанные приобретением МГЭ

Одним из способов компенсации приобретения устойчивости по посредством МГЭ является интеграция в плазмиду, несущую ГУА, генов, улучшающих приспособленность, что позволяет сохранить данную плазмиду в популяции бактерий. Например, плазида p9123, несущая гены устойчивости *sul2*, *strA* и *strB*, помимо придания устойчивости к сульфониламидам и стрептомицину, также улучшает приспособленность *E. coli* K12 JM109 по сравнению с исходным штаммом [41]. Такое явление может объяснять сохранение этой плазмиды среди популяции *E. coli* и, как следствие, сохранение устойчивости к сульфониламидам, даже при отсутствии антибиотиков.

Затраты на приобретение зависят от конкретных комбинаций плазмиды и хозяина. Например, затраты на приобретение плазмид pG12-KPC-2

и pG06-VIM-1 в *E. coli* и *Enterobacteriaceae* низкие в случае приобретения этих плазмид комменсальными штаммами человека и животных, что может способствовать их быстрому распространению [34].

Также гены устойчивости часто группируются в одном МГЭ, что позволяет снизить затраты. Примером могут служить плазмиды, несущие гены β -лактамазы расширенного спектра (БЛРС), которые зачастую содержат как гены устойчивости к β -лактамам, так и гены устойчивости к фторхинолонам, аминогликозидам или тетрациклинам [91; 120; 125].

Для компенсации затрат на приспособленность, связанных с приобретением МГЭ, также могут появляться хромосомные мутации. Например, в случае у плазмиды pBR322, содержащей ген устойчивости к тетрациклину, компенсацию затрат на приспособленность обеспечивает хромосомная мутация в системе Trk, функция которой заключается в транспорте ионов K^+ [57].-

Другие механизмы поддержания устойчивости

Помимо вторичных мутаций, компенсация также может быть достигнута за счет амплификации генов. Одним из примеров является *S. enterica* с устойчивостью к актиноину. Актинин является ингибитором пептид деформилазы, и устойчивость достигается за счет мутаций в любом из двух генов, кодирующих ферменты, необходимые для формилирования метионильной инициаторной тРНК: folD и fnt [95]. Компенсация же достигается за счет амплификации (от 5 до 40 копий) metZ и metW генов (которые кодируют метионил-тРНК). Как следствие, метионил-тРНК вырабатывается в избытке, что позволяет бактериям осуществлять синтез белка с использованием неформилированной метионил-тРНК [111]. В результате эта амплификация восстанавливает активность устойчивых мутантов до уровней, сходных с таковыми у восприимчивых штаммов дикого типа.

Изменение метаболизма устойчивых штаммов также может снизить затраты, даже без необходимости вторичных мутаций. Этот вид метаболической компенсации описан для *P. aeruginosa*, которые экспрессируют эффлюксный насос MexEF-OprN. Устойчивый штамм демонстрирует множество изменений в своей физиологии, но не проявляет дефектов роста при выращивании в богатой питательными веществами среде и в аэробных условиях [97]. Важно подчеркнуть, что мутанты с экспрессией MexEF-OprN не имеют определяемых затрат на приспособленность в аэробных условиях, их приспособленность сильно ухудшается, когда бактерии выращивают в анаэробных условиях [96], что еще раз подтверждает, что затраты на приспособление зависят от среды обитания.

Последним механизмом, используемым для сохранения генов устойчивости, является наличие в плазмиде генов ТА-системы [54; 55]. Такие системы состоят из токсина, подавляющего рост бактерий, и антитоксина, который препятствует его действию, но менее стабилен, чем токсин. При наличии плазмиды с ТА-системой, и токсин, и антитоксин продуцируются, что поддерживает равновесие токсина-антитоксина. Однако, если плазмида во время клеточного деления попадает лишь в одну клетку, то клетка без плазмиды все еще содержит свободный токсин, но не продуцирует антитоксин и, следовательно, погибает. Таким образом, наличие ТА-системы обеспечивают сохранение плазмиды в популяции, уничтожая клетки, которые потеряли плазмиду во время деления [24; 108].

Способы предотвращения появления и распространения устойчивости к антибиотикам

Согласно “Глобальному плану действий по борьбе с устойчивостью к противомикробным препаратам” изданному ВОЗ в 2015 году предлагаются конкретные стратегические задачи, включающие:

1. Повышение уровня знаний об устойчивости к противомикробным препаратам у населения: проведение образовательных и информационных кампаний для увеличения осведомленности о проблеме лекарственной устойчивости и ее последствиях для здоровья человека. Также обучение медицинского персонала и пациентов корректному использованию антибиотиков.
2. Улучшение мониторинга и сбора данных: создание и расширение систем мониторинга устойчивости к противомикробным препаратам, а также создание базы данных для сбора и анализа информации.
3. Развитие альтернативных методов лечения: разработка новых противомикробных препаратов и вакцин, а также поощрение исследований в области нетрадиционных подходов к лечению инфекций.
4. Улучшение в области правильного использования антибиотиков: контроль над применением и распространением антибиотиков для наиболее рационального их использования.
5. Повышение финансирования и сотрудничества: поддержка финансирования исследований и разработок новых противомикробных препаратов, а также сотрудничество между странами и регионами для обмена информацией и опытом.

Глобальный план действий по борьбе с устойчивостью к противомикробным препаратам призывает страны-члены разрабатывать и внедрять

свои национальные стратегии и планы действий, а также активно участвовать в международных усилиях для совместного решения проблемы устойчивости к противомикробным препаратам. Этот план ориентирован на долгосрочное сотрудничество и координацию с целью обеспечения эффективного лечения инфекций в будущем [2].

Заключение

Устойчивость к противомикробным препаратам – это сложное, комплексное явление, что в совокупности с крайне высокой скоростью появления и распространения делают его реальной угрозой мирового масштаба. Для решения этой проблемы необходима кооперация общества на всех уровнях, а также поиск альтернативных методов борьбы с бактериальными инфекциями, которые заменят стратегию разработки новых препаратов взамен неэффективных. Необходимо привлечь внимание государства, бизнеса и научного сообщества к решению данной проблемы, так как с течением времени она будет только усугубляться, поэтому действовать нужно уже сейчас.

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

Информация о спонсорстве. Работа не имела спонсорской поддержки, авторы не получали гонорар за исследование.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список литературы / References

1. Всемирная организация здравоохранения. (2014). *Глобальная стратегия ВОЗ по сдерживанию устойчивости к противомикробным препаратам* (World Health Organization. (2014). *WHO global strategy for containment of antimicrobial resistance*). Получено из <https://iris.who.int/handle/10665/91617?locale-attribute=ru&>
2. Всемирная организация здравоохранения. (2015). *Глобальный план действий по борьбе с устойчивостью к противомикробным препаратам* (World Health Organization. (2015). *Global action plan on antimicrobial resistance*). Получено из <https://www.who.int/ru/publications/i/item/9789241509763>

3. Национальная ассоциация специалистов по контролю инфекций (НАСКИ). *Программа СКАТ (Стратегия Контроля Антимикробной Терапии) при оказании стационарной медицинской помощи* (National Association of Infection Control Specialists (NASCI). *SCAT Program (Antimicrobial Therapy Control Strategy) in hospital care*). Получено из <https://nasci.ru/?id=4236>
4. Правительство Российской Федерации. (2017). Распоряжение № 2045-р от 3 октября 2017 г. *Об утверждении Стратегии предупреждения распространения антимикробной резистентности* (Government of the Russian Federation. (2017). *Order No. 2045-r dated October 3, 2017. On approval of the Strategy for preventing the spread of antimicrobial resistance*).
5. *Химическая энциклопедия* (Том 4). (1995). Под ред. Н. С. Зефирова. Москва: Большая Российская энциклопедия. 639 с. (*Chemical Encyclopedia* (Vol. 4). (1995). Ed. by N. S. Zefirov. Moscow: Great Russian Encyclopedia. 639 p.)
6. Ahlstrom, C. A., van Toor, M. L., Woksepp, H., Chandler, J. C., Reed, J. A., Reeves, A. B., Waldenström, J., Franklin, A. B., Douglas, D. C., Bonnedahl, J., & Ramey, A. M. (2021). Evidence for continental-scale dispersal of antimicrobial resistant bacteria by landfill-foraging gulls. *The Science of the Total Environment*, 764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144551> EDN: <https://elibrary.ru/rsowgv>
7. Ahmad, M., & Khan, A. U. (2019). Global economic impact of antibiotic resistance: A review. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 19, 313-316. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2019.05.024>
8. Akhtar, M., Hirt, H., & Zurek, L. (2009). Horizontal transfer of the tetracycline resistance gene tetM mediated by pCF10 among *Enterococcus faecalis* in the house fly (*Musca domestica* L.) alimentary canal. *Microbial Ecology*, 58(3), 509-518. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9533-9>. EDN: <https://elibrary.ru/qynlsu>
9. Aldred, K. J., Kerns, R. J., & Osheroff, N. (2014). Mechanism of quinolone action and resistance. *Biochemistry*, 53(10), 1565-1574. <https://doi.org/10.1021/bi5000564>
10. Alduina, R., Gambino, D., Presentato, A., Gentile, A., Sucato, A., Savoca, D., Filippello, S., Visconti, G., Caracappa, G., Vicari, D., & Arculeo, M. (2020). Is Caretta Caretta a Carrier of Antibiotic Resistance in the Mediterranean Sea? *Antibiotics* (Basel, Switzerland), 9(3). <https://doi.org/10.3390/antibiotics9030116>. EDN: <https://elibrary.ru/ldlkjc>
11. Anacarso, I., Iseppi, R., Sabia, C., Messi, P., Condò, C., Bondi, M., & de Niederhäusern, S. (2016). Conjugation-Mediated Transfer of Antibiotic-Resistance Plasmids Between Enterobacteriaceae in the Digestive Tract of *Blaberus*

- craniifer (Blattodea: Blaberidae). *Journal of Medical Entomology*, 53(3), 591-597. <https://doi.org/10.1093/jme/tjw005>
12. Andersson, D. I. (2003). Persistence of antibiotic resistant bacteria. *Current Opinion in Microbiology*, 6(5), 452-456. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2003.09.001>
 13. Andersson, D. I., & Hughes, D. (2010). Antibiotic resistance and its cost: is it possible to reverse resistance? *Nature Reviews. Microbiology*, 8(4), 260-271. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2319>
 14. Andersson, D. I., & Hughes, D. (2014). Microbiological effects of sublethal levels of antibiotics. *Nature Reviews. Microbiology*, 12(7), 465-478. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3270>
 15. Andersson, D. I., & Hughes, D. (2011). Persistence of antibiotic resistance in bacterial populations. *FEMS Microbiology Reviews*, 35(5), 901-911. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00289.x>
 16. Andersson, D. I., & Levin, B. R. (1999). The biological cost of antibiotic resistance. *Current Opinion in Microbiology*, 2(5), 489-493. [https://doi.org/10.1016/s1369-5274\(99\)00005-3](https://doi.org/10.1016/s1369-5274(99)00005-3)
 17. Antibiotic resistance threats in the United States, 2013. *Centers for Disease Control and Prevention*. URL: <https://www.cdc.gov/drugresistance/pdf/ar-threats-2013-508.pdf> (дата обращения: 17.03.24).
 18. Antimicrobial resistance. *World Health Organization*. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance> (дата обращения: 17.03.24).
 19. Baquero, F., Alvarez-Ortega, C., & Martinez, J. L. (2009). Ecology and evolution of antibiotic resistance. *Environmental microbiology reports*, 1(6), 469-476. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00053.x>
 20. Berendonk, T. U., Manaia, C. M., Merlin, C., Fatta-Kassinos, D., Cytryn, E., Walsh, F., Bürgmann, H., Sørum, H., Norström, M., Pons, M. N., Kreuzinger, N., Huovinen, P., Stefani, S., Schwartz, T., Kisand, V., Baquero, F., & Martinez, J. L. (2015). Tackling antibiotic resistance: the environmental framework. *Nature reviews. Microbiology*, 13(5), 310-317. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3439>
 21. Björkman, J., & Andersson, D. I. (2000). The cost of antibiotic resistance from a bacterial perspective. *Drug resistance updates: reviews and commentaries in antimicrobial and anticancer chemotherapy*, 3(4), 237-245. <https://doi.org/10.1054/drup.2000.0147>
 22. Björkman, J., Hughes, D., & Andersson, D. I. (1998). Virulence of antibiotic-resistant *Salmonella typhimurium*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(7), 3949-3953. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.7.3949>

23. Björkman, J., Samuelsson, P., Andersson, D. I., & Hughes, D. (1999). Novel ribosomal mutations affecting translational accuracy, antibiotic resistance and virulence of *Salmonella typhimurium*. *Molecular microbiology*, 31(1), 53-58. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1999.01142.x>
24. Boss, L., Labudda, Ł., Węgrzyn, G., Hayes, F., & Kędzierska, B. (2013). The axe-txe complex of *Enterococcus faecium* presents a multilayered mode of toxin-antitoxin gene expression regulation. *PloS one*, 8(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073569>
25. Bush, K. (2013). Proliferation and significance of clinically relevant β -lactamases. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1277, 84-90. <https://doi.org/10.1111/nyas.12023>
26. Cabello, F. C., Godfrey, H. P., Buschmann, A. H., & Dölz, H. J. (2016). Aquaculture as yet another environmental gateway to the development and globalisation of antimicrobial resistance. *The Lancet. Infectious diseases*, 16(7). [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(16\)00100-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)00100-6)
27. Campbell, E. A., Korzheva, N., Mustaev, A., Murakami, K., Nair, S., Goldfarb, A., & Darst, S. A. (2001). Structural mechanism for rifampicin inhibition of bacterial RNA polymerase. *Cell*, 104(6), 901-912. [https://doi.org/10.1016/s0092-8674\(01\)00286-0](https://doi.org/10.1016/s0092-8674(01)00286-0). EDN: <https://elibrary.ru/lzjgvr>
28. Chen, X. H., Koumoutsis, A., Scholz, R., & Borriss, R. (2009). More than anticipated - production of antibiotics and other secondary metabolites by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 16(1-2), 14-24. <https://doi.org/10.1159/000142891>
29. Connell, S. R., Tracz, D. M., Nierhaus, K. H., & Taylor, D. E. (2003). Ribosomal protection proteins and their mechanism of tetracycline resistance. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 47(12), 3675-3681. <https://doi.org/10.1128/AAC.47.12.3675-3681.2003>. EDN: <https://elibrary.ru/lvmgoz>
30. Dantas, G., Sommer, M. O., Oluwasegun, R. D., & Church, G. M. (2008). Bacteria subsisting on antibiotics. *Science*, 320(5872), 100-103. <https://doi.org/10.1126/science.1155157>
31. Davis, G. S., & Price, L. B. (2016). Recent Research Examining Links Among *Klebsiella pneumoniae* from Food, Food Animals, and Human Extraintestinal Infections. *Current Environmental Health Reports*, 3(2), 128-135. <https://doi.org/10.1007/s40572-016-0089-9>. EDN: <https://elibrary.ru/lhyozr>
32. D'Costa, V. M., McGrann, K. M., Hughes, D. W., & Wright, G. D. (2006). Sampling the antibiotic resistome. *Science*, 311(5759), 374-377. <https://doi.org/10.1126/science.1120800>
33. Deris, J. B., Kim, M., Zhang, Z., Okano, H., Hermesen, R., Groisman, A., & Hwa, T. (2013). The innate growth bistability and fitness landscapes of

- antibiotic-resistant bacteria. *Science*, 342(6162). <https://doi.org/10.1126/science.1237435>
34. Di Luca, M. C., Sørum, V., Starikova, I., Kloos, J., Hülter, N., Naseer, U., Johnsen, P. J. (2017). Low biological cost of carbapenemase-encoding plasmids following transfer from *Klebsiella pneumoniae* to *Escherichia coli*. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 72(1), 85-89. <https://doi.org/10.1093/jac/dkw350>
 35. Dimopoulou, A., Theologidis, I., Liebmann, B., Kalantidis, K., Vassilakos, N., & Skandalis, N. (2019). *Bacillus amyloliquefaciens* MBI600 differentially induces tomato defense signaling pathways depending on plant part and dose of application. *Scientific reports*, 9(1), 19120. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55645-2>. EDN: <https://elibrary.ru/kleyug>
 36. Domínguez-Santos, R., Pérez-Cobas, A. E., Cuti, P., Pérez-Brocal, V., García-Ferris, C., Moya, A., Latorre, A., & Gil, R. (2021). Interkingdom Gut Microbiome and Resistome of the Cockroach *Blattella germanica*. *mSystems*, 6(3). <https://doi.org/10.1128/mSystems.01213-20>. EDN: <https://elibrary.ru/hgwtvu>
 37. Dönhöfer, A., Franckenberg, S., Wickles, S., Berninghausen, O., Beckmann, R., & Wilson, D. N. (2012). Structural basis for TetM-mediated tetracycline resistance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(42), 16900-16905. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208037109>
 38. D'Souza, A. W., Potter, R. F., Wallace, M., Shupe, A., Patel, S., Sun, X., Gul, D., Kwon, J. H., Andleeb, S., Burnham, C. D., & Dantas, G. (2019). Spatiotemporal dynamics of multidrug resistant bacteria on intensive care unit surfaces. *Nature communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12563-1>. EDN: <https://elibrary.ru/wiuwrb>
 39. Du, D., Wang, Z., James, N. R., Voss, J. E., Klimont, E., Ohene-Agyei, T., Venter, H., Chiu, W., & Luisi, B. F. (2014). Structure of the AcrAB-TolC multidrug efflux pump. *Nature*, 509(7501), 512-515. <https://doi.org/10.1038/nature13205>
 40. Durão, P., Trindade, S., Sousa, A., & Gordo, I. (2015). Multiple Resistance at No Cost: Rifampicin and Streptomycin a Dangerous Liaison in the Spread of Antibiotic Resistance. *Molecular biology and evolution*, 32(10), 2675-2680. <https://doi.org/10.1093/molbev/msv143>
 41. Enne, V. I., Bennett, P. M., Livermore, D. M., & Hall, L. M. (2004). Enhancement of host fitness by the sul2-coding plasmid p9123 in the absence of selective pressure. *The Journal of antimicrobial chemotherapy*, 53(6), 958-963. <https://doi.org/10.1093/jac/dkh217>. EDN: <https://elibrary.ru/iqoguz>
 42. Evans, D. R., Griffith, M. P., Sundermann, A. J., Shutt, K. A., Saul, M. I., Mustapha, M. M., Marsh, J. W., Cooper, V. S., Harrison, L. H., & Van Tyne, D. (2020). Systematic detection of horizontal gene transfer across genera among

- multidrug-resistant bacteria in a single hospital. *eLife*, 9. <https://doi.org/10.7554/eLife.53886>. EDN: <https://elibrary.ru/sjulsh>
43. Fajardo, A., Linares, J. F., & Martínez, J. L. (2009). Towards an ecological approach to antibiotics and antibiotic resistance genes. *Clinical microbiology and infection: the official publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 15, 14-16. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2008.02688.x>
44. Faleye, A. C., Adegoke, A. A., Ramluckan, K., Fick, J., Bux, F., & Stenström, T. A. (2019). Concentration and reduction of antibiotic residues in selected wastewater treatment plants and receiving waterbodies in Durban, South Africa. *The Science of the total environment*, 678, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.410>
45. Felis, E., Kalka, J., Sochacki, A., Kowalska, K., Bajkacz, S., Harnisz, M., & Korzeniewska, E. (2020). Antimicrobial pharmaceuticals in the aquatic environment - occurrence and environmental implications. *European journal of pharmacology*, 866. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2019.172813>. EDN: <https://elibrary.ru/hfhpaq>
46. Floss, H. G., & Yu, T. W. (2005). Rifamycin-mode of action, resistance, and biosynthesis. *Chemical reviews*, 105(2), 621-632. <https://doi.org/10.1021/cr030112j>. EDN: <https://elibrary.ru/lzjigz>
47. Forsberg, K. J., Reyes, A., Wang, B., Selleck, E. M., Sommer, M. O., & Dantas, G. (2012). The Shared Antibiotic Resistome of Soil Bacteria and Human Pathogens. *Science (New York, N.Y.)*, 337(6098), 1107-1111. <https://doi.org/10.1126/science.1220761>
48. Franklin, A. M., Williams, C. F., & Watson, J. E. (2018). Assessment of Soil to Mitigate Antibiotics in the Environment Due to Release of Wastewater Treatment Plant Effluent. *Journal of environmental quality*, 47(6), 1347-1355. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.02.0076>
49. Furushita, M., Shiba, T., Maeda, T., Yahata, M., Kaneoka, A., Takahashi, Y., Torii, K., Hasegawa, T., & Ohta, M. (2003). Similarity of tetracycline resistance genes isolated from fish farm bacteria to those from clinical isolates. *Applied and environmental microbiology*, 69(9), 5336-5342. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.9.5336-5342.2003>. EDN: <https://elibrary.ru/xoolzh>
50. Gardete, S., & Tomasz, A. (2014). Mechanisms of vancomycin resistance in *Staphylococcus aureus*. *The Journal of clinical investigation*, 124(7), 2836-2840. <https://doi.org/10.1172/JCI68834>
51. Hall, A. R., Iles, J. C., & MacLean, R. C. (2011). The fitness cost of rifampicin resistance in *Pseudomonas aeruginosa* depends on demand for RNA polymerase.

- Genetics*, 187(3), 817-822. <https://doi.org/10.1534/genetics.110.124628>. EDN: <https://elibrary.ru/okrbed>
52. Hansen, T. A., Joshi, T., Larsen, A. R., Andersen, P. S., Harms, K., Mollerup, S., Willerslev, E., Fuursted, K., Nielsen, L. P., & Hansen, A. J. (2016). Vancomycin gene selection in the microbiome of urban *Rattus norvegicus* from hospital environment. *Evolution, medicine, and public health*, 2016(1), 219-226. <https://doi.org/10.1093/emph/eow021>
53. Hatosy, S. M., & Martiny, A. C. (2015). The ocean as a global reservoir of antibiotic resistance genes. *Applied and environmental microbiology*, 81(21), 7593-7599. <https://doi.org/10.1128/AEM.00736-15>
54. Hayes, F. (2003). Toxins-antitoxins: plasmid maintenance, programmed cell death, and cell cycle arrest. *Science (New York, N.Y.)*, 301(5639), 1496-1499. <https://doi.org/10.1126/science.1088157>. EDN: <https://elibrary.ru/mbiiyb>
55. Hayes, F., & Van Melderden, L. (2011). Toxins-antitoxins: diversity, evolution and function. *Critical reviews in biochemistry and molecular biology*, 46(5), 386-408. <https://doi.org/10.3109/10409238.2011.600437>. EDN: <https://elibrary.ru/phtfml>
56. He, Y., Jin, L., Sun, F., Hu, Q., & Chen, L. (2016). Antibiotic and heavy-metal resistance of *Vibrio parahaemolyticus* isolated from fresh shrimps in Shanghai fish markets, China. *Environmental science and pollution research international*, 23(15), 15033-15040. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6614-4>. EDN: <https://elibrary.ru/nxrurq>
57. Hellweger, F. L. (2013). *Escherichia coli* adapts to tetracycline resistance plasmid (pBR322) by mutating endogenous potassium transport: in silico hypothesis testing. *FEMS microbiology ecology*, 83(3), 622-631. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12019>
58. Hobbs, E. C., Yin, X., Paul, B. J., Astarita, J. L., & Storz, G. (2012). Conserved small protein associates with the multidrug efflux pump AcrB and differentially affects antibiotic resistance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(41), 16696-16701. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210093109>
59. Hooper, D. C. (2002). Fluoroquinolone resistance among Gram-positive cocci. *The Lancet. Infectious diseases*, 2(9), 530-538. [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(02\)00369-9](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(02)00369-9)
60. Howden, B. P., Davies, J. K., Johnson, P. D., Stinear, T. P., & Grayson, M. L. (2010). Reduced vancomycin susceptibility in *Staphylococcus aureus*, including vancomycin-intermediate and heterogeneous vancomycin-intermediate strains: resistance mechanisms, laboratory detection, and clinical implications. *Clinical*

- microbiology reviews*, 23(1), 99-139. <https://doi.org/10.1128/CMR.00042-09>. EDN: <https://elibrary.ru/lsgbte>
61. Howden, B. P., McEvoy, C. R., Allen, D. L., Chua, K., Gao, W., Harrison, P. F., Bell, J., Coombs, G., Bennett-Wood, V., Porter, J. L., Robins-Browne, R., Davies, J. K., Seemann, T., & Stinear, T. P. (2011). Evolution of multidrug resistance during *Staphylococcus aureus* infection involves mutation of the essential two component regulator WalKR. *PLoS pathogens*, 7(11), e1002359. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002359>
62. Howden, B. P., Stinear, T. P., Allen, D. L., Johnson, P. D., Ward, P. B., & Davies, J. K. (2008). Genomic analysis reveals a point mutation in the two-component sensor gene *graS* that leads to intermediate vancomycin resistance in clinical *Staphylococcus aureus*. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 52(10), 3755-3762. <https://doi.org/10.1128/AAC.01613-07>. EDN: <https://elibrary.ru/mmfyfv>
63. Hu, H., Johani, K., Gosbell, I. B., Jacombs, A. S., Almatroudi, A., Whiteley, G. S., Deva, A. K., Jensen, S., & Vickery, K. (2015). Intensive care unit environmental surfaces are contaminated by multidrug-resistant bacteria in biofilms: combined results of conventional culture, pyrosequencing, scanning electron microscopy, and confocal laser microscopy. *The Journal of hospital infection*, 91(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2015.05.016>
64. Hurdle, J. G., O'Neill, A. J., Mody, L., Chopra, I., & Bradley, S. F. (2005). In vivo transfer of high-level mupirocin resistance from *Staphylococcus epidermidis* to methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* associated with failure of mupirocin prophylaxis. *The Journal of antimicrobial chemotherapy*, 56(6), 1166-1168. <https://doi.org/10.1093/jac/dki387>. EDN: <https://elibrary.ru/iqqvkn>
65. Imamovic, L., & Sommer, M. O. (2013). Use of collateral sensitivity networks to design drug cycling protocols that avoid resistance development. *Science translational medicine*, 5(204), 204ra132. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3006609>
66. Investigation Summary: Factors Potentially Contributing to the Contamination of Romaine Lettuce Implicated in the Fall 2018 Multi-State Outbreak of *E. coli* O157:H7. *US Food and Drug Administration*. URL: <https://www.fda.gov/food/outbreaks-foodborne-illness/investigation-summary-factors-potentially-contributing-contamination-romaine-lettuce-implicated-fall> (дата обращения: 17.03.24).
67. Jacobsen, L., Wilcks, A., Hammer, K., Huys, G., Gevers, D., & Andersen, S. R. (2007). Horizontal transfer of *tet*(M) and *erm*(B) resistance plasmids from food strains of *Lactobacillus plantarum* to *Enterococcus faecalis* JH2-2 in the gastrointestinal tract of gnotobiotic rats. *FEMS Microbiology Ecology*, 59(1), 158-166. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00212.x>

68. Jana, S., & Deb, J. K. (2006). Molecular understanding of aminoglycoside action and resistance. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 70(2), 140-150. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0279-0>. EDN: <https://elibrary.ru/ppjmly>
69. Jara, D., Bello-Toledo, H., Domínguez, M., Cigarroa, C., Fernández, P., Vergara, L., Quezada-Aguiluz, M., Opazo-Capurro, A., Lima, C. A., & González-Rocha, G. (2020). Antibiotic resistance in bacterial isolates from freshwater samples in Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60035-0>. EDN: <https://elibrary.ru/urdkvm>
70. John, J. F., Jr, & Rice, L. B. (2000). The microbial genetics of antibiotic cycling. *Infection Control and Hospital Epidemiology*. <https://doi.org/10.1086/503170>
71. Johnson, J. R., Kuskowski, M. A., Smith, K., O'Bryan, T. T., & Tatini, S. (2005). Antimicrobial-resistant and extraintestinal pathogenic *Escherichia coli* in retail foods. *The Journal of Infectious Diseases*, 191(7), 1040-1049. <https://doi.org/10.1086/428451>
72. Kaur, S. (2000). Molecular approaches towards development of novel *Bacillus thuringiensis* biopesticides. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 16, 781-793. <https://doi.org/10.1023/A>. EDN: <https://elibrary.ru/ltdqnh>
73. Kolpin, D. W., Furlong, E. T., Meyer, M. T., Thurman, E. M., Zaugg, S. D., Barber, L. B., & Buxton, H. T. (2002). Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999-2000: a national reconnaissance. *Environmental Science & Technology*, 36(6), 1202-1211. <https://doi.org/10.1021/es011055j>
74. Kuroda, M., Kuroda, H., Oshima, T., Takeuchi, F., Mori, H., & Hiramatsu, K. (2003). Two-component system VraSR positively modulates the regulation of cell-wall biosynthesis pathway in *Staphylococcus aureus*. *Molecular microbiology*, 49(3), 807-821. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.2003.03599.x>. EDN: <https://elibrary.ru/etphvv>
75. Leclercq, R. (2002). Mechanisms of resistance to macrolides and lincosamides: nature of the resistance elements and their clinical implications. *Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 34(4), 482-492. <https://doi.org/10.1086/324626>
76. Levin, B. R., Lipsitch, M., Perrot, V., Schrag, S., Antia, R., Simonsen, L., Walker, N. M., & Stewart, F. M. (1997). The population genetics of antibiotic resistance. *Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 24. https://doi.org/10.1093/clinids/24.supplement_1.s9
77. Levin, B. R., Perrot, V., & Walker, N. (2000). Compensatory mutations, antibiotic resistance and the population genetics of adaptive evolution in bacteria. *Genetics*, 154(3), 985-997. <https://doi.org/10.1093/genetics/154.3.985>

78. Li, W., Atkinson, G. C., Thakor, N. S., Allas, U., Lu, C. C., Chan, K. Y., Tenson, T., Schulten, K., Wilson, K. S., Hauryliuk, V., & Frank, J. (2013). Mechanism of tetracycline resistance by ribosomal protection protein Tet(O). *Nature communications*, 4. <https://doi.org/10.1038/ncomms2470>. EDN: <https://elibrary.ru/rqjnef>
79. Luangtongkum, T., Shen, Z., Seng, V. W., Sahin, O., Jeon, B., Liu, P., & Zhang, Q. (2012). Impaired fitness and transmission of macrolide-resistant *Campylobacter jejuni* in its natural host. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 56(3), 1300-1308. <https://doi.org/10.1128/AAC.05516-11>
80. Maeusli, M., Lee, B., Miller, S., Reyna, Z., Lu, P., Yan, J., Ulhaq, A., Skandalis, N., Spellberg, B., & Luna, B. (2020). Horizontal Gene Transfer of Antibiotic Resistance from *Acinetobacter baylyi* to *Escherichia coli* on Lettuce and Subsequent Antibiotic Resistance Transmission to the Gut Microbiome. *mSphere*, 5(3). <https://doi.org/10.1128/mSphere.00329-20>. EDN: <https://elibrary.ru/hbtznq>
81. Manyi-Loh, C., Mamphweli, S., Meyer, E., & Okoh, A. (2018). Antibiotic Use in Agriculture and Its Consequential Resistance in Environmental Sources: Potential Public Health Implications. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 23(4). <https://doi.org/10.3390/molecules23040795>
82. Marshall, B. M., & Levy, S. B. (2011). Food animals and antimicrobials: impacts on human health. *Clinical microbiology reviews*, 24(4), 718-733. <https://doi.org/10.1128/CMR.00002-11>
83. Martínez, J. L., & Baquero, F. (2014). Emergence and spread of antibiotic resistance: setting a parameter space. *Upsala Journal of Medical Sciences*, 119(2), 68-77. <https://doi.org/10.3109/03009734.2014.901444>
84. Martínez, J. L., & Baquero, F. (2000). Mutation frequencies and antibiotic resistance. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 44(7), 1771-1777. <https://doi.org/10.1128/AAC.44.7.1771-1777.2000>
85. Martínez, J. L., Coque, T. M., & Baquero, F. (2015). Prioritizing risks of antibiotic resistance genes in all metagenomes. *Nature Reviews. Microbiology*, 13(6). <https://doi.org/10.1038/nrmicro3399-c2>
86. Martínez, J. L., Fajardo, A., Garmendia, L., Hernandez, A., Linares, J. F., Martínez-Solano, L., & Sánchez, M. B. (2009). A global view of antibiotic resistance. *FEMS Microbiology Reviews*, 33(1), 44-65. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00142.x>
87. Martínez-Martínez, L., Pascual, A., & Jacoby, G. A. (1998). Quinolone resistance from a transferable plasmid. *Lancet*, 351(9105), 797-799. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(97\)07322-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(97)07322-4). EDN: <https://elibrary.ru/crwdjl>

88. Mehainaoui, A., Menasria, T., Benouagueni, S., Benhadj, M., Lalaoui, R., & Gacemi-Kirane, D. (2021). Rapid screening and characterization of bacteria associated with hospital cockroaches (*Blattella germanica* L.) using MALDI-TOF mass spectrometry. *Journal of Applied Microbiology*, 130(3), 960-970. <https://doi.org/10.1111/jam.14803>. EDN: <https://elibrary.ru/ncpmuf>
89. Melnyk, A. H., Wong, A., & Kassen, R. (2015). The fitness costs of antibiotic resistance mutations. *Evolutionary Applications*, 8(3), 273-283. <https://doi.org/10.1111/eva.12196>
90. Miller, W. R., Munita, J. M., & Arias, C. A. (2014). Mechanisms of antibiotic resistance in enterococci. *Expert Review of Anti-Infective Therapy*, 12(10), 1221-1236. <https://doi.org/10.1586/14787210.2014.956092>
91. Morosini, M. I., García-Castillo, M., Coque, T. M., Valverde, A., Novais, A., Loza, E., Baquero, F., & Cantón, R. (2006). Antibiotic coresistance in extended-spectrum-beta-lactamase-producing Enterobacteriaceae and in vitro activity of tigecycline. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 50(8), 2695-2699. <https://doi.org/10.1128/AAC.00155-06>
92. Nadimpalli, M., Delarocque-Astagneau, E., Love, D. C., Price, L. B., Huynh, B. T., Collard, J. M., Lay, K. S., Borand, L., Ndir, A., Walsh, T. R., Guillemot, D., & BIRDY Study Group. (2018). Combating Global Antibiotic Resistance: Emerging One Health Concerns in Lower- and Middle-Income Countries. *Clinical Infectious Diseases*, 66(6), 963-969. <https://doi.org/10.1093/cid/cix879>
93. Neyra, R. C., Frisancho, J. A., Rinsky, J. L., Resnick, C., Carroll, K. C., Rule, A. M., Ross, T., You, Y., Price, L. B., & Silbergeld, E. K. (2014). Multidrug-resistant and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in hog slaughter and processing plant workers and their community in North Carolina (USA). *Environmental Health Perspectives*, 122(5), 471-477. <https://doi.org/10.1289/ehp.1306741>. EDN: <https://elibrary.ru/jgtkpt>
94. Nikaido, H. (2003). Molecular basis of bacterial outer membrane permeability revisited. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 67(4), 593-656. <https://doi.org/10.1128/MMBR.67.4.593-656.2003>. EDN: <https://elibrary.ru/meopop>
95. Nilsson, A. I., Zorzet, A., Kanth, A., Dahlström, S., Berg, O. G., & Andersson, D. I. (2006). Reducing the fitness cost of antibiotic resistance by amplification of initiator tRNA genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(18), 6976-6981. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602171103>
96. Olivares, J., Álvarez-Ortega, C., & Martínez, J. L. (2014). Metabolic compensation of fitness costs associated with overexpression of the multidrug efflux pump MexEF-OprN in *Pseudomonas aeruginosa*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 58(7), 3904-3913. <https://doi.org/10.1128/AAC.00121-14>

97. Olivares, J., Alvarez-Ortega, C., Linares, J. F., Rojo, F., Köhler, T., & Martínez, J. L. (2012). Overproduction of the multidrug efflux pump MexEF-OprN does not impair *Pseudomonas aeruginosa* fitness in competition tests, but produces specific changes in bacterial regulatory networks. *Environmental Microbiology*, 14(8), 1968-1981. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02727.x>
98. Oteo, J., Mencía, A., Bautista, V., Pastor, N., Lara, N., González-González, F., García-Peña, F. J., & Campos, J. (2018). Colonization with Enterobacteriaceae-Producing ESBLs, AmpCs, and OXA-48 in Wild Avian Species, Spain 2015-2016. *Microbial Drug Resistance*, 24(7), 932-938. <https://doi.org/10.1089/mdr.2018.0004>
99. Pärnänen, K. M. M., Narciso-da-Rocha, C., Kneis, D., Berendonk, T. U., Caçace, D., Do, T. T., Elpers, C., Fatta-Kassinos, D., Henriques, I., Jaeger, T., Karkman, A., Martinez, J. L., Michael, S. G., Michael-Kordatou, I., O'Sullivan, K., Rodriguez-Mozaz, S., Schwartz, T., Sheng, H., Sørum, H., Stedtfeld, R. D., & Manaia, C. M. (2019). Antibiotic resistance in European wastewater treatment plants mirrors the pattern of clinical antibiotic resistance prevalence. *Science advances*, 5(3). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau9124>
100. Poole, K. (2005). Efflux-mediated antimicrobial resistance. *The Journal of antimicrobial chemotherapy*, 56(1), 20-51. <https://doi.org/10.1093/jac/dki171>. EDN: <https://elibrary.ru/mgrdnd>
101. PubMed. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> (дата обращения: 01.11.2024)
102. Quinn, J. P., Dudek, E. J., DiVincenzo, C. A., Lucks, D. A., & Lerner, S. A. (1986). Emergence of resistance to imipenem during therapy for *Pseudomonas aeruginosa* infections. *The Journal of infectious diseases*, 154(2), 289-294. <https://doi.org/10.1093/infdis/154.2.289>
103. Rabbia, V., Bello-Toledo, H., Jiménez, S., Quezada, M., Domínguez, M., Vergara, L., Gómez-Fuentes, C., Calisto-Ulloa, N., González-Acuña, D., López, J., et al. (2016). Antibiotic Resistance in *Escherichia Coli* Strains Isolated from Antarctic Bird Feces, Water from inside a Wastewater Treatment Plant, and Seawater Samples Collected in the Antarctic Treaty Area. *Polar Sci.*, 10, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.002>
104. Ramirez, M. S., & Tolmasky, M. E. (2010). Aminoglycoside modifying enzymes. *Drug resistance updates: reviews and commentaries in antimicrobial and anticancer chemotherapy*, 13(6), 151-171. <https://doi.org/10.1016/j.drup.2010.08.003>. EDN: <https://elibrary.ru/ompgnt>
105. Reynolds, P. E. (1989). Structure, biochemistry and mechanism of action of glycopeptide antibiotics. *European journal of clinical microbiology & infec-*

- tious diseases: official publication of the European Society of Clinical Microbiology*, 8(11), 943-950. <https://doi.org/10.1007/BF01967563>. EDN: <https://elibrary.ru/kpmkem>
106. Rodríguez-Beltrán, J., DelaFuente, J., León-Sampedro, R., MacLean, R. C., & San Millán, Á. (2021). Beyond horizontal gene transfer: the role of plasmids in bacterial evolution. *Nature reviews. Microbiology*, 19(6), 347-359. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00497-1>. EDN: <https://elibrary.ru/ornmhm>
 107. Rodríguez-Martínez, J. M., Cano, M. E., Velasco, C., Martínez-Martínez, L., & Pascual, A. (2011). Plasmid-mediated quinolone resistance: an update. *Journal of infection and chemotherapy: official journal of the Japan Society of Chemotherapy*, 17(2), 149-182. <https://doi.org/10.1007/s10156-010-0120-2>
 108. Rosvoll, T. C., Pedersen, T., Sletvold, H., Johnsen, P. J., Sollid, J. E., Simonsen, G. S., Jensen, L. B., Nielsen, K. M., & Sundsfjord, A. (2010). PCR-based plasmid typing in *Enterococcus faecium* strains reveals widely distributed pRE25-, pRUM-, pIP501- and pHTbeta-related replicons associated with glycopeptide resistance and stabilizing toxin-antitoxin systems. *FEMS immunology and medical microbiology*, 58(2), 254-268. <https://doi.org/10.1111/j.1574-695X.2009.00633.x>
 109. Ryu, S. H., Park, S. G., Choi, S. M., Hwang, Y. O., Ham, H. J., Kim, S. U., Lee, Y. K., Kim, M. S., Park, G. Y., Kim, K. S., & Chae, Y. Z. (2012). Antimicrobial resistance and resistance genes in *Escherichia coli* strains isolated from commercial fish and seafood. *International journal of food microbiology*, 152(1-2), 14-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.003>
 110. San Millan, A., Toll-Riera, M., Qi, Q., & MacLean, R. C. (2015). Interactions between horizontally acquired genes create a fitness cost in *Pseudomonas aeruginosa*. *Nature communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms7845>
 111. Sandegren, L., & Andersson, D. I. (2009). Bacterial gene amplification: implications for the evolution of antibiotic resistance. *Nature reviews. Microbiology*, 7(8), 578-588. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2174>. EDN: <https://elibrary.ru/xwrner>
 112. Santos, L., & Ramos, F. (2018). Antimicrobial resistance in aquaculture: Current knowledge and alternatives to tackle the problem. *International journal of antimicrobial agents*, 52(2), 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2018.03.010>
 113. Sjölund, M., Bonnedahl, J., Hernandez, J., Bengtsson, S., Cederbrant, G., Pinhassi, J., Kahlmeter, G., Olsen, B. (2008). Dissemination of multidrug-resistant bacteria into the Arctic. *Emerging infectious diseases*, 14(1), 70-72. <https://doi.org/10.3201/eid1401.070704>. EDN: <https://elibrary.ru/mssgjr>

114. Skurnik, D., Roux, D., Cattoir, V., Danilchanka, O., Lu, X., Yoder-Himes, D. R., Han, K., Guillard, T., Jiang, D., Gaultier, C., Guerin, F., Aschard, H., Leclercq, R., Mekalanos, J. J., Lory, S., & Pier, G. B. (2013). Enhanced in vivo fitness of carbapenem-resistant oprD mutants of *Pseudomonas aeruginosa* revealed through high-throughput sequencing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(51), 20747-20752. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221552110>
115. Smani, Y., López-Rojas, R., Domínguez-Herrera, J., Docobo-Pérez, F., Martí, S., Vila, J., & Pachón, J. (2012). In vitro and in vivo reduced fitness and virulence in ciprofloxacin-resistant *Acinetobacter baumannii*. *Clinical microbiology and infection: the official publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 18(1). <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2011.03695.x>
116. State of the Art on the Contribution of Water to Antimicrobial Resistance. *Joint Research Centre*. Retrieved March 17, 2024, from <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC114775>
117. Stępień-Pyśniak, D., Hauschild, T., Dec, M., Marek, A., & Urban-Chmiel, R. (2019). Clonal Structure and Antibiotic Resistance of *Enterococcus* spp. from Wild Birds in Poland. *Microbial drug resistance (Larchmont, N.Y.)*, 25(8), 1227-1237. <https://doi.org/10.1089/mdr.2018.0461>
118. Sun, Z., Jiao, X., Peng, Q., Jiang, F., Huang, Y., Zhang, J., & Yao, F. (2013). Antibiotic resistance in *Pseudomonas aeruginosa* is associated with decreased fitness. *Cellular physiology and biochemistry: international journal of experimental cellular physiology, biochemistry, and pharmacology*, 31(2-3), 347-354. <https://doi.org/10.1159/000343372>
119. Sundqvist, M., Geli, P., Andersson, D. I., Sjölund-Karlsson, M., Runeheden, A., Cars, H., Abelson-Storby, K., Cars, O., & Kahlmeter, G. (2010). Little evidence for reversibility of trimethoprim resistance after a drastic reduction in trimethoprim use. *The Journal of antimicrobial chemotherapy*, 65(2), 350-360. <https://doi.org/10.1093/jac/dkp387>
120. Tacão, M., Moura, A., Correia, A., & Henriques, I. (2014). Co-resistance to different classes of antibiotics among ESBL-producers from aquatic systems. *Water research*, 48, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.021>
121. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 (SOFIA). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved March 17, 2024, from <https://www.fao.org/documents/card/en/c/19540EN>
122. Toprak, E., Veres, A., Michel, J. B., Chait, R., Hartl, D. L., & Kishony, R. (2011). Evolutionary paths to antibiotic resistance under dynamically sus-

- tained drug selection. *Nature genetics*, 44(1), 101-105. <https://doi.org/10.1038/ng.1034>. EDN: <https://elibrary.ru/xzivbm>
123. Trindade, S., Sousa, A., Xavier, K. B., Dionisio, F., Ferreira, M. G., & Gordo, I. (2009). Positive epistasis drives the acquisition of multidrug resistance. *PLoS genetics*, 5(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000578>. EDN: <https://elibrary.ru/xydixq>
124. Trotta, A., Cirilli, M., Marinaro, M., Bosak, S., Diakoudi, G., Ciccarelli, S., Paci, S., Buonavoglia, D., & Corrente, M. (2021). Detection of multi-drug resistance and AmpC β -lactamase/extended-spectrum β -lactamase genes in bacterial isolates of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) from the Mediterranean Sea. *Marine pollution bulletin*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112015>. EDN: <https://elibrary.ru/yglnwj>
125. Vaidya, V. K. (2011). Horizontal Transfer of Antimicrobial Resistance by Extended-Spectrum β Lactamase-Producing Enterobacteriaceae. *Journal of laboratory physicians*, 3(1), 37-42. <https://doi.org/10.4103/0974-2727.78563>
126. Ventola, C. L. (2015). The antibiotic resistance crisis: part 1: causes and threats. *P & T: a peer-reviewed journal for formulary management*, 40(4), 277-283. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4378521>
127. Verraes, C., Van Boxtael, S., Van Meervenne, E., Van Coillie, E., Butaye, P., Catry, B., de Schaetzen, M. A., Van Huffel, X., Imberechts, H., Dierick, K., Daube, G., Saegerman, C., De Block, J., Dewulf, J., & Herman, L. (2013). Antimicrobial resistance in the food chain: a review. *International journal of environmental research and public health*, 10(7), 2643-2669. <https://doi.org/10.3390/ijerph10072643>. EDN: <https://elibrary.ru/rmfvfj>
128. Watanabe, Y., Cui, L., Katayama, Y., Kozue, K., & Hiramatsu, K. (2011). Impact of rpoB mutations on reduced vancomycin susceptibility in *Staphylococcus aureus*. *Journal of clinical microbiology*, 49(7), 2680-2684. <https://doi.org/10.1128/JCM.02144-10>
129. Watts, J. E. M., Schreier, H. J., Lanska, L., & Hale, M. S. (2017). The Rising Tide of Antimicrobial Resistance in Aquaculture: Sources, Sinks and Solutions. *Marine drugs*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/md15060158>
130. Weingarten, R. A., Johnson, R. C., Conlan, S., Ramsburg, A. M., Dekker, J. P., Lau, A. F., Khil, P., Odom, R. T., Deming, C., Park, M., Thomas, P. J., NISC Comparative Sequencing Program, Henderson, D. K., Palmore, T. N., Segre, J. A., & Frank, K. M. (2018). Genomic Analysis of Hospital Plumbing Reveals Diverse Reservoir of Bacterial Plasmids Conferring Carbapenem Resistance. *mBio*, 9(1). <https://doi.org/10.1128/mBio.02011-17>. EDN: <https://elibrary.ru/vfgktv>

131. Weisblum, B. (1995). Erythromycin resistance by ribosome modification. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 39(3), 577-585. <https://doi.org/10.1128/AAC.39.3.577>
132. Zeballos-Gross, D., Rojas-Sereno, Z., Salgado-Caxito, M., Poeta, P., Torres, C., & Benavides, J. A. (2021). The Role of Gulls as Reservoirs of Antibiotic Resistance in Aquatic Environments: A Scoping Review. *Frontiers in microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.703886>. EDN: <https://elibrary.ru/fovwcbb>
133. Zhang, Y., Zhang, C., Parker, D. B., Snow, D. D., Zhou, Z., & Li, X. (2013). Occurrence of antimicrobials and antimicrobial resistance genes in beef cattle storage ponds and swine treatment lagoons. *The Science of the total environment*, 463-464, 631-638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.016>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Веденеев Павел Артемович, аспирант

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина

ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
p.a.vedeneev@urfu.ru

Бюлер Алексей Владимирович, кандидат химических наук, доцент

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина; Уральский государственный экономический университет

ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация; ул. 8 Марта, 62, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация
zellist@mail.ru

Лебедева Ирина Анатольевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория ветеринарных технологий и биоинжиниринга

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН

ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, 620061, Российская Федерация
ialebedeva@yandex.ru

Ковалева Елена Германовна, доктор химический наук, доцент

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина

*ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
e.g.kovaleva@urfu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Vedeneev, postgraduate student

Ural Federal University

19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

p.a.vedeneev@urfu.ru

Aleksey V. Buhler, PhD in Chemistry, Associate Professor

Ural Federal University; Ural State University of Economics

19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; 62, 8 Marta

Str., Ekaterinburg, 620144, Russian Federation

zellist@mail.ru

Irina A. Lebedeva, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Veterinary Technologies and Bioengineering

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

112a, Belinsky Str., Ekaterinburg, 620061, Russian Federation

ialebedeva@yandex.ru

Elena G. Kovaleva, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor

Ural Federal University

19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

e.g.kovaleva@urfu.ru

Поступила 05.09.2024

После рецензирования 02.12.2024

Принята 10.12.2024

Received 05.09.2024

Revised 02.12.2024

Accepted 10.12.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-3-1118

EDN: ZFIWHO

UDC 577.2:630



Scientific Reviews

GENES OF WOODY PLANTS INVOLVED IN THE FORMATION OF DROUGHT AND SALT TOLERANCE

A.V. Tretaykova, V.O. Malov, P.A. Krylov

Abstract

Background. The study of the molecular mechanisms regulating gene expression in response to various types of stress in woody plants, particularly drought and high soil salinity, is becoming a necessary condition for breeding or creating new resistant cultivars, forms, and hybrids with specific economically valuable traits. Currently, the extent and depth of studying the genes involved in drought and high soil salinity tolerance in woody plants is extremely low compared to agricultural crops, which significantly complicates and slows down the breeding process that should be based on achievements in molecular biology and genetics.

Purpose. To summarize, describe, and select potential genes involved in the formation of drought and salt tolerance in a range of woody plants used in agroforestry and protective afforestation, growing in areas with arid and semi-arid climates.

Materials and methods. To achieve the research objectives, more than 250 scientific sources were reviewed and a search in open gene databases was conducted to identify genes and their homologues databases using the BLAST program associated with drought and salt tolerance in woody plants used in agroforestry and protective afforestation.

Results. This study summarizes and describes 28 genes associated with drought tolerance and 14 genes associated with salt tolerance in the genera *Quercus* and *Populus*, and the families *Fabaceae*, *Rosaceae*, and *Oleaceae*.

Conclusion. Thus, as a result of the analysis of genes associated with drought and salt tolerance in woody plants, key targets have been identified that can serve as a basis for molecular selection, followed by the identification of potential markers and their possible association with economically valuable traits.

Keywords: drought tolerance genes; salt tolerance genes; woody plants, marker-assisted selection; agroforestry; review

For citation. Tretaykova, A. V., Malov, V. O., & Krylov, P. A. (2025). Genes of woody plants involved in the formation of drought and salt tolerance. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 614-633. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1118>

Научные обзоры

ГЕНЫ ДРЕВЕСНО-КУСТАРИНИКОВЫХ РАСТЕНИЙ, ВОВЛЕЧЕННЫЕ В ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ЗАСУХЕ И ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ

А.В. Третьякова, В.О. Малов, П.А. Крылов

Аннотация

Обоснование. Изучение молекулярных механизмов регуляции генов в ответ на различие типы стрессов у древесно-кустарниковых растений, в частности засухи и высокой засоленности почв, становятся обязательным условием для выведения или создания новых устойчивых сортов, форм и гибридов с заданными хозяйственно-ценными признаками. В настоящий момент степень и глубина изучения генов, вовлеченных в формирование устойчивости к засухе и высокой засоленности почв у древесно-кустарниковых растений крайне низка по сравнению с сельскохозяйственными растениями, что значительно затрудняет и замедляет селекционный процесс, который должен базироваться на достижениях молекулярной биологии и генетики.

Цель. Обобщить, описать и отобрать потенциальные гены, вовлеченные в формирование засухо- и солеустойчивости у ряда древесно-кустарниковых растений, используемых в агролесомелиорации и защитном лесоразведении, произрастающий на территориях с аридным и субаридным климатом.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели исследования был произведён обзор свыше 250 научных источников, поиск в открытых базах данных генов и их гомологов с помощью программы BLAST, связанных с формированием засухо- и солеустойчивости у древесно-кустарниковых растений, используемых в агролесомелиорации и защитном лесоразведении.

Результаты. В данной работе обобщены и описаны 28 генов, вовлеченных в формирование засухоустойчивости, и 14 генов с солеустойчивостью у родов *Quercus*, *Populus* и семейств *Fabaceae*, *Rosaceae*, *Oleaceae*.

Закключение. Таким образом, в результате анализа генов, связанных с формированием засухо- и солеустойчивости у древесно-кустарниковых растений, обозначены основные мишени, которые могут быть взяты за основу для молекулярной селекции с последующим выявлением возможных маркеров и их возможной связи с хозяйственно-ценными признаками.

Ключевые слова: гены засухоустойчивости; гены солеустойчивости; древесно-кустарниковые растения; маркерная селекция; агролесомелиорация; обзор

Для цитирования. Третьякова, А. В., Малов, В. О., & Крылов, П. А. (2025). Гены древесно-кустарниковых растений, вовлеченные в формирование устойчивости к засухе и засоленности почв. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 614-633. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1118>

Introduction

Woody plants play a crucial role in agroforestry, protecting crops from various negative impacts and fighting against desertification [3; 14; 38; 49]. Studying the molecular mechanisms that regulate gene expression in response to different types of stress, such as drought and high soil salinity, is extremely important for plants, including woody plants [15; 17; 53; 57; 63]. Open database resources such as Genome (NCBI) and Phytozome13 (Department of Energy's Joint Genome Institute) provide complete genomic sequences, but there is a lack of information on the genomes of woody plants, while information on agricultural plant genomes prevails. At the same time, the limited knowledge of genomes and genes in woody plants, especially genes involved in responding to adverse environmental factors, makes the selection process more complex and protracted, as the success in creating new varieties with economically valuable traits depends on the development of molecular techniques and genetic knowledge [1; 25].

Based on the above, there is currently a need to identify genes responsible for stress tolerance in woody plants widely used in agroforestry practices, and to create new varieties with desired agronomic traits.

Purpose. To summarize, describe, and select potential genes involved in the formation of drought and salt tolerance in a range of woody plants used in agroforestry and protective afforestation, growing in areas with arid and semi-arid climates.

Materials and methods

The search for genes of interest associated with drought and salt tolerance was conducted in the open database PubMedCentral (NCBI, USA). Ar-

ticles were searched using synonymous constructs [(“gene”) AND (“plants” OR “organism”) AND “salt”[All Fields]) AND resistant [All Fields] OR “droughts”[All Fields] AND resistance [All Fields] AND arid [All Fields] AND zone [All Fields]]. The “organism” section specified the studied plant in English/Latin.

Further investigation of information on each potential gene of interest was conducted, including functions according to the Gen RIF section and articles in the PubMed database. *Arabidopsis thaliana* L., a well-studied model plant at the molecular-genetic level, was used as the model organism. Subsequently, homologs of these genes were searched among taxa of interest in the open database Gene (NCBI, USA) using the synonymous construct (Gene name) AND Taxon of interest name [Organism]. Homologues of genes were searched using the BLAST program. Genera and families of woody shrubs and trees were taken from the forest seed base organization program for protective forest management in the Southern region of Russia [2]. The taxa of interest included the oak genus (*Quercus*), poplar genus (*Populus*), legume family (*Fabaceae*), rose family (*Rosaceae*), and olive family (*Oleaceae*).

Results of the research and discussion

As a result of the conducted search, 28 genes associated with drought tolerance and 14 genes associated with salt tolerance were identified. Figure 1 presents a histogram showing the identified genes and their homologs in the studied taxa. Since *A. thaliana* is a model organism, it had the highest number of genes related to drought and salt tolerance. Genes and their homologs associated with drought tolerance were most commonly found in the *Fabaceae* family, and least commonly were found in the genus *Quercus* and in the *Oleaceae* family.

The genus *Populus* and the *Fabaceae* family had slightly more potential genes identified compared to the genus *Quercus*, the *Rosaceae* family, and the *Oleaceae* family. The *Fabaceae* family is one of the largest and most diverse plant families, which includes many species adapted to arid conditions [21], which may explain the number of identified genes and homologs. Other families and species are presumably less studied in this regard.

Tables 1 and 2 present the identified potential genes and homologs in the woody plants. Table 1 shows genes associated with drought tolerance, and table 2 shows genes associated with salt tolerance.

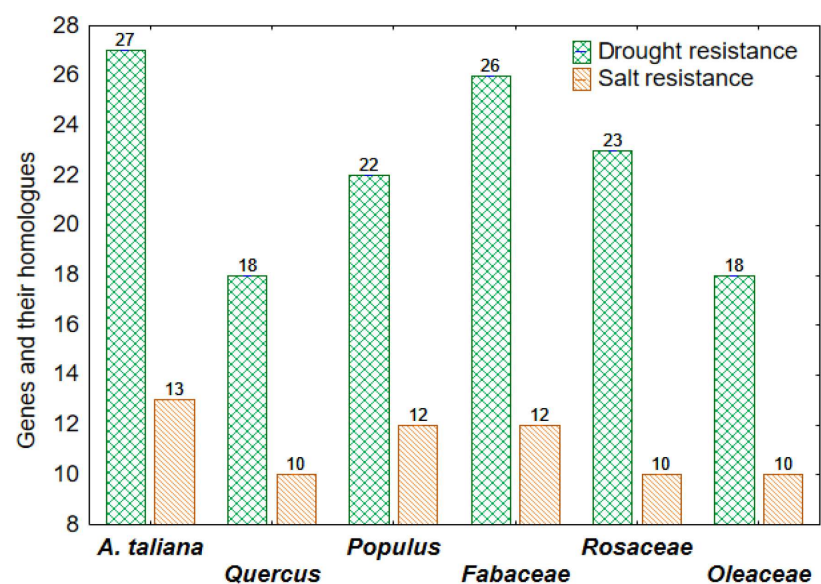


Figure 1. The number of identified genes and their homologs in the genus *Quercus*, genus *Populus*, *Fabaceae* family, *Rosaceae* family, and *Oleaceae* family.

Table 1.

Potential genes associated with drought tolerance

Gene name	Physiological processes	Taxa
<i>Enzymes</i>		
<i>ABA3</i>	Sulfur metabolism, abscisic acid biosynthesis, drought tolerance [18]	<i>Arabidopsis taliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>ABI1</i>	Negative regulator of stomatal closure, negative regulator of drought response [32], growth, stomatal function [4]	<i>Arabidopsis taliana</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>COP1</i>	Suppression of growth in light, drought tolerance, control of flowering, photoperiodism [26, 37]	<i>Arabidopsis taliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>EDS1</i>	Drought tolerance, response to pathogen invasion, growth regulation [51]	<i>Arabidopsis taliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>HA1</i>	Proton transport across the cytoplasmic membrane, ATPase, stomatal closure in response to drought [29]	<i>Arabidopsis taliana</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>KIN11</i> (<i>SNRK1.2</i>)	Sucrose metabolism, hypocotyl growth, drought tolerance [36]	<i>Arabidopsis taliana</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>

<i>MPK6</i>	Drought tolerance [60], response to oxidative stress [56], response to osmotic stress [30]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Fabaceae</i>
<i>NCED3</i>	Drought tolerance, abscisic acid biosynthesis [20].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i>
<i>PAD4</i>	Drought tolerance, response to pathogen invasion, growth regulation [51].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>PLDAL- PHA1</i>	Drought tolerance, stomatal movement [33], negative regulator of cold response [40]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>PLDDEL- TA</i>	Negative regulator of drought tolerance, recovery after freezing, reactive oxygen species metabolism [13]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>RbohD</i>	Regulation of reactive oxygen species, response to various stress types, drought tolerance, salt tolerance [31]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i>
<i>SAL1</i>	Negative regulator of drought tolerance [59], sulfur assimilation, response to cold, degradation of small RNAs [18]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>SIZ1</i>	Plant immunity, drought tolerance, response to low temperatures, growth regulation [35]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>YUC6</i>	Drought tolerance, regulation of reactive oxygen species [9]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
Transcription factors		
<i>ABF3</i>	Response to various stress types, drought tolerance, salt tolerance, chlorophyll degradation [16]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>ABI4</i>	Drought tolerance, response to various stress types, regulation of lateral root formation [26, 46], regulation of flowering [47]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>ABI5</i>	Drought tolerance [34], regulation of flowering [58]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Fabaceae</i>
<i>AGL20</i>	Flowering under drought conditions, drought tolerance [42]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Rosaceae</i>
<i>AREB1</i>	Activation of genes related to drought response, response to salt stress [61]	<i>Quercus robur</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i>
<i>DREB2A</i>	Transcription factor activating drought response genes, response to high temperature [44].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i>
<i>LSD1</i>	Drought tolerance, response to pathogen invasion, growth regulation [51]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>MYB96</i>	Drought tolerance, response to cold, response to various stress types, seed germination [26]	<i>Arabidopsis thaliana</i>

<i>TOC1</i>	Drought tolerance, photoperiodism [27]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Fabaceae</i>
Other proteins		
<i>GI</i> <i>regulatory</i> <i>co-chaperone</i>	Photoperiodism, control of flowering, carbohydrate metabolism, drought tolerance [19]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>GRP7</i> <i>RNA-binding</i> <i>protein</i>	Drought tolerance [62], stomatal closure, response to cold, circadian rhythms [45]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>NHX1</i> <i>ion channel</i>	Sodium ion transport, drought tolerance, salt tolerance [6]	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>

The identified protein of the alpha-beta hydrolase family, PAD4, tightly interacts with the proteins EDS1 and LSD1, regulating physiological processes such as response to moisture deficiency, growth and biomass accumulation, as well as defense against pathogens. These functions have been well studied in *Arabidopsis thaliana*, and PAD4 homologs are present in plants of interest for agroforestry. Another important DNA-binding protein, ABI4, is involved in abscisic acid signaling, regulating seed germination and the expression of the Na^+/K^+ channel HKT1, which is important for the stress response. Its homologues are also found in plants of interest. The multidomain protein COP1 regulates photoperiodism, drought resistance, and stomatal closure. NHX1 is an ion antiporter channel, transporting protons and sodium ions, essential for salt and drought tolerance. Homologs of this protein are absent in the genome of *Q. robur*. SIZ1 attaches the small ubiquitin-like modifier SUMO to proteins, participating in signaling pathways in response to drought and cold, regulating growth. HA1 is an ATPase, transporting protons across the cytoplasmic membrane, important for stomatal closure under moisture deficiency. Mutations in this gene reduce this function. GI, a regulator of circadian rhythms and morphogenesis, also plays a role in the response to moisture deficiency. AGL20 regulates flowering in drought conditions through the gibberellin pathway, while the transcription factor TOC1 affects histone modification and chromatin organization. NCED3 catalyzes the biosynthesis stage of abscisic acid in chloroplasts and has numerous homologs in plants of interest. Phospholipase delta PLDDELTA is involved in the response to cold and drought tolerance. ABI1, an abscisic acid antagonist, also has no homologs in *Q. robur*. MPK6 is a MAP kinase involved in signaling pathways related to pathogen invasion, oxidative stress responses, and moisture deficiency with few homologs. ABI5, a critical participant in the abscisic acid response, also has few homologs. YUC6, a flavin-binding monooxygenase, regulates active oxygen species content and stress

tolerance, with numerous homologs. ABA3 sulfotransferase is involved in the final stage of abscisic acid biosynthesis. GRP7, an RNA-binding protein, regulates circadian rhythms and immunity, with many homologs. Phospholipase D alpha PLDALPHA1 is a positive regulator of abscisic acid and an antagonist of the cold response. KIN11 (SNRK1.2) phosphorylates bZIP transcription factors and has many homologs. Lastly, RbohD is a NADPH oxidase that regulates the active oxygen species content. Homologs of this protein are numerous but not found in the *Oleaceae* family.

The transcription factor SAL1 has phosphatase activity and is involved in sulfur assimilation. Similar to previously studied proteins, it has numerous homologs in plant genomes of interest. Mutants of this gene are drought-resistant but sensitive to cold. DREB1A, a DNA-binding transcription factor activating drought response genes, is present in plants of interest but absent in the genome of *Q. robur*. AREB, a stress-activated bZIP transcription factor, has few homologs in the genomes of interest. Other important transcription factors include ABF3 and DREB2A, which also play a key role in stress response, activating drought and high temperature response genes. The transcription factor MYB96, activated by abscisic acid, has no homologs in the genomes of interest.

Table 2.

Potential genes associated with salt tolerance

Gene name	Physiological processes	Taxa
<i>Ion channels</i>		
<i>CLC-A</i>	Transport of nitrates [12] and chlorides across the tonoplast [22].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Fabaceae</i>
<i>CLC-B</i>	Transport of nitrate anions across the tonoplast [55], transport of chloride anions [22].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>CLC-C</i>	Transport of chloride anions across the tonoplast, stomatal movement [24].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>EIN2</i> <i>translation</i> <i>regulator, ion</i> <i>channel</i>	Leaf senescence, transport of metal cations, regulation of salt stress [28].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>HKT1</i>	Salt tolerance, transport of sodium ions, potassium ions [10].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>NHX1</i>	Transport of sodium ions, drought resistance, salt tolerance [50].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>SOS1</i>	Salt tolerance, extrusion of sodium cations from the cell [5, 64].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Populus</i>

Enzymes		
<i>CDPK</i>	Salt tolerance, resistance to excess light [29].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>PCSI</i>	Chelation of metal cations [11].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
<i>RbohF</i>	Salt tolerance, degradation of H ₂ O ₂ , regulation of reactive oxygen species [7].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
Transcription factors		
<i>AREB1</i>	Response to abiotic stress factors, initiation of transcription [23].	<i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i>
<i>STZ</i>	Salt tolerance, initiation of transcription, response to various types of stress [43].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>
Other proteins		
<i>AZI1</i> <i>protein-binding protein</i>	Negative regulator of salt tolerance, mutants with overexpression are hypersensitive to salt stress [39].	<i>Arabidopsis thaliana</i>
<i>MT2A</i> <i>metallothionein</i>	Binding and immobilization of metal ions in metal-protein clusters [15].	<i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Fabaceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Oleaceae</i>

HKT1 is a transmembrane transporter of sodium and potassium cations, expressed in the parenchyma surrounding vessels in *A. thaliana*. Homologs of this protein have been found in all sequenced taxa, indicating its importance for plant survival. Ion transport across the cell membrane is also facilitated by NHX1, an ion channel transporting sodium cations. This channel is widespread in the plant kingdom, with homologs even found in *Q. robur*. CLC-A, CLC-B, and CLC-C - anion channels located in the vacuole membrane - play an important role in ion balance regulation. CLC-A and CLC-B transport chloride and nitrate anions, while CLC-C transports only chloride anions and is also involved in stomatal movement regulation. Both channels are present in many plants, with the exception of CLC-A in *Q. robur*. SOS1, an ion channel that extrudes sodium cations from the cell, is critically important for salt tolerance. Mutants with impaired SOS1 function are hypersensitive to salt stress. A SOS1 homolog has only been found in the genus *Populus*, indicating its evolutionary novelty or specialization.

Another important detoxification mechanism is the binding and immobilization of metals. PCS1, phytochelatin synthase 1, synthesizes short peptides called phytochelatins, which bind to metal cations and convert them into a less

dangerous form. MT2A, metallothionein, also plays a role in detoxification by binding to metal cations and immobilizing them in metal-protein clusters. Homologs of both PCS1 and MT2A have been found in all sequenced taxa, which highlights their role in adaptation to adverse factors.

Equally important is the regulation of gene activity in response to stress. AREB1, a transcription factor characterized in the tomato genome (*Solanum lycopersicum* L.), is involved in the response to various types of stress. However, homologs of this gene have been found in only a small number of genomes, which may indicate its specialized role. Another transcription factor, STZ, which contains a zinc finger domain, is involved in the response to salt stress and other abiotic stress types, and has many homologs in genomes of interest.

Regulation of reactive oxygen species levels is another crucial mechanism of stress adaptation. RbohF, an NADPH oxidase, regulates reactive oxygen species content and is involved in degradation of hydrogen peroxide. Homologs of this protein have been found in many genomes, highlighting its significance in plant defense mechanisms.

CDPK, calcium-dependent protein kinase, is involved in signal transduction in response to various abiotic stress types. It has numerous homologs in plant genomes, indicating its central role in adaptive processes. EIN2, a metal cation transporter, influences salt tolerance, leaf senescence, and participates in the ethylene signaling pathway. It is also found in the genomes of many plants. Another protein, AZI1, is involved in signaling pathways in response to cold, pathogen invasion, and other stress types. Overexpression mutants of AZI1 are hypersensitive to salt stress. Homologs of this protein have not been found in many genomes, suggesting a specific role.

Genes involved in the regulation of the abscisic acid signaling pathway are critically important for plant adaptation to stress, and therefore represent a promising target for breeding and genetic engineering [8; 54]. In this case, the following genes are of interest: *ABI1*, *ABI4*, *ABI5*, *AREB1*, *NCED3*, *ABA3*. Additionally, genes involved in regulating stress responses, such as *DREB1A*, *DREB2A*, *MPK6*, *KIN11*, *RbohD*, and *YUC6*, are also significant [48]. Among the genes involved in salt tolerance, the most important role is played by genes involved in ion transfer, for example, *HKT1*, *SOS1*, *CLC-A*, *CLC-B*, *CLC-C*, and *NHX1*. The transcription factor AREB1, activated during stress and regulating the expression of genes related to salt tolerance, is also of interest. However, the role of each gene in drought and salt stress may vary depending on the plant species, environmental conditions, and other factors [52]. Some genes may interact with each other, creating complex regulatory networks [41]. Further

research is important to fully understand the role of these genes in combating drought and soil salinity.

Conclusion

Thus, the study summarized and described 28 genes involved in drought tolerance and 14 genes involved in salt tolerance in genera *Quercus*, *Populus*, and families *Fabaceae*, *Rosaceae*, *Oleaceae*. Analysis of genes associated with drought and salt tolerance in woody plants identified key potential target genes that can be used as a basis for molecular selection with the subsequent identification of potential markers and their possible link to economically valuable traits. Further research will deepen the understanding of the molecular mechanisms underlying salt and drought tolerance in woody plants.

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

Sponsorship information. The research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FNFE-2022-0022 “Search and management of patterns of expression of forest and cultural plant genes responsible for adaptation to environmental hazards and productivity”.

References / Список литературы

1. Belyaev, A. I., Krylov, P. A., Pugacheva, A. M., & Derevshchikova, L. V. (2023). Analysis of genomes of tree and shrub plants used in agroforestry reclamation in southern regions of Russia. *Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*, 70(2), 30-42 (Беляев, А. И., Крылов, П. А., Пугачева, А. М., & Деревщицова, Л. В. (2023). Анализ наличия геномов древесно-кустарниковых растений, используемых в агролесомелиорации южных регионов России. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, 70(2), 30-42). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-02-03>. EDN: <https://elibrary.ru/ttkjca>
2. Kryuchkov, S. N., & Matiss, G. Ya. (2014). *Forest planting in arid conditions*. Volgograd: VNIALMI. 300 p. (Крючков, С. Н., & Матисс, Г. Я. (2014). *Лесоразведение в засушливых условиях*. Волгоград: ВНИАЛМИ. 300 с.) ISBN: 5-900761-29-0. EDN: <https://elibrary.ru/ysbxb>
3. Kulik, K. N., Belyaev, A. I., & Pugacheva, A. M. (2023). Role of protective forest planting in combating drought and desertification of agrolandscapes. *Arid Eco-*

- systems*, 94(1), 4-14 (Кулик, К. Н., Беляев, А. И., & Пугачёва, А. М. (2023). Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов. *Аридные экосистемы*, 94(1), 4-14). <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-4-14>. EDN: <https://elibrary.ru/cszxwa>
4. Arend, M., Schnitzler, J. P., Ehltling, B., Hänsch, R., Lange, T., Rennenberg, H., Himmelbach, A., Grill, E., & Fromm, J. (2009). Expression of the Arabidopsis mutant ABI1 gene alters abscisic acid sensitivity, stomatal development, and growth morphology in gray poplars. *Plant Physiol.*, 151(4), 2110-2119. <https://doi.org/10.1104/pp.109.144956>
 5. Ariga, H., Katori, T., Yoshihara, R., Hase, Y., Nozawa, S., Narumi, I., Iuchi, S., Kobayashi, M., Tezuka, K., Sakata, Y., Hayashi, T., & Taji, T. (2013). Arabidopsis sos1 mutant in a salt-tolerant accession revealed an importance of salt acclimation ability in plant salt tolerance. *Plant Signal Behav.*, 8(7), e24779. <https://doi.org/10.4161/psb.24779>
 6. Asif, M. A., Zafar, Y., Iqbal, J., et al. (2011). Enhanced Expression of AtNHX1, in Transgenic Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) Improves Salt and Drought Tolerance. *Mol Biotechnol.*, 49, 250-256. <https://doi.org/10.1007/s12033-011-9399-1>. EDN: <https://elibrary.ru/ozmfnn>
 7. Ben Rejeb, K., Benzarti, M., Debez, A., Bailly, C., Savouré, A., & Abdelly, C. (2015). NADPH oxidase-dependent H₂O₂ production is required for salt-induced antioxidant defense in *Arabidopsis thaliana*. *J Plant Physiol*, 174, 5-15. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.08.022>
 8. Chen, K., Li, G. J., Bressan, R. A., Song, C. P., Zhu, J. K., & Zhao, Y. (2020). Abscisic acid dynamics, signaling, and functions in plants. *J Integr Plant Biol.*, 62(1), 25-54. <https://doi.org/10.1111/jipb.12899>. EDN: <https://elibrary.ru/yxwwtp>
 9. Cheol Park, H., Cha, J. Y., & Yun, D. J. (2013). Roles of YUCCAs in auxin biosynthesis and drought stress responses in plants. *Plant Signal Behav.*, 8(6), e24495. <https://doi.org/10.4161/psb.24495>
 10. Chu, M., Chen, P., Meng, S., Xu, P., & Lan, W. (2021). The Arabidopsis phosphatase PP2C49 negatively regulates salt tolerance through inhibition of AtHKT1;1. *J Integr Plant Biol.*, 63(3), 528-542. <https://doi.org/10.1111/jipb.13008>. EDN: <https://elibrary.ru/voblyu>
 11. Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 212(4), 475-486. <https://doi.org/10.1007/s004250000458>. EDN: <https://elibrary.ru/atgnqz>
 12. De Angeli, A., Monachello, D., Ephritikhine, G., Frachisse, J. M., Thomine, S., Gambale, F., & Barbier-Brygoo, H. (2006). The nitrate/proton antiporter

- AtCLCa mediates nitrate accumulation in plant vacuoles. *Nature*, 442(7105), 939-942. <https://doi.org/10.1038/nature05013>
13. Distéfano, A. M., Valiñas, M. A., Scuffi, D., Lamattina, L., Ten Have, A., García-Mata, C., & Laxalt, A. M. (2015). Phospholipase D δ knock-out mutants are tolerant to severe drought stress. *Plant Signal Behav.*, 10(11), e1089371. <https://doi.org/10.1080/15592324.2015.1089371>
 14. Eldridge, D. J., Ding, J., Dorrough, J., et al. (2024). Hotspots of biogeochemical activity linked to aridity and plant traits across global drylands. *Nat. Plants*, 10, 760-770. <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01670-7>. EDN: <https://elibrary.ru/vpfehm>
 15. Elliott, K. J., & Swank, W. T. (1994). Impacts of drought on tree mortality and growth in a mixed hardwood forest. *Journal of vegetation science*, 5(2), 229-236. <https://doi.org/10.2307/3236155>
 16. Gao, S., Gao, J., Zhu, X., Song, Y., Li, Z., Ren, G., Zhou, X., & Kuai, B. (2016). ABF2, ABF3, and ABF4 Promote ABA-Mediated Chlorophyll Degradation and Leaf Senescence by Transcriptional Activation of Chlorophyll Catabolic Genes and Senescence-Associated Genes in Arabidopsis. *Mol Plant*, 9(9), 1272-1285. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.06.006>
 17. Martins, G. de F., Antonio, L. de O., Freire, C. F., Bakke, I. A., & França, D. F. (2023). Gas exchange and initial growth of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. plants under salinity conditions. *Concilium*, 23(2), 555-569. <https://doi.org/10.53660/clm-792-23a47>
 18. Gy, I., Gascioli, V., Laressergues, D., Morel, J. B., Gombert, J., Proux, F., Proux, C., Vaucheret, H., & Mallory, A. C. (2007). Arabidopsis FIERY1, XRN2, and XRN3 are endogenous RNA silencing suppressors. *Plant Cell*, 19(11), 3451-3461. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.055319>
 19. Han, Y., Zhang, X., Wang, W., Wang, Y., & Ming, F. (2013). The suppression of WRKY44 by GIGANTEA-miR172 pathway is involved in drought response of Arabidopsis thaliana. *PLoS One*, 8(11), e73541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073541>
 20. Hao, G. P., Zhang, X. H., Wang, Y. Q., Wu, Z. Y., & Huang, C. L. (2009). Nucleotide variation in the NCED3 region of Arabidopsis thaliana and its association study with abscisic acid content under drought stress. *J Integr Plant Biol*, 51(2), 175-183. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00786.x>
 21. Hasanuzzaman, M., Araújo, S., & Gill, S. S. (2020). The plant family fabaceae. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4752-2>
 22. Hechenberger, M., Schwappach, B., Fischer, W. N., Frommer, W. B., Jentsch, T. J., & Steinmeyer, K. (1996). A family of putative chloride channels from

- Arabidopsis and functional complementation of a yeast strain with a CLC gene disruption. *J Biol Chem*, 271(52), 33632-33638. <https://doi.org/10.1074/jbc.271.52.33632>. EDN: <https://elibrary.ru/yciqrm>
23. Hsieh, T. H., Li, C. W., Su, R. C., Cheng, C. P., Sanjaya, Tsai, Y. C., & Chan, M. T. (2010). A tomato bZIP transcription factor, SLAREB, is involved in water deficit and salt stress response. *Planta*, 231(6), 1459-1473. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1147-4>. EDN: <https://elibrary.ru/nzitmr>
24. Jossier, M., Kroniewicz, L., Dalmas, F., Le Thiec, D., Ephritikhine, G., Thomine, S., Barbier-Brygoo, H., Vavasour, A., Filleur, S., & Leonhardt, N. (2010). The Arabidopsis vacuolar anion transporter, AtCLCc, is involved in the regulation of stomatal movements and contributes to salt tolerance. *Plant J*, 64(4), 563-576. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2010.04352.x>. EDN: <https://elibrary.ru/pmabnj>
25. Kang, K. K., & Cho, Y. G. (2022). Genetic Research and Plant Breeding. *Genes (Basel)*, 14(1), 51. <https://doi.org/10.3390/genes14010051>. EDN: <https://elibrary.ru/ffliim>
26. Lee, K., & Seo, P. J. (2015). Coordination of seed dormancy and germination processes by MYB96. *Plant Signal Behav*, 10(9), e1056423. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00162>
27. Legnaioli, T., Cuevas, J., & Mas, P. (2009). TOC1 functions as a molecular switch connecting the circadian clock with plant responses to drought. *EMBO J*, 28(23), 3745-3757. <https://doi.org/10.1038/emboj.2009.297>
28. Lei, G., Shen, M., Li, Z. G., Zhang, B., Duan, K. X., Wang, N., Cao, Y. R., Zhang, W. K., Ma, B., Ling, H. Q., Chen, S. Y., & Zhang, J. S. (2011). EIN2 regulates salt stress response and interacts with a MA3 domain-containing protein ECIP1 in Arabidopsis. *Plant Cell Environ*, 34(10), 1678-1692. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02363.x>
29. Liu, J., Elmore, J. M., Fuglsang, A. T., Palmgren, M. G., Staskawicz, B. J., & Coaker, G. (2009). RIN4 functions with plasma membrane H⁺ATPases to regulate stomatal apertures during pathogen attack. *PLoS Biol*, 7(6), e1000139. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000139>
30. Liu, X. M., Nguyen, X. C., Kim, K. E., Han, H. J., Yoo, J., Lee, K., Kim, M. C., Yun, D. J., & Chung, W. S. (2013). Phosphorylation of the zinc finger transcriptional regulator ZAT6 by MPK6 regulates Arabidopsis seed germination under salt and osmotic stress. *Biochem Biophys Res Commun*, 430(3), 1054-1059. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2012.12.039>
31. Liu, Z., Guo, C., Wu, R., Hu, Y., Zhou, Y., Wang, J., Yu, X., Zhang, Y., Bawa, G., & Sun, X. (2022). FLS2-RBOHD-PIF4 Module Regulates Plant Response

- to Drought and Salt Stress. *Int J Mol Sci*, 23(3), 1080. <https://doi.org/10.3390/ijms23031080>. EDN: <https://elibrary.ru/rzcxnp>
32. Luo, X., Li, C., He, X., Zhang, X., & Zhu, L. (2020). ABA signaling is negatively regulated by GbWRKY1 through JAZ1 and ABI1 to affect salt and drought tolerance. *Plant Cell Rep*, 39(2), 181-194. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02480-4>. EDN: <https://elibrary.ru/fpjfhg>
33. Mane, S. P., Vasquez-Robinet, C., Sioson, A. A., Heath, L. S., & Grene, R. (2007). Early PLD α -mediated events in response to progressive drought stress in Arabidopsis: a transcriptome analysis. *J Exp Bot*, 58(2), 241-252. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl262>
34. Mittal, A., Gampala, S. S., Ritchie, G. L., Payton, P., Burke, J. J., & Rock, C. D. (2014). Related to ABA-Insensitive3(ABI3)/Viviparous1 and AtABI5 transcription factor coexpression in cotton enhances drought stress adaptation. *Plant Biotechnol J*, 12(5), 578-589. <https://doi.org/10.1111/pbi.12162>
35. Miura, K., Okamoto, H., Okuma, E., Shiba, H., Kamada, H., Hasegawa, P. M., & Murata, Y. (2013). SIZ1 deficiency causes reduced stomatal aperture and enhanced drought tolerance via controlling salicylic acid-induced accumulation of reactive oxygen species in Arabidopsis. *Plant J*, 73(1), 91-104. <https://doi.org/10.1111/tpj.12014>
36. Mizoguchi, M., Umezawa, T., Nakashima, K., Kidokoro, S., Takasaki, H., Fujita, Y., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki, K. (2010). Two closely related subclass II SnRK2 protein kinases cooperatively regulate drought-inducible gene expression. *Plant Cell Physiol*, 51(5), 842-847. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcq041>. EDN: <https://elibrary.ru/nyxkdb>
37. Moazzam-Jazi, M., Ghasemi, S., Seyedi, S. M., & Niknam, V. (2018). COP1 plays a prominent role in drought stress tolerance in Arabidopsis and Pea. *Plant Physiol Biochem*, 130, 678-691. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.08.015>. EDN: <https://elibrary.ru/yixptv>
38. Moreno-Calles, A., Casas, A., Blancas, J., et al. (2010). Agroforestry systems and biodiversity conservation in arid zones: the case of the Tehuacán Valley, Central México. *Agroforest Syst*, 80, 315-331. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9349-0>. EDN: <https://elibrary.ru/gknatu>
39. Pitzschke, A., Datta, S., & Persak, H. (2014). Salt stress in Arabidopsis: lipid transfer protein AZI1 and its control by mitogen-activated protein kinase MPK3. *Mol Plant*, 7(4), 722-738. <https://doi.org/10.1093/mp/sst157>
40. Rajashekar, C. B., Zhou, H. E., Zhang, Y., Li, W., & Wang, X. (2006). Suppression of phospholipase D α 1 induces freezing tolerance in Arabidopsis: response of cold-responsive genes and osmolyte accumulation. *J Plant Physiol*, 163(9), 916-926. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.08.006>

41. Rehman, S., & Mahmood, T. (2015). Functional role of DREB and ERF transcription factors: regulating stress-responsive network in plants. *Acta Physiol Plant*, 37, 178. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1929-1>. EDN: <https://elibrary.ru/frqxzj>
42. Riboni, M., Galbiati, M., Tonelli, C., & Conti, L. (2013). Gigantea enables drought escape response via abscisic acid-dependent activation of the florigens and suppressor of overexpression of constans. *Plant Physiol.*, 162(3), 1706-1719. <https://doi.org/10.1104/pp.113.217729>
43. Sakamoto, H., Maruyama, K., Sakuma, Y., Meshi, T., Iwabuchi, M., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2004). Arabidopsis Cys2/His2-type zinc-finger proteins function as transcription repressors under drought, cold, and high-salinity stress conditions. *Plant Physiol.*, 136(1), 2734-2746. <https://doi.org/10.1104/pp.104.046599>. EDN: <https://elibrary.ru/xnyjqt>
44. Sakuma, Y., Maruyama, K., Osakabe, Y., Qin, F., Seki, M., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2006). Functional analysis of an Arabidopsis transcription factor, DREB2A, involved in drought-responsive gene expression. *Plant Cell*, 18(5), 1292-1309. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.035881>
45. Schöning, J. C., Streitner, C., Meyer, I. M., Gao, Y., & Staiger, D. (2008). Reciprocal regulation of glycine-rich RNA-binding proteins via an interlocked feedback loop coupling alternative splicing to nonsense-mediated decay in Arabidopsis. *Nucleic Acids Res.*, 36(22), 6977-6987. <https://doi.org/10.1093/nar/gkn847>
46. Shkolnik-Inbar, D., & Bar-Zvi, D. (2010). ABI4 mediates abscisic acid and cytokinin inhibition of lateral root formation by reducing polar auxin transport in Arabidopsis. *Plant Cell*, 22(11), 3560-3573. <https://doi.org/10.1105/tpc.110.074641>. EDN: <https://elibrary.ru/nyxgux>
47. Shu, K., Chen, Q., Wu, Y., Liu, R., Zhang, H., Wang, S., Tang, S., Yang, W., & Xie, Q. (2016). Abscisic acid-insensitive 4 negatively regulates flowering through directly promoting Arabidopsis flowering locus C transcription. *J Exp Bot.*, 67(1), 195-205. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv459>
48. Singh, K., & Chandra, A. (2021). DREBs-potential transcription factors involve in combating abiotic stress tolerance in plants. *Biologia*, 76, 3043-3055. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00840-8>. EDN: <https://elibrary.ru/igqkgv>
49. Sobola, O. O., Amadi, D. C., & Jamala, G. Y. (2015). The role of agroforestry in environmental sustainability. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 8(5), 20-25. <https://doi.org/10.9790/2380-08512025>
50. Sottosanto, J. B., Saranga, Y., & Blumwald, E. (2007). Impact of AtNHX1, a vacuolar Na⁺/H⁺ antiporter, upon gene expression during short- and long-

- term salt stress in *Arabidopsis thaliana*. *BMC Plant Biology*, 7, 18. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-7-18>. EDN: <https://elibrary.ru/tjqilz>
51. Szechyńska-Hebda, M., Czarnocka, W., Hebda, M., Bernacki, M. J., & Karpiński, S. (2016). PAD4, LSD1 and EDS1 regulate drought tolerance, plant biomass production, and cell wall properties. *Plant Cell Reports*, 35(3), 527-539. <https://doi.org/10.1007/s00299-016-1955-5>. EDN: <https://elibrary.ru/nrsvca>
52. Tikhomirova, T. S., Krutovsky, K. V., & Shestibratov, K. A. (2022). Molecular Traits for Adaptation to Drought and Salt Stress in Birch, Oak and Poplar Species. *Forests*, 14(1), 7. <https://doi.org/10.3390/f14010007>. EDN: <https://elibrary.ru/uukoib>
53. Trejo-Téllez, L. I. (2023). Salinity Stress Tolerance in Plants. *Plants*, 12, 3520. <https://doi.org/10.3390/plants12203520>. EDN: <https://elibrary.ru/xmkys>
54. Trivedi, D. K., Gill, S. S., & Tuteja, N. (2016). Abscisic Acid (ABA): Biosynthesis, Regulation, and Role in Abiotic Stress Tolerance. In *Abiotic Stress Response in Plants* (pp. 315-326). <https://doi.org/10.1002/9783527694570.ch15>
55. von der Fecht-Bartenbach, J., Bogner, M., Dynowski, M., & Ludewig, U. (2010). CLC-b-mediated NO₃/H⁺ exchange across the tonoplast of *Arabidopsis* vacuoles. *Plant Cell Physiology*, 51(6), 960-968. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcq062>. EDN: <https://elibrary.ru/nyymvf>
56. Wang, P., Du, Y., Zhao, X., Miao, Y., & Song, C. P. (2013). The MPK6-ERF6-ROS-responsive cis-acting Element7/GCC box complex modulates oxidative gene transcription and the oxidative response in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 161(3), 1392-1408. <https://doi.org/10.1104/pp.112.210724>
57. Wang, W., Peng, C., Kneeshaw, D. D., Larocque, G. R., & Luo, Z. (2012). Drought-induced tree mortality: ecological consequences, causes, and modeling. *Environmental Reviews*, 20(2), 109-121. <https://doi.org/10.1139/a2012-004>. EDN: <https://elibrary.ru/poxqip>
58. Wang, Y., Li, L., Ye, T., Lu, Y., Chen, X., & Wu, Y. (2013). The inhibitory effect of ABA on floral transition is mediated by ABI5 in *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 64(2), 675-684. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers361>
59. Wilson, P. B., Estavillo, G. M., Field, K. J., Pornsiriwong, W., Carroll, A. J., Howell, K. A., Woo, N. S., Lake, J. A., Smith, S. M., Harvey Millar, A., von Caemmerer, S., & Pogson, B. J. (2009). The nucleotidase/phosphatase SAL1 is a negative regulator of drought tolerance in *Arabidopsis*. *Plant J.*, 58(2), 299-317. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2008.03780.x>
60. Xu, D. B., Chen, M., Ma, Y. N., Xu, Z. S., Li, L. C., Chen, Y. F., & Ma, Y. Z. (2015). A G-protein β subunit, AGB1, negatively regulates the ABA response and drought tolerance by down-regulating AtMPK6-related pathway

- in Arabidopsis. *PLoS One*, 10(1), e0116385. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116385>
61. Yáñez, M., Cáceres, S., Orellana, S., Bastías, A., Verdugo, I., Ruiz-Lara, S., & Casaretto, J. A. (2009). An abiotic stress-responsive bZIP transcription factor from wild and cultivated tomatoes regulates stress-related genes. *Plant Cell Rep.*, 28(10), 1497-1507. <https://doi.org/10.1007/s00299-009-0749-4>. EDN: <https://elibrary.ru/jaczur>
62. Yang, D. H., Kwak, K. J., Kim, M. K., Park, S. J., Yang, K. Y., & Kang, H. (2014). Expression of Arabidopsis glycine-rich RNA-binding protein AtGRP2 or AtGRP7 improves grain yield of rice (*Oryza sativa*) under drought stress conditions. *Plant Sci.*, 214, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.10.006>
63. Yuan, Lu., F., J., Zeng., Xiaoda, Li., & Bo, Zhang. (2021). Physiological changes of three woody plants exposed to progressive salt stress. *Photosynthetica*, 59(1), 171-184. <https://doi.org/10.32615/PS.2021.007>. EDN: <https://elibrary.ru/pnbgdy>
64. Yue, Y., Zhang, M., Zhang, J., Duan, L., & Li, Z. (2011). Arabidopsis LOS5/ABA3 overexpression in transgenic tobacco (*Nicotiana tabacum* cv. Xanthi-nc) results in enhanced drought tolerance. *Plant Sci.*, 181(4), 405-411. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.06.010>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Tretyakova, Research Engineer at the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
tretaykova@vfanc.ru
SPIN-code: 8498-4535
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4478-4711>
ResearcherID: JAN-9574-2023

Vsevolod O. Malov, Research Engineer at the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
malov-v@vfanc.ru
SPIN-code: 7408-8285
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2766-0124>
ResearcherID: HHR-9077-2022

Pavel A. Krylov, Cand. Sc. (Biology), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., 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

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Третьякова Анна Вадимовна, инженер-исследователь лаборатории геномных и постгеномных технологий
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
tretaykova@vfanc.ru

Малов Всеволод Олегович, инженер-исследователь лаборатории геномных и постгеномных технологий
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
malov-v@vfanc.ru

Крылов Павел Андреевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник с и.о. заведующего лабораторией геномных и постгеномных технологий

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелио-
раций и защитного лесоразведения Российской академии наук»*

*пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Феде-
рация*

krylov-p@yfac.ru

Поступила 26.07.2024

После рецензирования 01.09.2024

Принята 28.10.2024

Received 26.07.2024

Revised 01.09.2024

Accepted 28.10.2024

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

ИЗМЕНЕНИЕ ЛАТЕНТНОГО ПЕРИОДА
БОЛЕВОЙ РЕАКЦИИ КРЫС ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ
ПЕРОРАЛЬНОМ ПРИЕМЕ ПИЩЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ
«RESVERATROL» И «ЭНОАНТ»

Хусаинов Д.Р., Нагаева Е.И., Трибрат Н.С.,
Аидинов И.Д., Туманянц К.Н., Бульхина С.Д. 11

THE EFFECT OF *LALLEMANTIA ROYLEANA*
SEEDS EXTRACT IN MODIFYING THE INFLAMMATORY
RESPONSE AND BAX PROTEIN EXPRESSION
IN THE KIDNEY TISSUE OF ALBINO MICE
THAT TREATED WITH RIFADIN

Z.T.S. Al-Asady, I.M. Manti, G.A. Al-Bairuty,
I.S. Al-Jumaily 31

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО
ВОДОРОДА И ИНГИБИТОРА ПРОТЕИНКИНАЗЫ С
НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
СПЕРМАТОЗОИДОВ БЫКОВ

М.Н. Ивашенко, А.В. Дерюгина,
А.А. Белов, П.С. Игнатьев,
М.И. Латушко 43

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

АНАЛИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ ГЛИЦИНИНОВ И β -КОНГЛИЦИНИНОВ
В СЕМЕНАХ КУЛЬТУРНЫХ СОРТОВ СОИ В РАЗНЫХ
ПЕРИОДАХ ИХ СОЗРЕВАНИЯ

А.А. Пензин, П.Д. Тимкин,
Д.Д. Котельников 56

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ *TULIPA*
BIEBERSTEINIANA SCHULT. ET SCHULT. FIL. (LILIACEAE)
НА ЕРГЕНИНСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

**Н.Ц. Лиджиева, А.С. Очирова, Ж.В. Овадыкова,
С.Н. Прошкин** 71

О ДИАГНОСТИКЕ БИОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
АДВЕНТИВНЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ В НЕЧЕРНОЗЕМЬЕ РОССИИ

**Л.А. Земскова, М.В. Авраменко, Е.В. Ноздрачева,
О.Н. Чиграй** 90

ANDONGAN AS A STRATEGY FOR PURIFYING AGRICULTURAL
IRRIGATION WATER: CASE STUDY OF SUBAK SEMBUNG, BALI

I.N. Muliarta 113

АРИДИЗАЦИЯ КЛИМАТА В ЗАПАДНОМ ПРИКАСПИИ
КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ПАСТБИЩНЫХ
ФИТОЦЕНОЗОВ

Л.П. Рыбашлыкова 133

МОНИТОРИНГ, КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА
ОПУСТЫНИВАНИЯ ПАСТБИЩ И ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЕ
В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИКАСПИЯ

Л.П. Рыбашлыкова 148

БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ОСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА
НА РОСТ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ

А.П. Никифорова, И.С. Хамагаева 169

ОЦЕНКА БИОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИРОДНЫХ
ШТАММОВ *BACILLUS* SPP., ОБЛАДАЮЩИХ ЦЕННЫМИ
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

А.Н. Иркитова, Д.Е. Дудник, А.В. Малкова, К.В. Хлопова 188

**ЗАДЕРЖКА РОСТА ПЛОДА У КОРОВ АССОЦИИРОВАНА
С ВНУТРИУТРОБНЫМ ДИСЭЛЕМЕНТОЗОМ****В.А. Сафонов, Т.С. Ермилова, А.Е. Черницкий 208****ЗЕМЛЕДЕЛИЕ
И ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ****БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ БИНАРНЫХ ТРИАЗОЛЬНЫХ
ПРЕПАРАТОВ НА ПРОРОСТКАХ МЯГКОЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ****Н.Г. Власенко, С.С. Халиков, О.И. Теплякова, М.С. Халиков,
Н.Д. Чкаников 233****STUDY OF GENE EXPRESSION RESISTANCE IN OILSEED RAPE
AGAINST PYTHIUM ROOT ROT CAUSED BY PYTHIUM SPP. FUNGI****J.T. Alkooranee 253****УРОЖАЙНОСТЬ СОРТОВ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР
И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ПРИМЕНЕНИЯ АГРОХИМИКАТОВ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ****Д.В. Виноградов, Е.М. Дедова, А.С. Шкуркина,
Т.В. Зубкова, Е.И. Лупова 268****АГРОХИМИЯ И АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ****USING HYDRUS-1D SOFTWARE TO PREDICT CUMULATIVE
INFILTRATION VALUES FOR DIFFERENT SOIL TEXTURES****F.A. Al-Wazzan 283****A COMBINATION OF BENTONITE, BIOLOGICAL
SUBSTRATE, AND MICROBIAL PRODUCTS TO ENHANCE
CORAL SAND AND INFLUENCE THE GROWTH PERFORMANCE
OF HEAT-RESISTANT MUSTARD GREENS, BRASSICA JUNCEA****C.T. Nguyen, D.N. Vu, N.T. Bui, T.T.T. Dinh, T.H. Le, M.T. Vu 300****САДОВОДСТВО И ЛЕСОВОДСТВО****ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ВЫСОТЫ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ
СИБИРСКОЙ В ДРЕВОСТОЯХ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА****С.Л. Шевелев, П.В. Михайлов 319**

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СКЛЕРОСТИНА,
АРТЕРИАЛЬНОЙ КАЛЬЦИФИКАЦИИ И ЖЕСТКОСТИ В КОНТЕКСТЕ
ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА

**И.А. Снимщикова, М.О. Ревякина, Н.А. Кабина,
Е.В. Митяева** 336

РЕПРОДУКТИВНОЕ ЗДОРОВЬЕ СЕЛЬСКОЙ МОЛОДЕЖИ
РОССИИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ЦЕННОСТЕЙ

**Р.В. Чвалун, А. Х. Маламатов, А. Н. Коноплева,
С.С. Асатрян, Ю.Г. Лесных** 358

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ
И БЕЗОПАСНОСТИ КАРТОФЕЛЯ, ВЫРАЩЕННОГО
НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ, РАБОТАЮЩИХ
ПО ТРАДИЦИОННОЙ И ОРГАНИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИЯМ

В.В. Закревский, А.А. Подорванов 380

ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ И ПРОБЛЕМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ОКАЗАНИЯ ВОЕННОСЛУЖАЩИМ
(СОТРУДНИКАМ) МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ
ПО ОНКОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОФИЛЮ

**П.Ю. Наумов, А.В. Дубинин, А.А. Утюганов,
Р.В. Зелепукин** 397

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
НА АНТИБИОТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ОСМОУСТОЙЧИВОЙ
МИКРОБИОТЫ В НЕКОТОРЫХ ВИДАХ УРБЕЧЕЙ

**Р.Т. Тимакова, А.А. Хлопов, Е.С. Лыбенко,
С.О. Никитин** 424

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТВЕРДОЙ ДИСПЕРСИИ ФЕНБЕНДАЗОЛА
И ИВЕРМЕКТИНА НА ОСНОВЕ ЭКСТРАКТА СОЛОДКИ
ДЛЯ ТЕРАПИИ ОВЕЦ ПРИ ПАРАЗИТАРНЫХ ИНВАЗИЯХ

**В.А. Марченко, С.С. Халиков, Ю.А. Василенко,
Е.А. Ефремова, М.С. Халиков, М.М. Ильин, А. Сазманд** 453

ОПЫТ РЕГИОНОВ

ЗАПРОС РЕГИОНАЛЬНОГО СООБЩЕСТВА
НА КАЧЕСТВО ФЕРМЕРСКИХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ ЖИТЕЛЕЙ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ)

**В.А. Ивашова, Д.И. Грицай, Л.И. Высочкина,
А.П. Исаенко, В.В. Реймер** 480

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ И СООБЩЕНИЯ

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА БЕЛКОВ
ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕТАБОЛИЗМА ЛОШАДЕЙ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

М.М. Атрощенко, Ю.А. Марсянова 500

АНАЛИЗ МИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ЯЧМЕНЯ
ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ
И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
ОБЪЕДИНЁННЫХ НАЦИЙ

**И.А. Аксенов, Г.А. Трунин, М.С. Фабриков, М.С. Лисятников,
Е.С. Прусов, С.И. Рощина, М.А. Дубровин** 529

РЕАЛИЗАЦИЯ ВОСПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ
СПОСОБНОСТИ BOS TAURUS ПОСРЕДСТВОМ ГОРМОНАЛЬНОЙ
РЕГУЛЯЦИИ (ОБЗОР)

**А.Н. Фролов, О.А. Завьялов, Т.Б. Алдыяров,
Е.С. Медетов, З.А. Галиева** 557

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ, МЕХАНИЗМЫ, СКОРОСТЬ РАЗВИТИЯ,
ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
К АНТИБИОТИКАМ

**П.А. Веденеев, А.В. Бюлер, И.А. Лебедева,
Е.Г. Ковалева** 579

ГЕНЫ ДРЕВЕСНО-КУСТАРИНИКОВЫХ РАСТЕНИЙ,
ВОВЛЕЧЕННЫЕ В ФОМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
К ЗАСУХЕ И ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ

А.В. Третьякова, В.О. Малов, П.А. Крылов 614

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 634

CONTENTS

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

THE LATENT PERIOD CHANGES IN THE PAIN RESPONSE OF RATS WITH PROLONGED CONSUMPTION OF FOOD CONCENTRATES “RESVERATROL” AND “ENOANT”

**Khusainov D.R., Nagaeva E.I., Tribat N.S., Aidinov I.D.,
Tumanyantz K.N., Bulhina S.D. 11**

THE EFFECT OF *LALLEMANTIA ROYLEANA* SEEDS EXTRACT IN MODIFYING THE INFLAMMATORY RESPONSE AND BAX PROTEIN EXPRESSION IN THE KIDNEY TISSUE OF ALBINO MICE THAT TREATED WITH RIFADIN

Z.T.S. Al-Asady, I.M. Manti, G.A. Al-Bairuty, I.S. Al-Jumaily 31

THE EFFECT OF MOLECULAR HYDROGEN AND PROTEINKINASE C INHIBITOR ON THE FUNCTIONAL PARAMETERS OF BOVINE SPERM

**M.N. Ivashchenko, A.V. Deryugina, A.A. Belov, P.S. Ignatiev,
M.I. Latushko 43**

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

DIFFERENTIAL ANALYSIS OF GLYCININ AND β -CONGLYCININ GENE EXPRESSION IN SEEDS OF CULTIVATED SOYBEAN VARIETIES AT DIFFERENT PERIODS OF THEIR MATURATION

A.A. Penzin, P.D. Timkin, D.D. Kotelnikov 56

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

THE AGE STRUCTURE OF THE COENOPULATIONS OF *TULIPA BIEBERSTEINIANA* SCHULT. ET SCHULT. FIL. (LILIACEAE) ON THE ERGENINSKY UPLAND

**N.Ts. Lidzhieva, A.S. Ochirova, Zh.V. Ovadykova,
S.N. Proshkin 71**

ON THE DIAGNOSTICS OF BIOCHEMICAL ACTIVITY
OF ALIEN PLANT SPECIES IN THE NON-BLACK EARTH REGION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

L.A. Zemskova, M.V. Avramenko, E.V. Nozdracheva, O.N. Chigrai 90

ANDONGAN AS A STRATEGY FOR PURIFYING AGRICULTURAL
IRRIGATION WATER: CASE STUDY OF SUBAK SEMBUNG, BALI

I.N. Muliarta 113

ARIDIZATION OF THE CLIMATE IN THE WESTERN
CASPIAN REGION AS A FACTOR IN REDUCING THE PRODUCTIVITY
OF PASTURE PHYTOCENOSES

L.P. Rybashlykova 133

MONITORING, COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF PASTURE
DESERTIFICATION AND THEIR RESTORATION IN THE CONDITIONS
OF THE OF THE NORTHWESTERN CASPIAN SEA

L.P. Rybashlykova 148

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

EFFECT OF LOW TEMPERATURES AND OSMOTIC STRESS
ON THE GROWTH OF LACTIC ACID BACTERIA

A.P. Nikiforova, I.S. Khamagaeva 169

THE BIOSAFETY EVALUATION OF NATURAL *BACILLUS* SPP.
STRAINS WITH VALUABLE BIOTECHNOLOGICAL PROPERTIES

A.N. Irkitova, A.V. Malkova, D.E. Dudnik, K.V. Khlopova 188

FETAL GROWTH RESTRICTION IN COWS IS ASSOCIATED
WITH INTRAUTERINE DISELEMENTOSIS

V.A. Safonov, T.S. Ermilova, A.E. Chernitskiy 208

SOIL FERTILITY AND PLANT PROTECTION

BIOLOGICAL ACTIVITY OF BINARY TRIAZOLE PREPARATIONS
ON SOFT SPRING WHEAT

**N.G. Vlasenko, S.S. Khalikov, O.I. Teplyakova,
M.S. Khalikov, N.D. Chkanikov** 233

STUDY OF GENE EXPRESSION RESISTANCE
IN OILSEED RAPE AGAINST PYTHIUM ROOT ROT CAUSED
BY PYTHIUM SPP. FUNGI

J.T. Alkoorance 253

PRODUCTIVITY OF WINTER GRAIN CROPS VARIETIES
AND THEIR CULTIVATION EFFICIENCY DEPENDING ON
THE USE OF AGROCHEMICALS IN THE NON-BLACK EARTH
REGION CONDITIONS

D.V. Vinogradov, E.M. Dedova, A.S. Shkurkina,
T.V. Zubkova, E.I. Lupova 268

**AGROCHEMISTRY
AND AGRICULTURAL SOIL SCIENCE**

USING HYDRUS-1D SOFTWARE TO PREDICT CUMULATIVE
INFILTRATION VALUES FOR DIFFERENT SOIL TEXTURES

F.A. Al-Wazzan 283

A COMBINATION OF BENTONITE, BIOLOGICAL SUBSTRATE,
AND MICROBIAL PRODUCTS TO ENHANCE CORAL SAND
AND INFLUENCE THE GROWTH PERFORMANCE
OF HEAT-RESISTANT MUSTARD GREENS, BRASSICA JUNCEA

C.T. Nguyen, D.N. Vu, N.T. Bui, T.T.T. Dinh,
T.H. Le, M.T. Vu 300

HORTICULTURE AND FORESTRY

DYNAMICS OF THE HEIGHT OF SIBERIAN SPRUCE
IN THE STANDS OF THE YENISEI RIDGE

S.L. Shevelev, P.V. Mikhailov 319

PUBLIC HEALTH AND PREVENTIVE MEDICINE

PROSPECTS FOR A COMPREHENSIVE ASSESSMENT
OF SCLEROSTIN, ARTERIAL CALCIFICATION AND STIFFNESS
IN THE CONTEXT OF CORONARY HEART DISEASE

I.A. Snimshchikova, M.O. Revyakina, N.A. Kabina,
E.V. Mityaeva 336

YOUNG PEOPLE'S REPRODUCTIVE HEALTH
IN RURAL AREAS OF RUSSIA: RESEARCH THROUGH
THE PRISM OF VALUES

**R.V. Chvalun, A.Kh. Malamatov, A.N. Konopleva,
S.S. Asatryan, Ju.G. Lesnykh** 358

COMPARATIVE ASSESSMENT
OF NUTRITIONAL VALUE AND SAFETY OF POTATOES
GROWN ON AGRICULTURAL ENTERPRISES USING
CONVENTIONAL AND ORGANIC TECHNOLOGIES

V.V. Zakrevskii, A.A. Podorvanov 380

ORGANIZATIONAL AND LEGAL ASPECTS
AND PROBLEMS OF REGULATION OF PROVIDING ONCOLOGICAL
CARE TO MILITARY SERVICEMEN (EMPLOYEES)

**P.Yu. Naumov, A.V. Dubinin, A.A. Utyuganov,
R.V. Zelepukin** 397

INTERDISCIPLINARY RESEARCH

STUDY OF THE EFFECT OF GAMMA
RADIATION ON THE ANTIBIOTIC ACTIVITY OF OSMOTIC
MICROBIOTA IN SOME TYPES OF URBECHS

R.T. Timakova, A.A. Khlopov, E.S. Lybenko, S.O. Nikitin 424

EFFICACY OF SOLID DISPERSION OF FENBENDAZOLE
AND IVERMECTIN BASED ON LICORICE EXTRACT
FOR THERAPY OF SHEEP WITH PARASITIC INVASIONS

**V.A. Marchenko, S.S. Khalikov, Yu.A. Vasilenko, E.A. Efremova,
M.S. Khalikov, M.M. Ilyin, A. Sazmand** 453

EXPERIENCE OF REGIONS

THE REGIONAL COMMUNITY'S REQUEST
FOR THE QUALITY OF FARM FOOD (BASED ON THE EXAMPLE
OF RESIDENTS OF THE STAVROPOL KRAI,
RUSSIAN FEDERATION)

**V.A. Ivashova, D.I. Gritsai, L.I. Vysochkina,
A.P. Isayenko, V.V. Reimer** 480

SCIENTIFIC REVIEWS AND REPORTS**POSSIBILITIES OF USING PROTEIN ELECTROPHORESIS TO ASSESS
METABOLISM IN HORSES (LITERATURE REVIEW)****M.M. Atroshchenko, Yu.A. Marsyanova 500****ANALYSIS OF GLOBAL BARLEY PRODUCTION ACCORDING
TO THE STATISTICAL DATA OF THE FOOD AND AGRICULTURAL
ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS****I.A. Aksenov, G.A. Trunin, M.S. Fabrikov, M.S. Lisyatnikov,
E.S. Prusov, S.I. Roshchina, M.A. Dubrovin 529****REALIZATION OF BOS TAURUS REPRODUCTIVE CAPACITY
BY MEANS OF HORMONAL REGULATION (REVIEW)****A.N. Frolov, O.A. Zavyalov, T.B. Aldyarov, E.S. Medetov,
Z.A. Galieva 557****CAUSES OF EMERGENCE, MECHANISMS,
RATE OF DEVELOPMENT, PATHWAYS OF SPREAD,
AND CONSEQUENCES OF ANTIBIOTIC RESISTANCE****P.A. Vedeneyev, A.V. Buhler, I.A. Lebedeva, E.G. Kovaleva 579****GENES OF WOODY PLANTS INVOLVED IN THE FORMATION
OF DROUGHT AND SALT TOLERANCE****A.V. Tretaykova, V.O. Malov, P.A. Krylov 614****RULES FOR AUTHORS 634**

Подписано в печать 31.08.2025. Дата выхода в свет 31.08.2025. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 46,17. Тираж 50 экз. Свободная цена. Заказ SJLSA173/025. 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.