

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

Siberian journal **of Life Sciences and Agriculture**

SjLSA

www.discover-journal.ru



Volume 18, Number 1
2026

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

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

**Volume 18, Number 1
2026**

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

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

Красноярск 2026



Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

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

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

Том 18, № 1, 2026 / Vol. 18, No 1, 2026

Учредитель и издатель:

ООО Научно-инновационный центр

Журнал основан в 2008 году

Зарегистрирован в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
Регистрационный номер:
серия ЭЛ № ФС 77-89425 от 20.05.2025 г.

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

Индексирование и реферирование:

Scopus
РИНЦ
Ulrich's Periodicals Directory
Cyberleninka
Google Scholar
ВИНИТИ РАН
DOAJ
BASE
EBSCO
WorldCat
OpenAIRE
ЭБС IPRbooks
ЭБС Znanium
ЭБС Лань

Адрес редакции, издателя и для корреспонденции:

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

+7 (995) 080-90-42

Founder and publisher:

Science and Innovation Center
Publishing House

Founded 2008

Mass media registration certificate
EL № FS 77 - 89425,
issued May 20, 2025.

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

Indexing and Abstracting:

Scopus
RSCI
Ulrich's Periodicals Directory
Cyberleninka
Google Scholar
VINITI Database RAS
DOAJ
BASE
EBSCO
WorldCat
OpenAIRE
IPRbooks
Znanium
Lan'

Editorial Board Office:

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

+7 (995) 080-90-42

Свободная цена

© Научно-инновационный центр, 2026

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

сударственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 Agro Technical Research University (Astana, Republic of Kazakhstan)

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

Konstantin S. Ostrenko, Doctor of Biological Sciences, L.K. Ernst 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-Yasnetsky (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

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1389](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1389)

EDN: FFEFVY

УДК 636.5.033: 636.03:612.1:591:4



Метаболомный профиль сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres: ассоциации с составом кишечного микробиома и показателями продуктивности

Д.Г. Дерябин¹, Л.В. Власенко¹, И.Ф. Каримов^{1,2}, Г.К. Дускаев¹¹ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН, Оренбург, Российская Федерация²ФГБОУ ВО ОрГМУ Минздрава России, Оренбург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Комплексный анализ метаболических параметров сыворотки крови (метаболома) становится востребованным инструментом оценки физиологического состояния организма сельскохозяйственной птицы.

Целью исследования является характеристика наиболее значимых метаболитов крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres с определением их ассоциаций с составом кишечного микробиома и показателями продуктивности.

Материалы и методы. В исследование включены 28 групп цыплят-бройлеров, находившихся на базовом рационе, а также получавших различные кормовые добавки (пробиотики, антибиотики, малые молекулы растительного происхождения). Метаболомный профиль сывороток крови исследован с использованием коммерческих наборов для ветеринарии «ДиаВетТест» (ДИАКОН-ДС, Россия). Состав кишечного микробиома оценен на основе высокопроизводительного секвенирования на платформе MiSeq (Illumina Inc., США).

Результаты. Анализ ассоциаций сывороточных маркеров и морфологических показателей цыплят-бройлеров позволил зафиксировать четыре значимые взаимосвязи: положительную в паре «креатинин – мясная продуктивность» и отрицательные в парах «мочевина – масса несъедобной части тушки», «глюкоза – масса печени» и «холестерин – убойный выход». Сопоставление характеристик метаболома и состава кишечного микробиома показало множественные ассоциации, связывающие бактериальное сообщество с сывороточными уровнями малонового диальдегида, билирубина, мочевой кислоты и мочевины.

Заключение. Полученные результаты развивают представления о метаболических индикаторах, пригодных для мониторинга эффективности режимов содержания и кормления цыплят-бройлеров, а также впервые характеризуют мочевины, как маркер продуктивности, уровень которого может контролироваться через воздействие на кишечный микробиом сельскохозяйственной птицы.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры; метаболом; микробиом; сельскохозяйственная продуктивность

Для цитирования. Дерябин, Д. Г., Власенко, Л. В., Каримов, И. Ф., & Дускаев, Г. К. (2026). Метаболомный профиль сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres: ассоциации с составом кишечного микробиома и показателями продуктивности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 11–39. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1389>

Serum metabolomic profile in Arbor Acres broiler chickens: associations with gut microbiome composition and productivity performance

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

¹FSSI FRC BST RAS, Orenburg, Russian Federation

²Orenburg State Medical University, Orenburg, Russian Federation

Abstract

Background. Comprehensive analysis of the serum metabolite profile (metabolome) is becoming a popular tool for assessing the physiological state of agricultural poultry.

The purpose of this study was to assess the most significant blood metabolites in Arbor Acres broiler chickens and determine their associations with gut microbiome composition and performance indicators.

Materials and methods. The analysis included 28 broilers chicken's groups fed a basal diet and also receiving various feed additives (probiotics, antibiotics, small plant-derived compounds). The metabolite profile of blood serum was determined using commercially available “DiaVetTest” veterinary kits (DIAKON-DS, Russia). The gut microbiome composition was assessed based on high-throughput sequencing method using the MiSeq platform (Illumina Inc., USA).

Results. Correlation analysis revealed four statistically significant associations between serum markers and chicken productivity indicators: a positive one in the pair “creatinine – meat productivity” and a negative one in the pairs “urea – weight of inedible carcass part”, “glucose – liver weight” and “cholesterol – slaughter yield”. In turn, comparison of the metabolite profile and the gut microbiome composition showed multiple

associations linking the bacterial community with serum concentrations of malondialdehyde, bilirubin, uric acid, and urea.

Conclusion. The study results expand the understanding of metabolic indicators for monitoring poultry productivity and also for the first time characterize urea as a performance marker that can be controlled via influences on the chicken gut microbiome.

Keywords: broiler chickens; serum metabolome; gut microbiome; agricultural productivity

For citation. Deryabin, D. G., Vlasenko, L. V., Karimov, I. F., & Duskaev, G. K. (2026). Serum metabolomic profile in Arbor Acres broiler chickens: associations with gut microbiome composition and productivity performance. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 11–39. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1389>

Введение

Кровь является жидкой подвижной соединительной тканью внутренней среды организма, выполняющей важнейшие транспортные функции: разносящей необходимые питательные вещества к органам и тканям, а также осуществляющей обратный перенос образующихся продуктов распада [14]. При этом в настоящее время среди переносимых соединений отдельное внимание обращено на малые (массой менее 1000 Да) молекулы, представляющие собой ключевые метаболиты углеводного, липидного и белкового обмена, объединяемые общим понятием «метаболом» [38]. В основе же основанной на этом дисциплины – метаболомики – лежит концепция, согласно которой состав метаболитов крови может достаточно точно характеризовать различные аспекты физиологического или патологического состояния целостного организма [42].

Современные методы исследования позволяют определять в крови сельскохозяйственной птицы до 7191 отдельных метаболитов [49], среди которых наибольшее значение отводится глюкозе (маркер углеводного обмена); холестерину, триглицеридам и малоновому диальдегиду (маркеры липидного обмена); мочеvine, мочевой кислоте и креатинину (маркеры белкового обмена) [35], а также билирубин, образующемуся при распаде гем-содержащих белков и в дальнейшем в составе желчи оказывающему воздействие на процесс кишечного пищеварения. В свою очередь известные примеры использования стандартной или расширенных аналитических панелей уверенно демонстрируют ассоциации метаболомного профиля сыворотки крови с потреблением корма и продуктивностью [33], качеством куриного мяса [18], а также морфологическими характеристиками тушек цыплят-бройлеров [9].

Традиционный взгляд на образование и удаление метаболитов сывотки крови связывает их с особенностями генома сельскохозяйственных животных, кодирующего ключевые ферментативные пути биосинтеза и катаболизма [37]. При этом использование геномного и транскриптомного анализа позволяет объяснить особенности метаболомных профилей генетически различных пород/кроссов кур, а также их ассоциации с вкусовыми различиями мяса [31] и показателями яйценоскости [44].

Новым аспектом обсуждаемой проблемы является образование некоторых метаболитов в просвете пищеварительного тракта с участием нормальной микрофлоры, объединяемой понятием «микробиом», и в дальнейшем поступающих в кровь в неизменном или модифицированном состоянии через стенку кишечника [27]. Подобный подход позволил дать аргументированное объяснение изменению метаболомов между отдельными экспериментальными сериями, предусматривающими воздействие на микробиом сельскохозяйственной птицы с использованием антибиотиков [19], пробиотиков и пребиотиков [51], а также различных кормовых добавок [40].

В целом совокупность накопленных данных свидетельствуют в пользу существования оси «микробиом – метаболом – продуктивность», однако исследования в этом направлении относительно немногочисленны [53] и не охватывают большинство распространенных пород/кроссов

В этой связи *целью* настоящего интегративного исследования является характеристика наиболее значимых метаболитов крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres с последующим анализом их ассоциаций с составом кишечного микробиома и хозяйственно-полезными морфологическими параметрами тела птицы.

Материалы и методы исследования

В исследование включены 28 групп цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres (Aviagen LLC, Россия) численностью 15-30 голов каждая. Птицы 5 контрольных групп получали только двухфазный базовый рацион, рекомендуемый производителем кросса [16]. Разнообразие состава микробиомов, метаболомов и показателей продуктивности птиц 23 экспериментальных групп достигалось введением в аналогичные схемы кормления пробиотической добавки на основе бактерий рода *Bacillus* [24], антибиотика хлортетрациклина [4; 5], а также химически-синтезированных аналогов малых молекул растительного происхождения: гамма-октанолактона, производного кумарина, ванилина/ванилиновой кислоты, гексилрезорцинола и

кверцетина [4; 5; 6; 7; 23; 24; 48]. Содержание птиц осуществлялось в соответствии с нормативами, оговорёнными в Модельном законе Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», ст.20, № 29-17 от 31.10.2007 г. Детали экспериментов описаны в публикациях [4; 5; 6; 7; 23; 24; 48].

Количественное определение анализируемых параметров проведено в соответствии с принципами надлежащей лабораторной практики, описанными в Национальном стандарте Российской Федерации, ГОСТ Р 53434-2009 [13].

Забор крови для *метаболического анализа* проводился в 42-суточном возрасте из подкрыльцовой вены в вакуумные пробирки с коагулянтом – активатором свертывания (Zhejiang Gongdong Medical Technology Co, Ltd, Китай), после чего сыворотку крови отделяли центрифугированием при 1500 об/мин. Определение ключевых метаболитов: глюкозы, холестерина, триглицеридов, мочевины, мочевой кислоты, креатинина и билирубина проводилось на автоматическом анализаторе CS-T240 (DIRUI Industrial Co, Ltd, Китай) с использованием коммерческих наборов для ветеринарии ДиаВетТест производства ООО «ДИАКОН-ДС» (Россия). Для определения малонового диальдегида проводился тест с тиобарбитуровой кислотой [1] с последующей регистрацией окрашенных продуктов на биохимическом анализаторе Stat Fax 1904 Plus (Awareness Technology, США).

После забора крови для оценки предубойной живой массы птицы взвешивались на прецизионных электронных весах и гуманно забивались с последующей анатомической разделкой тушек [15]. Определяемыми *параметрами продуктивности* цыплят-бройлеров были: масса полупотрошенной и потрошенной тушки; вес грудных, бедренных и других мышц; вес внутренних органов (печень, селезенка, почки); вес костей; на основании чего дополнительно рассчитывались убойный выход, масса съедобной и несъедобной частей тушки, а также их соотношение.

В каждой из контрольной и опытной групп у случайно выбранных цыплят-бройлеров было проведено препарирование кишечника, после чего содержимое парных слепых кишок было асептически отداвлено в стерильные криогенные пробирки, быстро заморожено в сухом льду и помещено на хранение при температуре -80°C в морозильной камере 803CV (Thermo Fisher Scientific, Германия).

При проведении *метагеномного анализа* из отобранных проб была изолирована тотальная ДНК с использованием наборов Fast DNA SPIN Kit for Feces (MP Biomedicals Inc., США) или QIAamp Fast DNA Stool Mini Kit

(Qiagen GmbH, Германия). Качество выделенной ДНК оценивали с помощью электрофореза в 1% агарозном геле, а концентрацию ДНК определяли с помощью набора для высокочувствительного анализа dsDNA на флуориметре Qubit 4 (Life Technologies, США). Дальнейшая подготовка библиотек ДНК, ориентированных на область V3-V4 гена 16S рРНК, а также их высокопроизводительное парное секвенирование 2×250 п.н. на платформе MiSeq (Illumina Inc., США) выполнено с использованием соответствующих наборов реагентов в соответствии с рекомендациями производителя.

Статистический анализ полученных результатов выполнен с использованием программного пакета Statistica 8.0 (StatSoft Inc., США); первичные и производные данные сохранялись с использованием многофункционального приложения для работы с электронными таблицами. Microsoft Excel 2019 (Microsoft, США).

Результаты исследования и их обсуждение

Проведение комплексного биохимического анализа крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres позволило количественно охарактеризовать сывороточные концентрации ключевых маркеров углеводного, липидного и белкового метаболизма, представив их в формате медианных [Q1–Q3] значений (табл. 1).

Таблица 1.

Метаболический профиль цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres

Table 1. Metabolic profile of Arbor Acres crossbred broiler chickens

Определяемые параметры	Единицы измерений	Медиана	Q1-Q3	Референсные значения РФ*	Референсные значения международные**
Маркер углеводного метаболизма					
Глюкоза	ммоль/л	12,41	11,73–13,33	11,43–27,03	3,22–18,93
Маркеры липидного метаболизма					
Холестерин	ммоль/л	3,21	2,88–3,49	1,99–6,04	0,54–3,88
Триглицериды	ммоль/л	0,31	0,26–0,41	0,43–5,23	0,19–1,82
Малоновый диальдегид	мкмоль/л	1,62	1,37–1,90	нд	нд
Маркеры белкового метаболизма					
Креатинин	мкмоль/л	36,87	27,29–52,70	9,00–53,00	17,68–43,40
Мочевина	ммоль/л	0,64	0,30–0,89	нд	нд
Мочевая кислота	мкмоль/л	132,62	102,49–191,10	167,00–298,00	130,00–830,00

Прочие маркеры					
Билирубин общий	мкмоль/л	0,65	0,49–3,66	2,00–27,00	нд
Билирубин прямой	мкмоль/л	0,44	0,34–0,58	7,00–10,00	нд

Примечания: * – в соответствии с инструкциями к наборам биохимических реагентов для ветеринарии «Глюкоза ДиаВетТест», «Холестерин ДиаВетТест», «Триглицериды ДиаВетТест», «Креатинин ДиаВетТест», «Мочевая кислота ДиаВетТест», «Билирубин общий ДиаВетТест», «Билирубин прямой ДиаВетТест»; ** – в соответствии со значениями, рекомендуемыми для взрослого поголовья кросса Arbor Acres [17], значения конвертированы в ммоль/л и мкмоль/л из г/л и мг/л; нд – референсные значения отсутствуют.

Сравнение полученных величин с референсными диапазонами концентраций данных аналитов, рекомендуемыми разработчиком коммерческих наборов для их определения (ООО «ДИАКОН-ДС», Россия) или аналогичными значениями, приводимыми в зарубежных литературных источниках [17], свидетельствовало о нахождении глюкозы и холестерина в пределах физиологической нормы. На этом фоне содержание триглицеридов и мочевой кислоты в ряде случаев оказывалось ниже российских референсных значений, указываемых для поголовья кур безотносительно их принадлежности к определенному кроссу, но соответствовало диапазонам нормальных значений, указываемых в международных источниках именно для взрослого поголовья кросса Arbor Acres. В свою очередь соответствующие российским нормативам концентрации креатинина в ряде экспериментальных серий несколько превышали таковые, рекомендуемые для цыплят-бройлеров использованного кросса. Для ряда метаболитов (малоновый диальдегид, мочевины) соответствующие референсные значения на момент проведения исследования отсутствовали.

Отдельным наблюдением являлась относительная независимость большинства определяемых маркеров, исключаяющая их дублирующую функцию при описании метаболома. Единичными исключениями являлась взаимосвязь между концентрациями общего и прямого билирубина ($r=+0,76$; $p<0,001$), а также положительная корреляция присутствия мочевины и мочевой кислоты ($r=+0,62$; $p<0,001$), последняя из которых является у птиц продуктом не только пуринового, но и белкового обмена.

Учет морфологических параметров цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres подтвердил представления об их высокой продуктивности, сопоставимой с таковой у быстрорастущего кросса Cobb 500 [22] и несколько

превосходящей аналогичные показатели кросса Росс 308 [9]. В частности, предубойная живая масса птиц варьировала в диапазоне Q1–Q3 [2723,42–3122,63] г с медианным значением 2894,67 г, что соответствовало, а в ряде экспериментальных серий несколько превосходило нормативное значение названного параметра (2751,00 г), рекомендуемого для смешанного поголовья кросса Arbor Acres [11]. Последующая процедура разделки приводила к значениям веса полупотрошенной тушки 2440,46 [2305,10–2668,00] г и потрошенной тушки на уровне 1891,06 [1816,43–2073,88] г. Общая мясная продуктивность характеризовалась значением 1222,61 [1182,96–1341,61] г при общей массе костной ткани равной 563,64 [501,51–591,21] г. Масса внутренних органов – печени, почек и селезенки равнялась 53,81 [50,89–60,19] г, 18,81 [18,02–21,25] г и 3,16 [3,02–3,45] г, соответственно. Рассчитанные на данной основе интегральные параметры, оценивающие вес съедобной и несъедобной частей тушки, составили 2027,14 [1899,44–2213,83] г и 807,85 [728,61–849,11] г, а базирующийся на этом показатель убойного выхода показал значение 66,34 [66,00–67,53] %.

Последующий анализ ассоциаций сывороточных маркеров и морфологических показателей цыплят-бройлеров в исследуемых группах позволил зафиксировать четыре коэффициента корреляции с уровнем значимости $p < 0,05$ (рис. 1).

Положительная зависимость установлена в паре «креатинин – мясная продуктивность» ($r = +0,41$; $p = 0,025$) (рис. 1А), что хорошо согласуется с представлениями о данном метаболите как маркере качества и количества мышечной ткани у сельскохозяйственных животных, в частности – бычков мясных пород [52] и свиней разных генотипов [8]. При этом принципиальной основой для подобного взгляда на креатинин является его непосредственная связь с метаболизмом креатина, играющего ключевую роль в энергетическом обмене мышечной и некоторых других видов тканей [41].

На этом фоне другой маркер белкового (азотистого) обмена – мочевины, продемонстрировал тенденцию к прямой ассоциации с массой съедобной части тушки и обратной – с массой её несъедобной части, что в последнем случае характеризовалось статистически значимым отрицательным коэффициентом корреляции $r = -0,37$; $p = 0,043$ (рис. 1Б). Тем самым полученный результат расширяет представления о мочедине как метаболите, характеризующем напряженность белкового обмена, положительно коррелирующем с содержанием общего белка сыворотки крови [12] и в соотношении к креатинину прямо связанном с показателями мясной продуктивности цыплят-бройлеров [9].

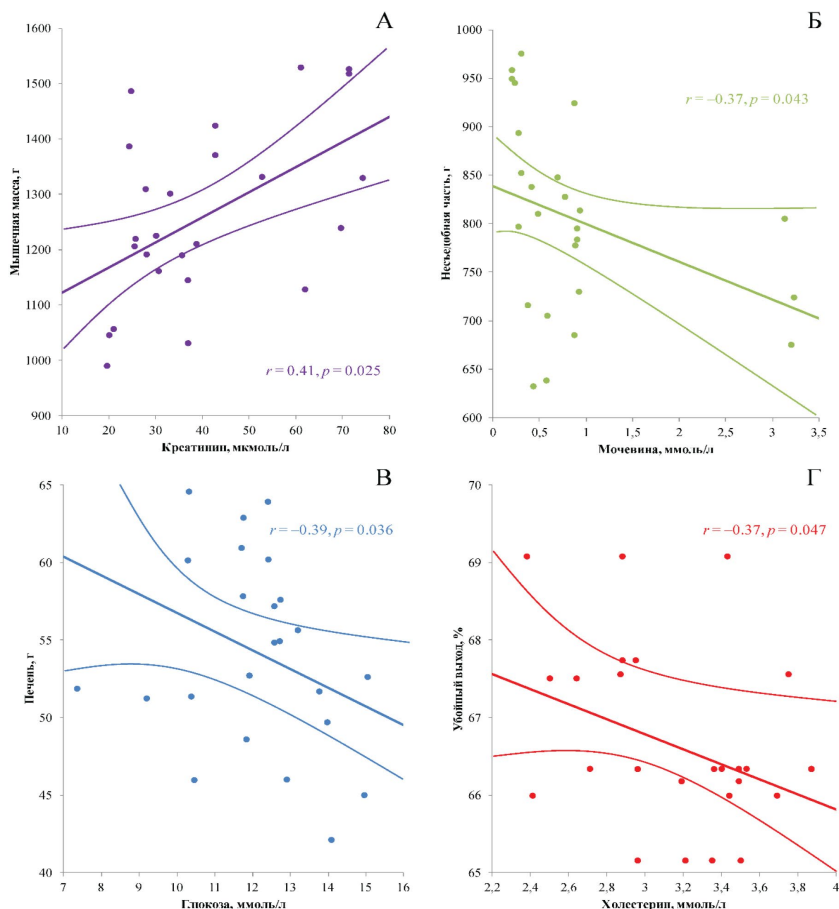


Рис. 1. Ассоциации между биохимическими маркерами сыворотки крови (а – креатинин; б – мочевины; в – глюкоза; г – холестерин) и морфологическими показателями цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres (а – мышечная масса; б – несъедобная часть тушки; в – печень; г – убойный выход).

Fig. 1. Associations between serum biochemical markers (a – creatinine; b – urea; c – glucose; d – cholesterol) and morphological parameters of Arbor Acres crossbred broiler chickens (a – muscle mass; b – inedible carcass parts; c – liver; d – dressing yield).

Третьей значимой зависимостью являлась обратная корреляция массы печени от сывороточной концентрации маркера углеводного обмена – глюкозы: $r = -0,39$; $p = 0,036$ (рис. 1В), вероятно отражающая эффективность

конверсии данного мономера в гепатоцитах в коллоидальный полисахарид – гликоген [10].

Еще одним интересным наблюдением стало обнаружение обратной корреляции между показателем убойного выхода и сывороточной концентрацией одного из маркеров липидного обмена – холестерина: $r=-0,37$; $p=0,047$ (рис. 1Г), что по нашим наблюдениям определялось значительным накоплением абдоминального жира, удаляемого при потрошении тушки.

Тем самым совокупность полученных данных позволила определить информативные биохимические маркеры, пригодные для мониторинга ряда параметров продуктивности цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres, в том числе при поиске оптимальных режимов их кормления и содержания [47]. Одновременно эти же данные характеризуют обнаруженные взаимосвязи как корреляции умеренной (средней) степени значимости (в диапазоне значений от 0,3 до 0,5) в соответствии с чем названные биохимические параметры должны рассматриваться как влияющие на соответствующие параметры продуктивности, но не являющиеся основными драйверами их формирования.

С целью идентификации метаболических маркеров, частично или полностью контролируемых соответствующей биохимической активностью микробного сообщества пищеварительного тракта цыплят-бройлеров, на завершающем этапе исследования метаболомный профиль сыворотки крови был сопоставлен с составом кишечного микробиома (метагенома).

В итоге проведения множественного параллельного секвенирования переменных участков гена 16S рПНК и последующего биоинформатического анализа в исследуемых микробиомах установлено существенное доминирование филума (типа) *Bacillota*, на наиболее детализированном таксономическом уровне представленного 76 бактериальными родами. Названный филум обнаружен в 100% анализируемых проб, занимая 75,65 [58,00–81,58] % от общей численности идентифицированных прочтений. В свою очередь второй по численности филум – *Bacteroidota*, представленный 8 родами, также обнаруживался во всех без исключения микробиомах, формируя 22,18 [13,49–41,19] % их относительной численности. На этом фоне еще четыре филума (*Actinomycetota*, *Pseudomonadota*, *Cyanobacteriota* и *Thermodesulfobacteriota*) были охарактеризованы как «минорные» компоненты кишечного микробиома, обнаруживаемые не менее чем в 50% анализируемых проб, но составляющие менее процента от их относительной численности. Наконец еще два филума – *Mycoplasmata* и *Verrucomicrobiota* – показали себя как случайные/транзиторные обита-

тели кишечника цыплят-бройлеров Arbor Acres, будучи представленными только одним родом каждый и встречаясь только в 35,71–39,29% анализируемых проб с относительной численностью $\leq 0,01\%$.

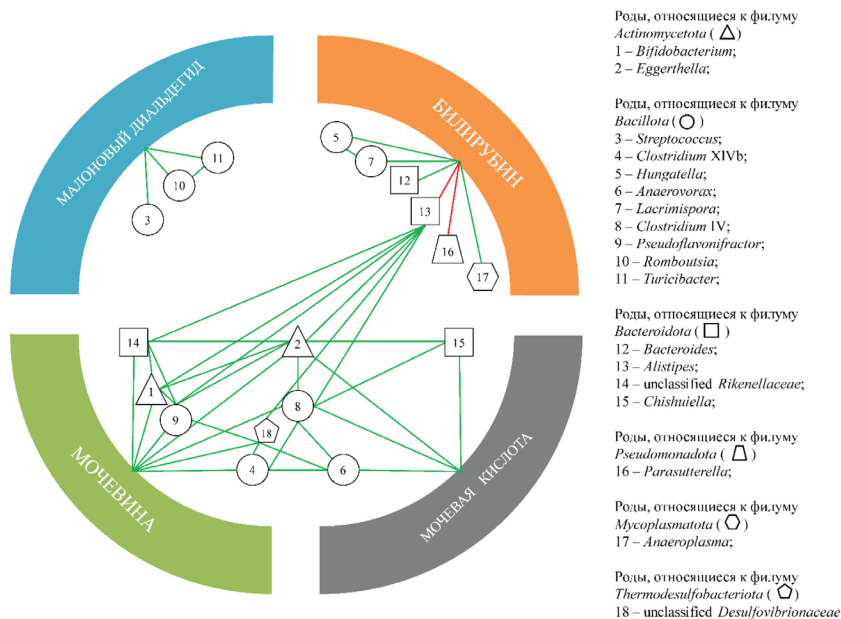


Рис. 2. Ассоциации (прямые – выделены зеленым цветом; обратные – выделены красным цветом), связывающие присутствие определенных бактериальных таксонов (1-18) с повышенным уровнем ряда метаболитов в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres

Fig. 2. Associations (forward—highlighted in green; reverse—highlighted in red) linking the presence of certain bacterial taxa (1–18) to elevated levels of various metabolites in the blood serum of Arbor Acres crossbred broiler chickens

Полученные данные о присутствии отдельных родов бактерий в кишечных микробиомах были сопоставлены с уровнями анализируемых метаболитов у птиц тех же групп с расчетом связывающих их коэффициентов корреляции. В результате статистически значимые ассоциации ($p < 0,05$) были зафиксированы для 4 метаболитов (малонового диальдегида, билирубина, мочевины и мочевой кислоты), уровень каждого из которых коррелировал с тремя или более бактериальными таксонами (рис. 2). При этом 14 из 18 родов, показавших ассоциации с названными метаболитами, также формировали между собой дополнительные корреляционные

сети, что свидетельствовало в пользу их функционирования как единого микробного сообщества.

Повышенное содержание малонового диальдегида, образующегося в результате перекисного окисления полиненасыщенных жирных кислот [30], оказалось положительно ассоциированным с присутствием трех бактериальных родов – *Streptococcus*, *Romboutsia* и *Turicibacter*, на наиболее высоком таксономическом уровне отнесенных к филуму *Bacillota*. Подобный эффект стрептококков мог определяться их способностью к инициации воспаления, сопровождающегося развитием окислительного стресса [34], а аналогичное действие рода *Turicibacter* объяснялось сходной активностью его полисахарида, инициирующего генерацию значительных количеств активных форм кислорода [39]. На этом фоне проокислительная активность рода *Romboutsia*, известного своей способностью к утилизации углеводов, ферментации отдельных аминокислот и анаэробному дыханию [28], оказывается значительно менее понятной и может быть техническим следствием его совместного обнаружения с представителями рода *Turicibacter*.

Уровень сывороточного билирубина показал множественные ассоциации с шестью бактериальными таксонами, в том числе положительные – с родами *Hungatella* и *Lacrimispora* (филум *Bacillota*), *Bacteroides* (филум *Bacteroidota*) и *Anaeroplasma* (филум *Mycoplasmata*). Тем самым полученные данные согласуются с накапливающимися данными о важной роли кишечной микробиоты в метаболизме билирубина [50], объясняемом наличием у многих обнаруживаемых здесь бактерий (например, бактероидов) фермента билирубинредуктазы [29]. Катализируемая им реакция превращения билирубина в уробилиноген (стеркобилиноген) замыкает кишечно-печеночный цикл обращения данного метаболита и формирует механизм «двойного контроля» его содержания в сыворотке крови.

На этом фоне наиболее многочисленные ассоциации, связывающие микробное сообщество кишечника цыплят-бройлеров и метаболиты сыворотки крови, установлены для мочевины и мочевой кислоты. При этом два таксона: род *Eggerthella* (филум *Actinomycetota*) и род *Clostridium IV* (филум *Bacillota*) прямо коррелировали с высоким сывороточным содержанием обоих метаболитов, а еще семь бактериальных родов формировали с их участием корреляционную плеяду с обильными внутренними взаимосвязями.

Проведенный для устранения подобной мультиколлинеарности множественный регрессионный анализ связал повышение сывороточных концентраций мочевины с преимущественным присутствием в кишечном микробиоме представителей родов *Eggerthella* ($p=8,91 \times 10^{-10}$) и

Anaerovorax ($p=3,21 \times 10^{-7}$). При этом расчет коэффициента детерминации (R^2) данной модели свидетельствовал о том, что содержание мочевины в сыворотке цыплят-бройлеров почти исключительно определялось составом их кишечного микробиома: $R^2=0,906$ ($p=1,45 \times 10^{-13}$).

Полученные результаты развивают представления об аммонифицирующем сообществе кишечника птицы как важном источнике мочевины [32], после всасывания через стенку кишечника становящейся основой для синтеза широкого спектра заменимых аминокислот [36]. При этом накапливающиеся данные позволяют связать образование мочевины с разнообразными путями метаболизма аминокислот, обнаруженными у протеолитических клостридий [25], аргининдезаминазной активностью *Eggerthella spp.* [46], а также анаэробным расщеплением путресцина с участием *Anaerovorax spp.* [43].

В контексте настоящего исследования также важно, что для трех метаболитов (глюкозы, холестерина и креатинина), показавших значимость в определении ряда параметров продуктивности цыплят-бройлеров (см. выше), ассоциации с составом кишечного микробиома не обнаруживались, что формирует их оценку как гомеостатических параметров, контролируемых исключительно собственными ферментативными активностями организма птицы без участия микробного сообщества.

Заключение

Проведенный анализ впервые позволил получить комплексные представления о профиле ключевых метаболитов углеводного, липидного и белкового обмена в сыворотке крови кросса Arbor Acres, связав его с показателями продуктивности, а также установив значимые ассоциации метаболома с композицией микробиома кишечника птицы.

В условиях недостаточности данных о нормативных значениях проанализированных показателей у смешанного поголовья исследованного кросса [17] совокупность полученных результатов может стать важным шагом к определению соответствующих научно обоснованных референсных значений. Указанное обстоятельство формирует перспективу продолжения исследований в данном направлении, в том числе с идентификацией нормальных диапазонов варьирования метаболических маркеров в зависимости от пола и возраста птицы, а также других параметров, рекомендуемых при решении подобного рода задач [26].

Сопоставление сывороточных концентраций анализируемых метаболитов и морфологических параметров тела цыплят-бройлеров крос-

са Arbor Acres позволило установить четыре значимые ассоциации (рис. 3). При этом существующие представления об информативных маркерах (креатинин, мочевина, глюкоза и холестерин), а также механизмах их вовлеченности в обменные процессы в тканях птицы свидетельствуют в пользу причинно-следственного характера выявленных взаимосвязей «маркер-параметр». Тем самым полученный результат обосновывает направленное использование выбранных метаболических маркеров при разработке оптимальных режимов содержания и кормления цыплят-бройлеров [3], а также проведении селекционной работы в отношении сельскохозяйственной птицы разных направлений продуктивности [2].

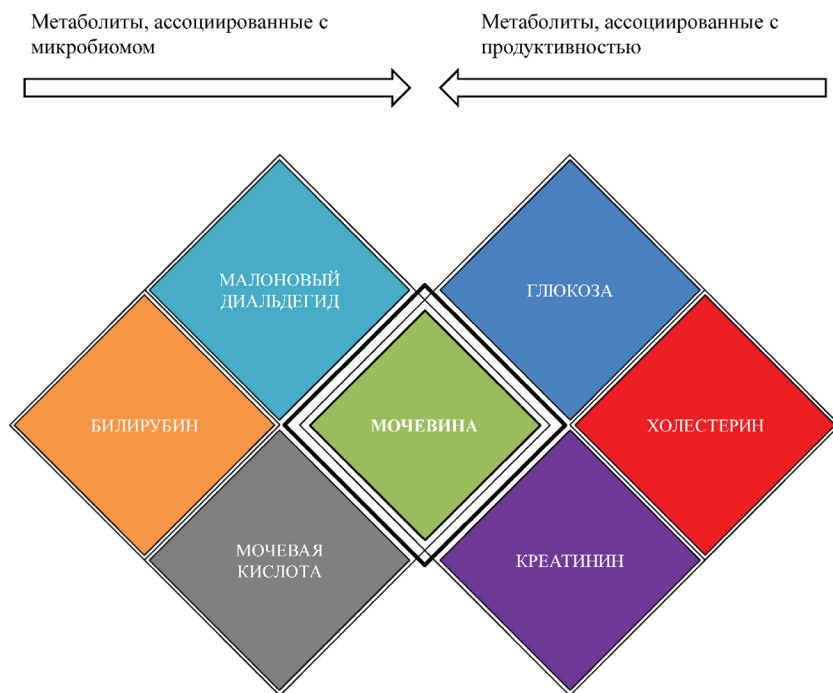


Рис. 3. Метаболические параметры крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres, контролируемые составом их кишечного микробиома (слева) и ассоциированные с показателями сельскохозяйственной продуктивности (справа).

Fig. 3. Metabolic parameters in the blood of Arbor Acres crossbred broiler chickens, influenced by the composition of their gut microbiome (left) and associated with indicators of agricultural productivity (right).

На этом фоне обнаружение значимых ассоциаций между бактериальным сообществом кишечника цыплят-бройлеров и сывороточным содержанием некоторых маркеров (малоновый диальдегид, билирубин, мочевины и мочевая кислота) развивает представления о микробиоме как новом «органе», существенно расширяющем метаболический потенциал организма птицы за пределы его генетических возможностей [21]. При этом в обсуждаемом контексте наиболее принципиальным представляется ведущее участие микробиома в определении сывороточного уровня мочевины, являющейся одним из ключевых метаболитов белкового обмена и за счет этого ассоциированной с хозяйственно-полезными показателями продуктивности (рис. 3).

Отдельный практически-ориентированный результат проведенного исследования заключается в позиционировании мочевины как перспективного источника небелкового азота в птицеводстве [20], а базирующиеся на этом рекомендации предполагают два основных пути реализации. Во-первых, позитивные эффекты могут быть достигнуты при прямом введении мочевины и содержащих её субстратов в рационы цыплят-бройлеров [45], особенно, в случаях их нахождения на диетах, обедненных белком. Альтернативный подход заключается во включении в кормовые рационы малых молекул растительного происхождения, которые сами по себе не являются источником азота, но изменяют баланс микробиома кишечника птицы в благоприятном направлении. В частности, существенная стимуляция аммонифицирующего сообщества в пищеварительном тракте цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres с соответствующим повышением уровня сывороточной мочевины и следующей за этим сельскохозяйственной продуктивности достигалась с использованием ванилина, 7-гидроксикумарина (умбеллиферона) и их сочетаний [23].

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

Информация о спонсорстве. Экспериментальные группы, получавшие химически синтезированные аналоги молекул растительного происхождения (гамма-октанолактон, производное кумарина, ванилин/ванилиновая кислота, гексилрезорцин, кверцетин) были проанализированы при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-16-00036-П. Экспериментальные группы, рацион которых включал пробиотические добавки или антибиотик хлортетрациклин, были исследованы в соответ-

ствии с планом НИР ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН FNWZ-2025-0003 (ранее FNWZ-2022-0010).

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

Список литературы

1. Андреева, Л. И., Кожемякин, Л. А., & Кишкун, А. А. (1988). Модификация метода определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой. *Лабораторное дело*, (11), 41–43. EDN: <https://elibrary.ru/SKGPQJ>
2. Боголюбова, Н. В., Некрасов, Р. В., Зеленченкова, А. А., Рыков, Р. А., Колесник, Н. С., Волкова, Н. А., & Ветох, А. Н. (2022). Биохимический профиль организма кур разного направления продуктивности. *Ветеринария и кормление*, (6), 11–15. <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-6-3>. EDN: <https://elibrary.ru/BHDHWV>
3. Вертипрахов, В. Г., Ксенофонтов, Д. А., Колесник, Е. А., & Овчинникова, Н. В. (2022). *Морфо-биохимические исследования крови у сельскохозяйственной птицы* [Учебное пособие]. РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева. ISBN: 978-5-9675-1938-3. EDN: <https://elibrary.ru/RIUBDQ>
4. Дусакаев, Г. К., Рахматуллин, Ш. Г., Косян, Д. Б., Русакова, Е. А., Кван, О. В., & Левахин, Г. И. (2022). Влияние совместного использования гамма-окталактона и хлортетрациклина в рационе бройлеров: живая масса, эффективность использования корма и микробиом слепого кишечника. *Аграрная наука*, (9), 47–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-47-53>. EDN: <https://elibrary.ru/FSEANC>
5. Дусакаев, Г. К., Лазебник, К. С., & Климова, Т. А. (2022). Оценка микробного разнообразия слепого отдела кишечника цыплят-бройлеров при введении ку-марина и кормового антибиотика в рацион. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*, 17(4), 555–566. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-555-566>. EDN: <https://elibrary.ru/FUJJBX>
6. Дусакаев, Г. К., Русакова, Е. А., & Дерябин, Д. Г. (2022). Использование гамма-октанолактона в рационе бройлеров: микробиом кишечника. *Международный вестник ветеринарии*, (4), 152–158. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.152>. EDN: <https://elibrary.ru/XGADAX>
7. Дусакаев, Г. К., Власенко, Л. В., Косян, Д. Б., & Курилкина, М. Я. (2023). Влияние малых молекул растительного происхождения на микробное разнообразие

- слепого отдела кишечника цыплят-бройлеров. *Птицеводство*, (4), 46–51. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-4-46-51>. EDN: <https://elibrary.ru/SASHWF>
8. Еримбетов, К. Т., Обвинцева, О. В., & Михайлов, В. В. (2018). Особенности метаболизма и формирования мясной продуктивности у свиней разных генотипов. *Проблемы биологии продуктивных животных*, (1), 51–63. <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2018.1.51-63>. EDN: <https://elibrary.ru/YRPEPF>
 9. Загарин, А. Ю. (2024). Характеристика корреляционных связей между биохимическими показателями крови и морфологическими особенностями цыплят-бройлеров. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, (4), 140–153. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-4-140-153>. EDN: <https://elibrary.ru/IXDVXC>
 10. Кулебякин, К. Ю., Акопян, Ж. А., Кочегура, Т. Н., & Пеньков, Д. Н. (2016). Механизмы транскрипционного контроля обмена глюкозы в печени. *Сахарный диабет*, 19(3), 190–198. <https://doi.org/10.14341/DM2003436-40>. EDN: <https://elibrary.ru/WKBQLJ>
 11. Aviagen. *Нормативные показатели бройлерного поголовья Arbor Acres Plus*. Получено из <https://fermer.ru/files/v2/forum/152289/17a-aa-broiler-po.pdf>
 12. Пикулик, А. А., Бабичева, И. А., & Сенько, А. Я. (2018). Влияние сочетанного применения тетралактобактерина и йодида калия на концентрацию общего белка и мочевины в сыворотке крови цыплят-бройлеров. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, (5), 271–273. EDN: <https://elibrary.ru/YNDPZZ>
 13. Стандартинформ. (2010). *Принципы надлежащей лабораторной практики*.
 14. Риган, В. Д., Сандерс, Т. Г., & Деникола, Д. Б. (2008). *Атлас ветеринарной гематологии* (Е. Махиянова, Пер.). Аквариум-Принт. ISBN: 978-5-98435-930-6. EDN: <https://elibrary.ru/QKZJZJ>
 15. Салеева, И. П., Лысенко, В. П., Шоль, В. Г., и др. (2015). *Методика проведения исследований по технологии производства яиц и мяса птицы* (В. С. Лукашенко & А. Ш. Кавтарашвили, Ред.). ВНИТИП. ISBN: 978-5-98020-154-8
 16. Aviagen. (2022). *Спецификации бройлерных рационов корма Arbor Acres*. Получено из https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_TechDocs/AA_BroilerNutritionSpecifications2022_RU.pdf
 17. Arzour-Lakehal, N., & Boudebza, A. (2021). Biochemical reference intervals in broiler chickens according to age and strain. *Agricultural Science and Technology*, 13(4), 357–364. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.04.058>. EDN: <https://elibrary.ru/WAELGP>
 18. Beauclercq, S., Nadal-Desbarats, L., Hennequet-Antier, C., Collin, A., Tesseraud, S., Bourin, M., Le Bihan-Duval, E., & Berri, C. (2016). Serum and muscle metabolom-

- ics for the prediction of ultimate pH, a key factor for chicken-meat quality. *Journal of Proteome Research*, 15(4), 1168–1178. <https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.5b01050>
19. Chen, Y., Wang, J., Yu, L., Xu, T., & Zhu, N. (2020). Microbiota and metabolome responses in the cecum and serum of broiler chickens fed with plant essential oils or virginiamycin. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60135-x>. EDN: <https://elibrary.ru/WYYZXP>
20. Chowdhury, S. D., Roy, C. R., & Sarker, A. K. (1996). Urea in poultry nutrition — Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 9(3), 241–245. <https://doi.org/10.5713/ajas.1996.241>
21. Cox, T. O., Lundgren, P., Nath, K., & Thaiss, C. A. (2022). Metabolic control by the microbiome. *Genome Medicine*, 14(80). <https://doi.org/10.1186/s13073-022-01092-0>. EDN: <https://elibrary.ru/PUTJNY>
22. Das, S., & Aminul Islam, M. (2023). Comparative growth, meat yield and blood lipid profiles of Arbor Acres, Cobb 500 and Lohmann broiler strains. *International Journal of Agriculture Environment and Bioresearch*, 8(3), 55–63. <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2023.5828>. EDN: <https://elibrary.ru/ZRZQDP>
23. Deryabin, D. G., Kosyan, D. B., Inchagova, K. S., & Duskaev, G. K. (2023). Plant-derived quorum sensing inhibitors (quercetin, vanillin and umbelliferon) modulate cecal microbiome, reduces inflammation and affect production efficiency in broiler chickens. *Microorganisms*, 11, 1326. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051326>. EDN: <https://elibrary.ru/DTQURZ>
24. Duskaev, G., Kvan, O., Kosyan, D., Rakhmatullin, S., & Levakhin, G. (2021). Coumarin derivative and *Bacillus cereus* change live weight and cecal ecology in broilers. *AIMS Agriculture and Food*, 6(1), 360–380. <https://doi.org/10.3934/agr-food.2021022>. EDN: <https://elibrary.ru/NBMBIY>
25. Fonknechten, N., Chaussonnerie, S., Tricot, S., Lajus, A., Andreesen, J. R., Perchat, N., Pelletier, E., Gouyvenoux, M., Barbe, V., Salanoubat, M., Le Paslier, D., Weissenbach, J., Cohen, G. N., & Kreimeyer, A. (2010). *Clostridium sticklandii*, a specialist in amino acid degradation: revisiting its metabolism through its genome sequence. *BMC Genomics*, 11(555). <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-555>. EDN: <https://elibrary.ru/NYOTGD>
26. Friedrichs, K. R., Harr, K. E., Freeman, K. P., Szladovits, B., Walton, R. M., Barnhart, K. F., & Blanco-Chavez, J. (2012). ASVCP reference interval guidelines: determination of de novo reference intervals in veterinary species and other related topics. *Veterinary Clinical Pathology*, 41(4), 441–453. <https://doi.org/10.1111/vcp.12006>
27. Fujisaka, S., Watanabe, Y., & Tobe, K. (2023). The gut microbiome: A core regulator of metabolism. *Journal of Endocrinology*, 256(3), e220111. <https://doi.org/10.1530/JOE-22-0111>. EDN: <https://elibrary.ru/FCNYKY>

28. Gerritsen, J., Hornung, B., Ritari, J., Paulin, L., Rijkers, G., Schaap, P. J., De Vos, W. M., & Smidt, H. (2019). A comparative and functional genomics analysis of the genus *Romboutsia* provides insight into adaptation to an intestinal lifestyle. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/845511>
29. Hall, B., Levy, S., Dufault-Thompson, K., Arp, G., Zhong, A., Ndjite, G. M., Weiss, A., Braccia, D., Jenkins, C., Grant, M. R., Abeysinghe, S., Yang, Y., Jermain, M. D., Wu, C. H., Ma, B., & Jiang, X. (2024). BilR is a gut microbial enzyme that reduces bilirubin to urobilinogen. *Nature Microbiology*, 9, 173–184. <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01549-x>. EDN: <https://elibrary.ru/UFYZMZ>
30. Hu, W., He, Z., Du, L., Zhang, L., Li, J., Ma, Y., & Bi, S. (2023). Biomarkers of oxidative stress in broiler chickens attacked by lipopolysaccharide: A systematic review and meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 266, 115606. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115606>. EDN: <https://elibrary.ru/QZXKYJ>
31. Indriani, S., Srisakultiew, N., Yuliana, N. D., Yongsawatdigul, J., Benjakul, S., & Pongsetkul, J. (2024). Metabolomic profiles and compositional differences involved in flavor characteristics of raw breast meat from slow- and fast-growing chickens in Thailand. *Poultry Science*, 103(11), 104230. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104230>. EDN: <https://elibrary.ru/IKXEXW>
32. Karasawa, Y. (1989). Ammonia production from uric acid, urea, and amino acids and its absorption from the ceca of the cockerel. *Journal of Experimental Zoology Supplement*, 75–80. <https://doi.org/10.1002/jez.1402520513>
33. Karisa, B. K., Thomson, J., Wang, Z., Li, C., Montanholi, Y. R., Miller, S. P., Moore, S. S., & Plastow, G. S. (2014). Plasma metabolites associated with residual feed intake and other productivity performance traits in beef cattle. *Livestock Science*, 165, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.03.002>
34. Kırbaş, A., Kaman, R., Merhan, O., Bozukluhan, K., Değirmençay, S., & Sertaç, M. (2021). Evaluation of acute phase response and oxidative damage in sheep naturally infected with *Streptococcus Pluranimalium* using haptoglobin, nitric oxide, and malondialdehyde levels. *Firat University Veterinary Journal of Health Sciences*, 35(3), 145–150.
35. Krasnodebska-Depta, A., & Koncicki, A. (2000). Physiological values of selected serum biochemical indices in broiler chickens. *Medycyna Weterynaryjna*, 56(7), 456–460.
36. Lee, D. J. (1977). Urease activity in the digestive tract of the chick and its role in the utilisation of urea as a source of non-amino nitrogen. *British Poultry Science*, 18(4), 449–458. <https://doi.org/10.1080/00071667708416385>
37. Li, J., Akanno, E. C., Valente, T. S., Abo-Ismael, M., Karisa, B. K., Wang, Z., & Plastow, G. S. (2020). Genomic heritability and genome-wide association studies

- of plasma metabolites in crossbred beef cattle. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.538600>. EDN: <https://elibrary.ru/CNXOGS>
38. Lichtenberg, S., Trifonova, O. P., Maslov, D. L., Balashova, E. E., & Lokhov, P. G. (2021). Metabolomic laboratory-developed tests: current status and perspectives. *Metabolites*, 11(7), 423. <https://doi.org/10.3390/metabo11070423>. EDN: <https://elibrary.ru/RETLGK>
39. Lin, T.-C., Soorneedi, A., Guan, Y., Tang, Y., Shi, E., Moore, M. D., & Liu, Z. (2023). Turicibacter fermentation enhances the inhibitory effects of Antrodia camphorata supplementation on tumorigenic serotonin and Wnt pathways and promotes ROS-mediated apoptosis of Caco-2 cells. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1203087. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1203087>. EDN: <https://elibrary.ru/WSUGZQ>
40. Liu, T., Ruan, S., Mo, Q., Zhao, M., Wang, J., Ye, Z., Chen, L., & Feng, F. (2023). Integrated serum metabolome and gut microbiome to decipher chicken amino acid improvements induced by medium-chain monoglycerides. *Metabolites*, 13(2), 208. <https://doi.org/10.3390/metabo13020208>. EDN: <https://elibrary.ru/IWIRMD>
41. Lu, G., Li, Y., Mao, K., Zang, Y., Zhao, X., Qiu, Q., Qu, M., & Ouyang, K. (2022). Effects of rumen-protected creatine pyruvate on meat quality, hepatic gluconeogenesis, and muscle energy metabolism of long-distance transported beef cattle. *Frontiers in Animal Science*, 3, 904503. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.904503>. EDN: <https://elibrary.ru/ZASGRZ>
42. Marciano, D. P., & Snyder, M. P. (2019). Personalized metabolomics. B: D'Alessandro, A. (Ed.), *High-Throughput Metabolomics* (Methods in Molecular Biology, Vol. 1978). Humana. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9236-2_27
43. Matthies, C., Evers, S., Ludwig, W., & Schink, B. (2000). Anaerovorax odorimutans gen. nov., sp. nov., a putrescine-fermenting, strictly anaerobic bacterium. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 50, 1591–1594. <https://doi.org/10.1099/00207713-50-4-1591>
44. Miao, X., Wu, T., Pan, H., Zhang, Y., Liu, J., Fan, Y., Du, L., Gong, Y., Li, L., Huang, T., & Ning, Z. (2024). Integrative analysis of the ovarian metabolome and transcriptome of the Yaoshan chicken and its improved hybrids. *Frontiers in Genetics*, 15, 1416283. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1416283>. EDN: <https://elibrary.ru/DUMSNG>
45. Nagalakshmi, D., Sastry, V. R., Katiyar, R. C., Agrawal, D. K., & Verma, S. V. (1999). Performance of broiler chicks fed on diets containing urea ammoniated neem (Azadirachta indica) kernel cake. *British Poultry Science*, 40(1), 77–83. <https://doi.org/10.1080/00071669987863>
46. Noecker, C., Sanchez, J., Bisanz, J. E., Escalante, V., Alexander, M., Trepka, K., Heinken, A., Liu, Y., Dodd, D., Thiele, I., DeFelice, B. C., & Turnbaugh, P. J. (2023).

- Systems biology elucidates the distinctive metabolic niche filled by the human gut microbe *Eggerthella lenta*. *PLoS Biology*, 21(5), e3002125. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002125>. EDN: <https://elibrary.ru/AFXFVY>
47. Qaid, M. M., Al-Mufarrej, S. I., Azzam, M. M., Al-Garadi, M. A., Albaadani, H. H., Alhidary, I. A., & Aljumaah, R. S. (2021). Growth performance, serum biochemical indices, duodenal histomorphology, and cecal microbiota of broiler chickens fed on diets supplemented with cinnamon bark powder at prestarter and starter phases. *Animals*, 11(1), 94. <https://doi.org/10.3390/ani11010094>. EDN: <https://elibrary.ru/AZMFVB>
48. Shajahmetova, E., Deryabin, D., & Duskaev, G. (2021). Gamma lactone and vanillic acid change the microbiome of broiler blind appendage. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(S1), S74. EDN: <https://elibrary.ru/NMEVGQ>
49. Tian, J., Zhu, X., Wu, H., Wang, Y., & Hu, X. (2023). Serum metabolic profile and metabolome genome-wide association study in chicken. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14(69). <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00868-7>. EDN: <https://elibrary.ru/RTBIPI>
50. Vitek, L., & Tiribelli, C. (2025). Gut microbiota and bilirubin metabolism: unveiling new pathways in health and disease. *Trends in Molecular Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2024.12.007>. EDN: <https://elibrary.ru/BIATBM>
51. Wu, M., Zuo, S., Maiorano, G., Kosobucki, P., & Stadnicka, K. (2022). How to employ metabolomic analysis to research on functions of prebiotics and probiotics in poultry gut health? *Frontiers in Microbiology*, 13, 1040434. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1040434>. EDN: <https://elibrary.ru/BPXNOX>
52. Wuthier, P. R., & Stratton, P. O. (1957). The creatinine level of blood serum as an indicator of carcass composition. *Journal of Animal Science*, 16(4), 961–966. <https://doi.org/10.2527/jas1957.164961x>
53. Yang, S., Yang, Y., Long, X., Li, H., Zhang, F., & Wang, Z. (2023). Integrated analysis of the effects of cecal microbiota and serum metabolome on market weights of Chinese native chickens. *Animals*, 13(19), 3034. <https://doi.org/10.3390/ani13193034>. EDN: <https://elibrary.ru/BPLPAE>

References

1. Andreeva, L. I., Kozhemyakin, L. A., & Kishkun, A. A. (1988). Modification of the method for determining lipid peroxides in the thiobarbituric acid test. *Laboratornoe delo*, (11), 41–43. EDN: <https://elibrary.ru/SKGPQJ>
2. Bogolyubova, N. V., Nekrasov, R. V., Zelenchenkova, A. A., Rykov, R. A., Kolesnik, N. S., Volkova, N. A., & Vetokh, A. N. (2022). Biochemical profile of the body of chickens of different productivity directions. *Veterinariya i kormlenie*, (6), 11–15.

- <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-6-3>. EDN: <https://elibrary.ru/BHDHWV>
3. Vertiprakhov, V. G., Ksenofontov, D. A., Kolesnik, E. A., & Ovchinnikova, N. V. (2022). *Morpho-biochemical blood studies in agricultural poultry* [Textbook]. Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy. ISBN: 978-5-9675-1938-3. EDN: <https://elibrary.ru/RIUBDQ>
 4. Duskaev, G. K., Rakhmatullin, Sh. G., Kosyan, D. B., Rusakova, E. A., Kvan, O. V., & Levakhin, G. I. (2022). Effect of combined use of gamma-octalactone and chlortetracycline in the broiler diet: Live weight, feed utilization efficiency, and cecum microbiome. *Agrarnaya nauka*, (9), 47–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-47-53>. EDN: <https://elibrary.ru/FSEANC>
 5. Duskaev, G. K., Lazebnik, K. S., & Klimova, T. A. (2022). Assessment of microbial diversity in the cecum of broiler chickens when introducing coumarin and a feed antibiotic into the diet. *Vestnik of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, 17(4), 555–566. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-555-566>. EDN: <https://elibrary.ru/FUHJBX>
 6. Duskaev, G. K., Rusakova, E. A., & Deryabin, D. G. (2022). Use of gamma-octalactone in the broiler diet: Intestinal microbiome. *Mezhdunarodnyy vestnik veterinarii*, (4), 152–158. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.152>. EDN: <https://elibrary.ru/XGADAX>
 7. Duskaev, G. K., Vlasenko, L. V., Kosyan, D. B., & Kurilkina, M. Ya. (2023). Effect of small plant-derived molecules on the microbial diversity of the cecum in broiler chickens. *Ptitsevodstvo*, (4), 46–51. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-4-46-51>. EDN: <https://elibrary.ru/SASHWF>
 8. Erimbetov, K. T., Obvintseva, O. V., & Mikhailov, V. V. (2018). Features of metabolism and formation of meat productivity in pigs of different genotypes. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh*, (1), 51–63. <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2018.1.51-63>. EDN: <https://elibrary.ru/YRPEPF>
 9. Zagarin, A. Yu. (2024). Characteristics of correlation relationships between biochemical blood parameters and morphological features of broiler chickens. *Izvestiya of the Timiryazev Agricultural Academy*, (4), 140–153. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-4-140-153>. EDN: <https://elibrary.ru/IXDVXC>
 10. Kulebyakin, K. Yu., Akopyan, Zh. A., Kochegura, T. N., & Penkov, D. N. (2016). Mechanisms of transcriptional control of glucose metabolism in the liver. *Sakhar-nyy diabet*, 19(3), 190–198. <https://doi.org/10.14341/DM2003436-40>. EDN: <https://elibrary.ru/WKBQLJ>
 11. Aviagen. *Normative indicators for Arbor Acres Plus broiler stock*. Retrieved from <https://fermer.ru/files/v2/forum/152289/17a-aa-broiler-po.pdf>

12. Pikulik, A. A., Babicheva, I. A., & Senko, A. Ya. (2018). Effect of the combined use of tetralactobacterin and potassium iodide on the concentration of total protein and urea in the blood serum of broiler chickens. *Izvestiya of the Orenburg State Agrarian University*, (5), 271–273. EDN: <https://elibrary.ru/YNDPZZ>
13. Standartinform. (2010). *Principles of good laboratory practice*.
14. Regan, V. D., Sanders, T. G., & Denicola, D. B. (2008). *Atlas of veterinary hematology* (E. Makhyanova, Trans.). Aquarium Print. ISBN: 978-5-98435-930-6. EDN: <https://elibrary.ru/QKZJZJ>
15. Saleeva, I. P., Lysenko, V. P., Shol, V. G., et al. (2015). *Methodology for conducting research on the technology of egg and poultry meat production* (V. S. Lukashenko & A. Sh. Kavtarashvili, Eds.). All-Russian Research and Technological Institute of Poultry. ISBN: 978-5-98020-154-8.
16. Aviagen. (2022). *Arbor Acres broiler feed ration specifications*. Retrieved from https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_Tech-Docs/AA_BroilerNutritionSpecifications2022_RU.pdf
17. Arzour-Lakehal, N., & Boudebza, A. (2021). Biochemical reference intervals in broiler chickens according to age and strain. *Agricultural Science and Technology*, 13(4), 357–364. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.04.058>. EDN: <https://elibrary.ru/WAELGP>
18. Beauclercq, S., Nadal-Desbarats, L., Hennequet-Antier, C., Collin, A., Tesseraud, S., Bourin, M., Le Bihan-Duval, E., & Berri, C. (2016). Serum and muscle metabolomics for the prediction of ultimate pH, a key factor for chicken-meat quality. *Journal of Proteome Research*, 15(4), 1168–1178. <https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.5b01050>
19. Chen, Y., Wang, J., Yu, L., Xu, T., & Zhu, N. (2020). Microbiota and metabolome responses in the cecum and serum of broiler chickens fed with plant essential oils or virginiamycin. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60135-x>. EDN: <https://elibrary.ru/WYYZXP>
20. Chowdhury, S. D., Roy, C. R., & Sarker, A. K. (1996). Urea in poultry nutrition — Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 9(3), 241–245. <https://doi.org/10.5713/ajas.1996.241>
21. Cox, T. O., Lundgren, P., Nath, K., & Thaiss, C. A. (2022). Metabolic control by the microbiome. *Genome Medicine*, 14(80). <https://doi.org/10.1186/s13073-022-01092-0>. EDN: <https://elibrary.ru/PUTJNY>
22. Das, S., & Aminul Islam, M. (2023). Comparative growth, meat yield and blood lipid profiles of Arbor Acres, Cobb 500 and Lohmann broiler strains. *International Journal of Agriculture Environment and Bioresearch*, 8(3), 55–63. <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2023.5828>. EDN: <https://elibrary.ru/ZRZQDP>

23. Deryabin, D. G., Kosyan, D. B., Inchagova, K. S., & Duskaev, G. K. (2023). Plant-derived quorum sensing inhibitors (quercetin, vanillin and umbelliferon) modulate cecal microbiome, reduces inflammation and affect production efficiency in broiler chickens. *Microorganisms*, 11, 1326. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051326>. EDN: <https://elibrary.ru/DTQURZ>
24. Duskaev, G., Kvan, O., Kosyan, D., Rakhmatullin, S., & Levakhin, G. (2021). Coumarin derivative and *Bacillus cereus* change live weight and cecal ecology in broilers. *AIMS Agriculture and Food*, 6(1), 360–380. <https://doi.org/10.3934/agr-food.2021022>. EDN: <https://elibrary.ru/NBMBIY>
25. Fonknechten, N., Chaussonnerie, S., Tricot, S., Lajus, A., Andreesen, J. R., Perchat, N., Pelletier, E., Gouyvenoux, M., Barbe, V., Salanoubat, M., Le Paslier, D., Weissenbach, J., Cohen, G. N., & Kreimeyer, A. (2010). *Clostridium sticklandii*, a specialist in amino acid degradation: revisiting its metabolism through its genome sequence. *BMC Genomics*, 11(555). <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-555>. EDN: <https://elibrary.ru/NYOTGD>
26. Friedrichs, K. R., Harr, K. E., Freeman, K. P., Szladovits, B., Walton, R. M., Barnhart, K. F., & Blanco-Chavez, J. (2012). ASVCP reference interval guidelines: determination of de novo reference intervals in veterinary species and other related topics. *Veterinary Clinical Pathology*, 41(4), 441–453. <https://doi.org/10.1111/vcp.12006>
27. Fujisaka, S., Watanabe, Y., & Tobe, K. (2023). The gut microbiome: A core regulator of metabolism. *Journal of Endocrinology*, 256(3), e220111. <https://doi.org/10.1530/JOE-22-0111>. EDN: <https://elibrary.ru/FCNYKY>
28. Gerritsen, J., Hornung, B., Ritari, J., Paulin, L., Rijkers, G., Schaap, P. J., De Vos, W. M., & Smidt, H. (2019). A comparative and functional genomics analysis of the genus *Romboutsia* provides insight into adaptation to an intestinal lifestyle. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/845511>
29. Hall, B., Levy, S., Dufault-Thompson, K., Arp, G., Zhong, A., Ndjite, G. M., Weiss, A., Braccia, D., Jenkins, C., Grant, M. R., Abeyasinghe, S., Yang, Y., Jermain, M. D., Wu, C. H., Ma, B., & Jiang, X. (2024). BilR is a gut microbial enzyme that reduces bilirubin to urobilinogen. *Nature Microbiology*, 9, 173–184. <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01549-x>. EDN: <https://elibrary.ru/UFYZMZ>
30. Hu, W., He, Z., Du, L., Zhang, L., Li, J., Ma, Y., & Bi, S. (2023). Biomarkers of oxidative stress in broiler chickens attacked by lipopolysaccharide: A systematic review and meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 266, 115606. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115606>. EDN: <https://elibrary.ru/QZXKYJ>
31. Indriani, S., Srisakultiew, N., Yuliana, N. D., Yongsawatdigul, J., Benjakul, S., & Pongsetkul, J. (2024). Metabolomic profiles and compositional differences involved in flavor characteristics of raw breast meat from slow- and fast-growing

- chickens in Thailand. *Poultry Science*, 103(11), 104230. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104230>. EDN: <https://elibrary.ru/IKXEXW>
32. Karasawa, Y. (1989). Ammonia production from uric acid, urea, and amino acids and its absorption from the ceca of the cockerel. *Journal of Experimental Zoology Supplement*, 75–80. <https://doi.org/10.1002/jez.1402520513>
33. Karisa, B. K., Thomson, J., Wang, Z., Li, C., Montanholi, Y. R., Miller, S. P., Moore, S. S., & Plastow, G. S. (2014). Plasma metabolites associated with residual feed intake and other productivity performance traits in beef cattle. *Livestock Science*, 165, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.03.002>
34. Kırbaş, A., Kaman, R., Merhan, O., Bozukluhan, K., Değirmençay, S., & Sertaç, M. (2021). Evaluation of acute phase response and oxidative damage in sheep naturally infected with *Streptococcus Pluranimalium* using haptoglobin, nitric oxide, and malondialdehyde levels. *Firat University Veterinary Journal of Health Sciences*, 35(3), 145–150.
35. Krasnodebska-Depta, A., & Koncicki, A. (2000). Physiological values of selected serum biochemical indices in broiler chickens. *Medycyna Weterynaryjna*, 56(7), 456–460.
36. Lee, D. J. (1977). Urease activity in the digestive tract of the chick and its role in the utilisation of urea as a source of non-amino nitrogen. *British Poultry Science*, 18(4), 449–458. <https://doi.org/10.1080/00071667708416385>
37. Li, J., Akanno, E. C., Valente, T. S., Abo-Ismael, M., Karisa, B. K., Wang, Z., & Plastow, G. S. (2020). Genomic heritability and genome-wide association studies of plasma metabolites in crossbred beef cattle. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.538600>. EDN: <https://elibrary.ru/CNXOGS>
38. Lichtenberg, S., Trifonova, O. P., Maslov, D. L., Balashova, E. E., & Lokhov, P. G. (2021). Metabolomic laboratory-developed tests: current status and perspectives. *Metabolites*, 11(7), 423. <https://doi.org/10.3390/metabo11070423>. EDN: <https://elibrary.ru/RETLGK>
39. Lin, T.-C., Soorneedi, A., Guan, Y., Tang, Y., Shi, E., Moore, M. D., & Liu, Z. (2023). Turicibacter fermentation enhances the inhibitory effects of Antrodia camphorata supplementation on tumorigenic serotonin and Wnt pathways and promotes ROS-mediated apoptosis of Caco-2 cells. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1203087. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1203087>. EDN: <https://elibrary.ru/WSUGZQ>
40. Liu, T., Ruan, S., Mo, Q., Zhao, M., Wang, J., Ye, Z., Chen, L., & Feng, F. (2023). Integrated serum metabolome and gut microbiome to decipher chicken amino acid improvements induced by medium-chain monoglycerides. *Metabolites*, 13(2), 208. <https://doi.org/10.3390/metabo13020208>. EDN: <https://elibrary.ru/IWIRMD>
41. Lu, G., Li, Y., Mao, K., Zang, Y., Zhao, X., Qiu, Q., Qu, M., & Ouyang, K. (2022). Effects of rumen-protected creatine pyruvate on meat quality, hepatic gluconeogene-

- sis, and muscle energy metabolism of long-distance transported beef cattle. *Frontiers in Animal Science*, 3, 904503. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.904503>. EDN: <https://elibrary.ru/ZASGRZ>
42. Marciano, D. P., & Snyder, M. P. (2019). Personalized metabolomics. B: D'Alessandro, A. (Ed.), *High-Throughput Metabolomics* (Methods in Molecular Biology, Vol. 1978). Humana. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9236-2_27
43. Matthies, C., Evers, S., Ludwig, W., & Schink, B. (2000). *Anaerovorax odorimutans* gen. nov., sp. nov., a putrescine-fermenting, strictly anaerobic bacterium. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 50, 1591–1594. <https://doi.org/10.1099/00207713-50-4-1591>
44. Miao, X., Wu, T., Pan, H., Zhang, Y., Liu, J., Fan, Y., Du, L., Gong, Y., Li, L., Huang, T., & Ning, Z. (2024). Integrative analysis of the ovarian metabolome and transcriptome of the Yaoshan chicken and its improved hybrids. *Frontiers in Genetics*, 15, 1416283. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1416283>. EDN: <https://elibrary.ru/DUMSNG>
45. Nagalakshmi, D., Sastry, V. R., Katiyar, R. C., Agrawal, D. K., & Verma, S. V. (1999). Performance of broiler chicks fed on diets containing urea ammoniated neem (*Azadirachta indica*) kernel cake. *British Poultry Science*, 40(1), 77–83. <https://doi.org/10.1080/00071669987863>
46. Noecker, C., Sanchez, J., Bisanz, J. E., Escalante, V., Alexander, M., Trepka, K., Heinken, A., Liu, Y., Dodd, D., Thiele, I., DeFelice, B. C., & Turnbaugh, P. J. (2023). Systems biology elucidates the distinctive metabolic niche filled by the human gut microbe *Eggerthella lenta*. *PLoS Biology*, 21(5), e3002125. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002125>. EDN: <https://elibrary.ru/AFXFVY>
47. Qaid, M. M., Al-Mufarrej, S. I., Azzam, M. M., Al-Garadi, M. A., Albaadani, H. H., Alhidary, I. A., & Aljumaah, R. S. (2021). Growth performance, serum biochemical indices, duodenal histomorphology, and cecal microbiota of broiler chickens fed on diets supplemented with cinnamon bark powder at prestarter and starter phases. *Animals*, 11(1), 94. <https://doi.org/10.3390/ani11010094>. EDN: <https://elibrary.ru/AZMFVB>
48. Shajahmetova, E., Deryabin, D., & Duskaev, G. (2021). Gamma lactone and vanillic acid change the microbiome of broiler blind appendage. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(S1), S74. EDN: <https://elibrary.ru/NMEVGQ>
49. Tian, J., Zhu, X., Wu, H., Wang, Y., & Hu, X. (2023). Serum metabolic profile and metabolome genome-wide association study in chicken. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14(69). <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00868-7>. EDN: <https://elibrary.ru/RTBIPI>
50. Vitek, L., & Tiribelli, C. (2025). Gut microbiota and bilirubin metabolism: unveiling new pathways in health and disease. *Trends in Molecular Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2024.12.007>. EDN: <https://elibrary.ru/BIATBM>

51. Wu, M., Zuo, S., Maiorano, G., Kosobucki, P., & Stadnicka, K. (2022). How to employ metabolomic analysis to research on functions of prebiotics and probiotics in poultry gut health? *Frontiers in Microbiology*, 13, 1040434. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1040434>. EDN: <https://elibrary.ru/BPXNOX>
52. Wuthier, P. R., & Stratton, P. O. (1957). The creatinine level of blood serum as an indicator of carcass composition. *Journal of Animal Science*, 16(4), 961–966. <https://doi.org/10.2527/jas1957.164961x>
53. Yang, S., Yang, Y., Long, X., Li, H., Zhang, F., & Wang, Z. (2023). Integrated analysis of the effects of cecal microbiota and serum metabolome on market weights of Chinese native chickens. *Animals*, 13(19), 3034. <https://doi.org/10.3390/ani13193034>. EDN: <https://elibrary.ru/BPLPAE>

ВКЛАД АВТОРОВ

Дерябин Д.Г.: разработка концепции научной работы, подготовка рукописи.

Власенко Л.В.: сбор и анализ данных, оформление рукописи по правилам журнала.

Каримов И.Ф.: статистическая обработка, подготовка графического материала.

Дускаев Г.К.: общее руководство проектом.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Dmitry G. Deryabin: study conception and design, drafting of the manuscript.

Ludmila V. Vlasenko: data collection and analysis, design according to the journal rules.

Ilshat F. Karimov: statistical data analysis, preparation of graphic material.

Galimzhan K. Duskaev: overall project management.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Дерябин Дмитрий Геннадьевич, д-р мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий» Российской академии наук*
ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
dgderyabin@yandex.ru

Власенко Людмила Викторовна, канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий» Российской академии наук*

ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
lv.efremova@yandex.ru

Каримов Ильшат Файзелгаянович, канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве; доцент кафедры эпидемиологии и инфекционных болезней

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий» Российской академии наук; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; ул. Советская, 6, г. Оренбург, 460014, Российская Федерация
ifkarimov@yandex.ru

Дускаев Галимжан Калиханович, д-р биол. наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий» Российской академии наук

ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
gduskaev@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dmitry G. Deryabin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry
Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences

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

dgderyabin@yandex.ru

SPIN-code: 8243-2537

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-7947>

ResearcherID: K-5335-2012

Scopus Author ID: 57218145388

Ludmila V. Vlasenko, Candidate of Biological Sciences, Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry

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

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

lv.efremova@yandex.ru

SPIN-code: 2484-2215

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

ResearcherID: E-8547-2017

Scopus Author ID: 55344908600

Ilshat F. Karimov, Candidate of Biological Sciences, Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry; Associate Professor, Department of Epidemiology and Infectious Diseases

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

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

ifkarimov@yandex.ru

SPIN-code: 2898-9150

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

ResearcherID: F-2041-2015

Scopus Author ID: 26650061100

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

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

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

gduskaev@mail.ru

SPIN-code: 7297-3319

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

ResearcherID: N-4454-2014

Scopus Author ID: 56192764700

Поступила 05.07.2025

После рецензирования 01.08.2025

Принята 05.08.2025

Received 05.07.2025

Revised 01.08.2025

Accepted 05.08.2025

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

DOI: 10.12731/2658-6649-2026-18-1-1743

EDN: GDMBJM

УДК 636.939:591.169.1

Original article



Морфо-функциональные изменения крови кур-несушек при экспериментальном трихинеллезе, вызванного *T. pseudospiralis*

О.Б. Жданова^{1,2}, А.К. Мартусевич¹, О.В. Часовских¹

¹Вятский ГАТУ, Киров, Российская Федерация

²ВНИИП – филиал ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Несмотря на то, что экспериментальный трихинеллез на модели инвазии у птиц неоднократно воспроизводился при заражении личинками *Trichinella pseudospiralis* отечественными и зарубежными исследователями имеют-ся весьма противоречивые данные о реакции красной и белой крови на инвазию.

Цель исследования – изучить состояние окислительного метаболизма методом Fe-индуцированной биохимилуминесценции и изменения морфологических показателей периферической крови и мазков-отпечатков селезенки у кур-несушек при экспериментальном заражении *T. pseudospiralis*.

Материалы и методы. Птиц опытной группы (6 голов) взвешивали и внутрь зоба вводили изолят личинок *T. pseudospiralis* в дозе 2 лич./г массы тела. Личинки *T. pseudospiralis*, используемые для экспериментального заражения птицы, первоначально выделены из мышечной ткани птицы, и поддерживались на лабораторных животных. Взятие крови осуществляли в динамике, готовили мазки, которые фиксировали, окрашивали и исследовали под увеличением x800, с морфометрией на световом микроскопе VisionBio (Epi) с автоматическим выходом на экран. Через 3,5–4 мес. после заражения птиц подвергли эвтаназии, отбирали мышечную массу для исследования методами КТ и пептолиза. Определяли количество эритроцитов, лейкоцитов и гемоглобина, в плазме крови и эритроцитах кур оценивали состояние окислительного метаболизма методом Fe-индуцированной биохимилуминесценции на аппарате БХЛ-06 (Н. Новгород, Россия).

Полученные данные обрабатывали с использованием стандартных пакетов программ MS Excel и Statgraphics. При оценке однородности групп и достоверности различий средних между группами использовали непараметрический U-тест Манна-Уитни (Sokal, Rohlf, 1981). Уровень статистической значимости полученных различий между сравниваемыми выборками принимали при $p < 0.05$.

Результаты исследований. Все птицы опытных групп хорошо перенесли инвазию, клинические признаки в виде незначительного угнетения и диареи регистрировали только на первой неделе после заражения, несмотря на достаточно высокую ИИ (средняя ИИ составила 2940 ± 490 личинок/г мышц при искусственном переваривании мышц в ИЖС). Содержание эритроцитов и гемоглобина у инвазированных кур-несушек уменьшалось в миграционную и раннюю мышечную стадию. Количество лейкоцитов у инвазированных кур было повышенным в миграционную и раннюю мышечную стадию $42,5 \pm 5,3 \times 10^9/\text{л}$ $40,5 \pm 7,3 \times 10^9/\text{л}$, в позднюю мышечную стадию оно резко уменьшалось, и практически не отличалось от контроля ($33,3 \pm 4,3 \times 10^9/\text{л}$, $29,5 \pm 3,3 \times 10^9/\text{л}$, соответственно). При биохемилюминесцентном анализе изменений окислительного метаболизма эритроцитов и плазмы крови у инвазированных птиц также наиболее высокий уровень показателей наблюдали в миграционной стадии гельминтоза.

Заключение. Экспериментальная инвазия кур-несушек личинками *Trichinella pseudospiralis* оказывает выраженное влияние на гематологические и метаболические параметры крови, вызывая выраженную их перестройку, зависящую от стадии гельминтоза. Установлено, что наиболее серьезные сдвиги основных гематологических показателей (в частности, количества эритроцитов и уровня гемоглобина), а также свободнорадикальных процессов в плазме крови и эритроцитах наблюдаются в миграционной стадии паразитоза и частично сглаживаются при миграции трихинелл в мышцы. Представляет интерес тот факт, что плазма крови птиц реагирует на смену стадии экспериментальной инвазии более активно, чем клеточный пул крови.

Ключевые слова: *Gallus gallus*; трихинелла; *T. pseudospiralis*; гематология; биохемилюминесценция; эритроциты; лейкоциты; гетерофилы

Для цитирования. Жданова, О. Б., Мартусевич, А. К., & Часовских, О. В. (2026). Морфо-функциональные изменения крови кур-несушек при экспериментальном трихинеллезе, вызванного *T. pseudospiralis*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 40–59. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1743>

Morpho-functional changes in the blood of laying hens in experimental trichinosis caused by *T. pseudospiralis*

O.B. Zhdanova^{1,2}, A.K. Martusevich¹, O.V. Chasovskikh¹

¹Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russian Federation

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

Abstract

Background. Experimental trichinosis based on a model of invasion in birds has been repeatedly reproduced by domestic and foreign researchers when infected with

Trichinella pseudospiralis larvae, however, there are very contradictory data on the reaction of red and white blood to invasion.

The **purpose** of the study was to study the state of oxidative metabolism using Fe-induced biochemiluminescence and changes in the morphological parameters of peripheral blood and spleen smears of laying hens during experimental infection with *T.pseudospiralis*.

Materials and methods. Birds of the experimental group (6 heads) were weighed and *T. pseudospiralis* larval isolate was injected into the goiter at a dose of 2 larvae per g of body weight. *T. pseudospiralis* larvae used for experimental infection of poultry were initially isolated from poultry muscle tissue and kept on laboratory animals. Blood sampling was carried out dynamically, smears were prepared, which were fixed, stained and examined at 800-fold magnification with morphometry on a VisionBio (Epi) light microscope with automatic display on the screen. 3.5-4 months after infection, the birds were euthanized, and muscle mass was collected for computed tomography and peptolysis studies. The number of erythrocytes, leukocytes and hemoglobin was determined, the state of oxidative metabolism in blood plasma and erythrocytes of chickens was assessed by Fe-induced biochemiluminescence on a BHL-06 apparatus (Nizhny Novgorod, Russia). The data obtained was processed using standard MS Excel and Statgraphics software packages. The nonparametric Mann-Whitney U-test (Sokal and Rohlf, 1981) was used to assess the homogeneity of groups and the significance of differences in averages between groups. The level of statistical significance of the differences obtained between the compared samples was assumed to be $p < 0.05$.

Results. All birds of the experimental groups tolerated the invasion well, despite the high intensity of invasion (2940 ± 490 larvae/g of muscle mass during artificial digestion of muscle mass). The content of erythrocytes and hemoglobin in infected laying hens decreased during migration and in the early stages of muscle mass development. The number of leukocytes in infected chickens was increased at the migration and early muscle stages ($42.5 \pm 5.3 \times 10^9/l$, $40.5 \pm 7.3 \times 10^9/l$), at the late muscle stage it decreased sharply and practically did not differ from the control ($33.3 \pm 4.3 \times 10^9/l$, $29.5 \pm 3.3 \times 10^9/l$ respectively). Biochemiluminescent analysis of changes in the oxidative metabolism of erythrocytes and blood plasma in invaded birds also showed the highest levels of indicators at the migratory stage of helminthiasis.

Conclusion. Thus, the experimental invasion of laying hens by *Trichinella pseudospiralis* larvae has a pronounced effect on hematological and metabolic parameters of blood, causing their pronounced restructuring depending on the stage of helminthiasis. It has been established that the most serious shifts in the main hematological parameters (in particular, the number of red blood cells and the level of hemoglobin), as well as free radical processes in blood plasma and red blood cells are observed at the migrating stage

of parasitosis and partially smoothed out during the migration of parasites. Interestingly, the blood plasma of birds reacts more actively to changes at the stage of experimental invasion than the cellular blood pool.

Keywords: Gallus gallus; trichinella; *T. pseudospiralis*; hematology; biochemiluminescence; erythrocytes; leukocytes; heterophiles

For citation. Zhdanova, O. B., Martusevich, A. K., & Chasovskikh, O. V. (2026). Morpho-functional changes in the blood of laying hens in experimental trichinosis caused by *T. pseudospiralis*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 40–59. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1743>

Введение

Экспериментальный трихинеллез на модели инвазии у птиц (кур-несушек) неоднократно воспроизводился при заражении личинками *Trichinella pseudospiralis* отечественными и зарубежными исследователями после открытия Б.Л. Гаркави данного возбудителя. Компрессорная трихинеллоскопия (КТ) и метод пептолиза (метода переваривания в искусственном желудочном соке), лежат в основе постмортальной диагностики, а также при помощи данных методов и в настоящее время проводится изучение распространения данного гельминтоза и определение заселяемости отдельных мышц личинками *Trichinella pseudospiralis* [3; 4; 5-8; 11; 15-19]. Ряд исследований также был посвящен изучению патогенеза трихинеллеза, вызванного бескапсульными возбудителями, достаточно внимания уделялось и изменениям в системе крови птиц в динамике трихинеллезной инвазии. Однако, в доступной литературе имеются лишь фрагментарные сведения о реакции иммунной системы птиц на данную инвазию, а также недостаточно описаны изменения лейкоцитов (в частности, имеются противоречивые сведения о морфо-функциональных изменениях гетерофилов) в различные периоды трихинеллезной инвазии. Учитывая вышесказанное, мы предприняли попытку изучения реакции вторичных органов иммунной системы и клеток крови на трихинеллезную инвазию у кур-несушек. К периферическим (вторичным) лимфоидным органам птицы относятся: селезенка, лимфоидные узлы слепых отростков, гардерова железа, скопления лимфоидных элементов глотки, гортани, бронхов и кишечника и небольшие скопления лимфоидных клеток в других органах и тканях (Конопатов Ю. В., Макеева Е. Е., 2000). Однако известно, что у кур-несушек, отсутствует сформированная лимфатическая система аналогичная млекопитающим, в частности отсутствуют лимфатические узлы, что компенсируется лимфоидной тканью, ассоциированной со сли-

зистыми оболочками, а также лимфоидной тканью в селезенки (Payne F., 1971). По данным B.G.Bang et al. (1968), кроме того, обнаружены лимфоидные образования в гардеровой железе (плазматические клетки) [1; 7-10]. Значительные отличия имеются также среди клеток крови (эритроцитов, тромбоцитов и лейкоцитов). Так, например, у птиц все эритроциты в норме содержат ядро, они овальные, и намного крупнее эритроцитов млекопитающих. Данные особенности морфологии красной крови, а также наличие отличных от млекопитающих видов лейкоцитов (гетерофилы) значительно затрудняют проведение исследований общепринятыми методиками подсчета форменных элементов. Лейкоциты также как и у млекопитающих представлены 2-мя большими группами (гранулоциты и агранулоциты). Гранулоциты (лимфоциты и моноциты) в меньшей степени отличаются от таковых млекопитающих, так, например, лимфоциты также как и у животных содержат очень крупное темное ядро, и тонкую, голубую полосу цитоплазмы. Хорошо дифференцируются большие и средние лимфоциты (6–9 мкм в диаметре) и малые диаметром 5 мкм и менее. Также выявляются плазмобласты и плазмоциты, более светлые клетки, имеют перинуклеарное просветление, яркую базофильную цитоплазму, с хорошо визуализирующимися пузырьками (везикулами). Также как и у млекопитающих, помимо лимфоцитов, к агранулоцитам относятся моноциты (самые крупные клетки крови), которые имеют крупное, бобовидное, фиолетово-розовое ядро и широкую полосу голубоватой цитоплазмы. Гранулоциты представлены 3-мя группами клеток (базофилами, эозинофилами и гетерофилами). Базофилы птиц похожи на базофилы млекопитающих, они также имеют крупное овальное ядро реже сегментированное, хорошо выраженную цитоплазму, в которой содержатся крупные ярко-фиолетовые гранулы. У эозинофилов ядро полиморфно, чаще сегментированное (может иметь 2-3 сегмента), реже встречаются палочкоядерные эозинофилы, ядро этих клеток фиолетовое, голубоватая цитоплазма хорошо выражена, имеет ярко розовые гранулы [1; 8; 12; 27-29]. Однако, у птиц также имеется группа гранулоцитов, которая значительно отличается от большинства млекопитающих – гетерофилы (псевдоэозинофилы), эти клетки похожи на эозинофилы, но более они крупнее, имеют более светлую цитоплазму с сегментированным ядром, более светлого, чем у эозинофилов цвета, а также характерную розовую зернистость, в отличие от эозинофилов зерна вытянуты и имеют форму веретена. По своим функциям они близки к нейтрофилам млекопитающих. Тромбоциты птиц также отличаются от тромбоцитов млекопитающих, это мелкие клетки, округлой, иногда овальной

формы с ядром, округлой формы. В мазках тромбоциты располагаются группами.

Материалы и методы

Куры-несушки были заражены личинками *Trichinella pseudospiralis* (Garkavi, 1972), выделенными от амурского kota (*Prionailurus bengalensis euptilurus*). Вид гельминта был подтвержден генетическими исследованиями эталонного штамма, работу осуществляли в соответствии с правилами по работе патогенным материалом биологического происхождения (СанПиН 3.3686-21 «Безопасность работы с микроорганизмами III-IV групп патогенности (опасности) и возбудителями паразитарных болезней») [1; 2; 8-10]. Необходимой количество личинок данного гельминта получали за счёт ряда пассажей на лабораторных грызунах (мыши и крысы), после чего инвазировались куры-несушки (9 голов), per os вводили личинок *T. pseudospiralis* в дозе 2 лич./г массы тела. Птицы содержались в стандартных условиях в течение 6 месяцев и получали стандартные рационы кормления, на основе комбинированных кормов. Взятие крови осуществляли в динамике из гребня в вакуумные пробирки с ЭДТА для определения основных гематологических показателей и для получения плазмы крови, для подсчета лейкограммы наносили каплю крови на стекло, и готовили мазки, которые фиксировали и окрашивали по Романовскому-Гимза. Мазки исследовали под увеличением $\times 800$, с морфометрией на световом микроскопе VisionBio (Epi) с автоматическим выходом на экран. Количество эритроцитов и лейкоцитов определяли при помощи камеры Горяева, а гемоглобина – по Сали.

Птиц из эксперимента выводили в соответствии с «Правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных» после эвтаназии, отбирали мышечную массу для исследования методами КТ и пептолиза. Вследствие наличия ядер в эритроцитах, мазки крови у кур-несушек должны быть значительно тоньше, чем мазки крови других животных, так как необходимо, чтобы клетки крови располагались в один слой. При исследовании морфо-функциональных особенностей клеточного состава селезенки готовили мазки-отпечатки, которые также фиксировали и окрашивали по Романовскому-Гимза и исследовали при увеличении микроскопа $\times 400$, $\times 800$.

В плазме крови и эритроцитах кур оценивали состояние окислительного метаболизма методом Fe-индуцированной биохемилюминесценции на аппарате БХЛ-06 (Нижний Новгород, Россия). В плазме крови изучали

как интенсивность свободнорадикальных процессов (по величине максимальной фотовспышки хемилюминесценции), так и суммарную активность антиоксидантных систем (как показатель, обратный светосумме хемилюминесценции, регистрируемой за первые 30 с.). В мембранах эритроцитов определяли перекисную резистентность аналогично методике оценки интенсивности свободнорадикального окисления в плазме крови кур. При оценке однородности групп и достоверности различий средних между группами использовали непараметрический U-тест Манна-Уитни (Sokal, Rohlf, 1981). Уровень статистической значимости полученных различий между сравниваемыми выборками принимали при $p < 0.05$.

Результаты исследований

Все птицы опытных групп хорошо перенесли инвазию, клинические признаки в виде незначительного угнетения и диареи регистрировали только на первой неделе после заражения, несмотря на достаточно высокую ИИ (средняя ИИ составила 2940 ± 490 личинок/г мышц при искусственном переваривании мышц в ИЖС). Содержание эритроцитов и гемоглобина у кур-несушек, инвазированных *T. pseudospiralis* уменьшалось в миграционную и раннюю мышечную стадию (таблица 1), в позднюю мышечную стадию показатели изменялись незначительно по сравнению с контролем.

Размеры эритроцитов составили в среднем $11,2 \pm 1,3$ мкм по длинной оси и $7,1 \pm 1,2$ мкм по короткой, значительных отличий в группе инвазированных кур не отмечено, за исключением зернистости, которую в эритроцитах здоровых птиц не наблюдали.

Таблица 1.

Содержание эритроцитов и гемоглобина у кур-несушек, инвазированных *Trichinella pseudospiralis*

Table 1. Red Blood Cell and Hemoglobin Levels in Laying Hens Infected with *Trichinella pseudospiralis*

Показатель	Миграционная стадия инвазии	Ранняя мышечная стадия	Поздняя мышечная стадия	Контроль
Эритроциты	$3,35 \pm 0,34 \times 10^{12}/л$	$3,42 \pm 0,32 \times 10^{12}/л$	$3,55 \pm 0,64 \times 10^{12}/л$	$3,92 \pm 0,64 \times 10^{12}/л$
Концентрация гемоглобина	$77,1 \pm 1,5$ г/л	$78,4 \pm 1,3$ г/л	$88,7 \pm 2,1$ г/л	$91,3 \pm 1,4$ г/л

Количество лейкоцитов у инвазированных кур было повышенным в миграционную и раннюю мышечную стадию $42,5 \pm 5,3 \times 10^9/л$ $40,5 \pm 7,3 \times$

$10^9/\text{л}$, в позднюю мышечную стадию оно резко уменьшалось, и практически не отличалось от контроля ($33,3 \pm 4,3 \times 10^9/\text{л}$, $29,5 \pm 3,3 \times 10^9/\text{л}$, соответственно). Общепринятая классификация лейкоцитов для птиц включает: базофилы, эозинофилы, гетерофилы (псевдоэозинофилы, уст.), лимфоциты и моноциты. Гетерофилы по своим структурно-функциональным характеристикам соответствуют нейтрофилам животных, основная их функция - защита организма птиц от инфекций и инвазий, их количество лейкоцитов увеличивается при повреждении тканей, что соответствует мышечной фазе инвазии ($42,1 \pm 3,3\%$ наблюдали в раннюю мышечную стадию, и $35,5 \pm 3,3\%$ в позднюю мышечную стадию). Количество моноцитов у кур составило $8 \pm 1,2\%$ в миграционную стадию, $10,5 \pm 3,1\%$ в раннюю мышечную, $10,5 \pm 1,1\%$ в позднюю мышечную и $3,4 \pm 1,2\%$ у птиц контрольной группы. Количество базофилов соответствовало референтным значениям во всех группах (1-3%), а эозинофилов у инвазированных птиц было равномерно повышено на всех стадиях инвазии 6-10%, у птиц контрольной группы количество эозинофилов было низким 3%. Лимфоциты в крови у птиц отличаются по степени насыщенности окраски и величины, их диаметр варьируется от 9 до 17 мкм, ядро крупное, округлой или овальной формы, причем на мышечных стадиях трихинеллезной инвазии преобладали более крупные (большие лимфоциты), их количество также увеличивалось от $30,5 \pm 2,3\%$ до $51,5 \pm 1,2\%$, в контрольной группе их количество также варьировалось от $41 \pm 2,2\%$ до $52 \pm 1,1\%$ на протяжении эксперимента. Аналогичные изменения обнаруживали в мазках-отпечатках из селезенки, однако, помимо популяций больших и малых лимфоцитов, также обнаруживали плазмобласты, крупные клетки с эксцентрично расположенным ядром и наличием везикул в цитоплазме, их среднее количество (при подсчете в 11 полях зрения в % от всей лимфоцитарной популяции) составило $8,5 \pm 1,8\%$ в миграционную стадию, $15,5 \pm 2,1\%$ в раннюю мышечную, $19,5 \pm 1,5\%$ в позднюю мышечную и $6,4 \pm 2,2\%$ у птиц контрольной группы. Таким образом, на протяжении всего эксперимента установлены значительные изменения красной и белой крови, что подтверждается результатами исследований ряда отечественных и зарубежных авторов [3-5; 18-22].

Анализ окислительного метаболизма крови кур в динамике экспериментального заражения позволил выявить его трансформации, зависящие от стадии гельминтоза. Так, по данным биохемилюминесцентной оценки интенсивности свободнорадикальных процессов в плазме крови птиц, наличие трихинеллеза способствует существенному нарастанию со-

ответствующего параметра, причем наиболее выражена эта тенденция в миграционной стадии (рис. 1). Установлено, что нахождение гельминта в биологической жидкости обеспечивает стимуляцию липопероксидации на 38,1% относительно здоровых кур, тогда как локализация трихинелл в мышцах несколько снижает выраженность этих сдвигов. В частности, в ранней мышечной стадии параметр оказался выше контрольных значений на 21,2%, а в поздней – на 17,9% ($p < 0,05$ для обоих случаев).

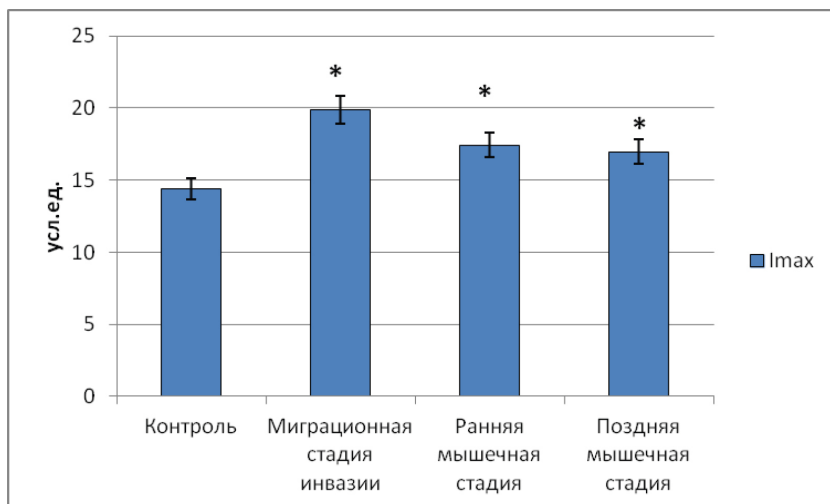


Рис. 1. Интенсивность свободнорадикального окисления в плазме крови кур-несушек в различные стадии экспериментальной инвазии («*» - статистическая значимость различий относительно контрольной группы $p < 0,05$)

Fig. 1. Free-radical oxidation activity in the blood plasma of laying hens at various stages of experimental infection (“*” indicates statistically significant differences from the control group, $p < 0.05$)

Сопряженные изменения были зарегистрированы в отношении общей антиоксидантной активности плазмы крови птиц (рис. 2). Обнаружено, что максимальное снижение уровня показателя также выявлено в миграционной стадии трихинеллезной инвазии (в 2,17 раза; $p < 0,01$), что, в совокупности с выраженным нарастанием интенсивности свободнорадикальных процессов, свидетельствует о формировании окислительного стресса, индуцированного экспериментальным трихинеллезом. Эта тенденция частично компенсируется при миграции гельминтов в мышцы, что

потенциально может происходить за счет активации эндогенных антиоксидантных систем.

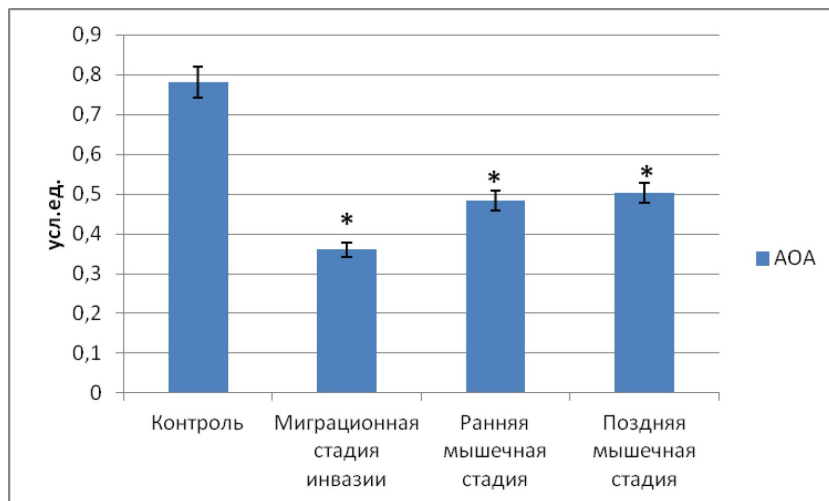


Рис. 2. Общая антиоксидантная активность плазмы крови кур-несушек в различные стадии экспериментальной инвазии («*» - статистическая значимость различий относительно контрольной группы $p < 0,05$)

Fig. 2. Total antioxidant activity of blood plasma from laying hens at various stages of experimental infection («*» indicates statistically significant differences from the control group, $p < 0.05$)

На это указывает повышение значения показателя на 13,9 и 17,2% в ранней и поздней стадии трихинеллеза по сравнению со здоровыми курами ($p < 0,05$ для обеих стадий), однако антиокислительный потенциал биосреды оставался существенно ниже контрольных значений ($p < 0,05$). Данный факт характеризует сохранение признаков окислительного стресса в мышечной стадии рассматриваемого гельминтоза [14; 23-29; 32-35].

Третьим компонентом анализа служила оценка динамики интенсивности перекисного окисления липидов в мембранах эритроцитов птиц (рис. 3). Выявлено, что на всем протяжении инвазии (как в миграционной, так и в мышечных стадиях) уровень перекисной резистентности эритроцитов, указывающий на состояние свободнорадикального окисления в них, оказался статистически значимо выше обнаруженного у кур контрольной группы ($p < 0,05$). Следует отметить, что общий характер зарегистрированных у птиц изменений окислительного метаболизма эритроцитов со-

ответствовал таковому в плазме крови, о чем свидетельствует наиболее высокий уровень показателя в миграционной стадии гельминтоза (+46,7% относительно контроля; $p < 0,05$), однако особенностью реакции клеточного пула крови на инвазию можно считать сохранение и более медленное купирование этих сдвигов при локализации трихинелл в мышцах [13, 19-23, 29-31]. Это характеризует достаточно высокий уровень параметра в ранней мышечной стадии (+39,6% по сравнению со здоровыми курами; $p < 0,05$), несколько снижающийся только в поздней стадии (+26,9% соответственно; $p < 0,05$).

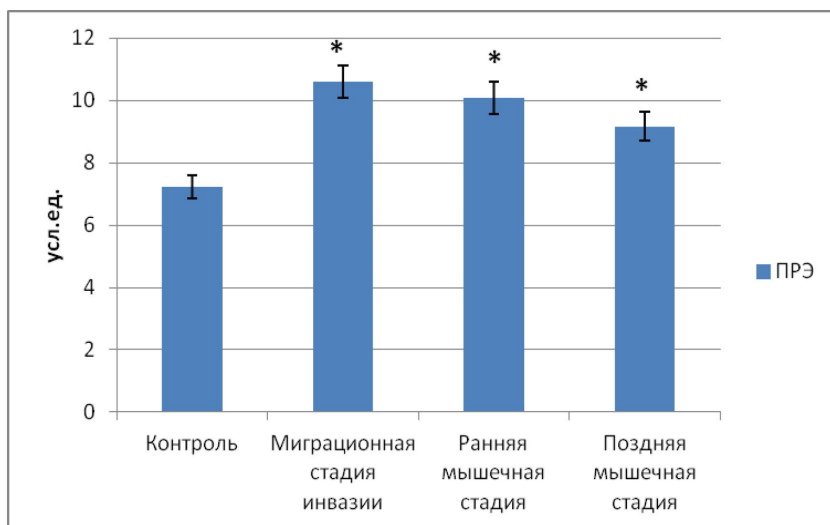


Рис. 3. Перекисная резистентность эритроцитов кур-несушек в различные стадии экспериментальной инвазии («*» - статистическая значимость различий относительно контрольной группы $p < 0,05$)

Fig. 3. Peroxide resistance of red blood cells from laying hens at various stages of experimental infection («*» indicates statistically significant differences from the control group, $p < 0.05$)

Обсуждение

Ранее Б.Л. Гаркави (1994, 1996) указывал, что неспособность вызывать образование капсулы в мышечном волокне свидетельствуют о древности происхождения вида *T. pseudospiralis*. По-видимому, он является наиболее примитивным в роде *Trichinella*. Многие исследователи отмечали (Сапунов, А.Я., Пшеничный А.А., Боляхина С.А., Ефремова Е.А., 2002-2023), что трихинеллезная инвазия у куриных, вызванная *T.pseudospiralis* (кишечная и мы-

шечная форма), обуславливает определенные изменения морфологических и биохимических показателей крови у птицы. При анализе динамики изменения соотношения эозинофилов к общему числу лейкоцитов указывается, что их количество в лейкограмме повышено на протяжении инвазии. Однако, Боляхина С.А., с соавт. (2022) указывали, что на 9 день была зарегистрирована эозинопения. Наши предыдущие исследования, несмотря на наличие некоторых сдвигов в гемограмме также подтверждали, что все гематологические показатели незначительно отличаются от физиологической нормы и не могут быть маркерами инвазионного процесса. Настоящее исследование позволило уточнить ряд особенностей в морфологии и биохимии крови в зависимости от стадии развития трихинеллезного процесса. Установлено, что экспериментальный трихинеллез у кур-несушек приводит к увеличению количества лейкоцитов (гранулоцитов и агранулоцитов), в крови появляются большие (активированные) лимфоциты и плазмобласты, количество которых увеличивается на протяжении инвазии. Вышесказанное обусловлено тем, что длительный контакт с метаболитами сопровождается более выраженными изменениями в картине крови, по сравнению с млекопитающими [1-3; 6; 13]. Также впервые проведенный анализ окислительного метаболизма крови кур в динамике экспериментального заражения подтвердил, что его изменения зависят от стадии гельминтоза. Так, по данным биохимическим люминесцентной оценки интенсивности свободнорадикальных процессов в плазме крови птиц, наличие трихинеллеза способствует существенному нарастанию соответствующего параметра, так как нахождение гельминта в организме птиц обеспечивает стимуляцию липопероксидации.

Заключение

Инвазия *Trichinella pseudospiralis* у кур-несушек приводит к значительным сдвигам гематологических и метаболических параметров гомеостаза, вызывая выраженную перестройку в системе крови, зависящую от стадии гельминтоза. Установлено, что наиболее серьезные сдвиги основных гематологических показателей (в частности, количества эритроцитов и уровня гемоглобина), а также свободнорадикальных процессов в плазме крови и эритроцитах наблюдаются в миграционной стадии паразитоза и частично сглаживаются при инокуляции трихинелл в мышцах. Также, необходимо отметить, что плазма крови птиц реагирует на смену стадии экспериментальной инвазии более активно, чем клеточный пул крови.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

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

Список литературы

1. Автандилов, Г. Г. (1990). *Медицинская морфометрия: руководство*. Медицина. 384 с.
2. Асатрян, А. М., & Мовсесян, С. О. (1985). Биологические и морфологические особенности *T. pseudospiralis* у различного вида хозяев. В *Материалы докладов 4-й Всесоюзной конференции по проблеме трихинеллеза человека и животных* (с. 30–35). Ереван.
3. Боляхина, С. А., & Ефремова, Е. А. (2023). Сравнение морфологических изменений в крови кур при экспериментальном заражении *T. spiralis* и *T. pseudospiralis*. *Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями*, (24), 95–99. <https://doi.org/10.31016/978-5-6048555-6-0.2023.24.95-99>. EDN: <https://elibrary.ru/YGEMYD>
4. Бритов, В. А. (1982). *Возбудители трихинеллеза*. Наука. 272 с.
5. Гаркави, Б. Л. (2007). Трихинеллез, вызываемый *Trichinella pseudospiralis* (морфология и биология возбудителя, эпизоотология и эпидемиология, диагностика, меры борьбы и профилактика). *Российский паразитологический журнал*, (2), 35–116. EDN: <https://elibrary.ru/KDRQIF>
6. Гаркави, Б. Л. (1994). *Гельминтозоозы: меры борьбы и профилактика*. 50 с.
7. Жданова, О. Б., Ашихмин, С. П., Окулова, И. И., & Бельтюкова, З. Н. (2017). Распространённость *T. spiralis* и некоторые особенности профилактики трихинеллеза в Кировской области. *Здоровье населения и среда обитания — ЗНСО*, (1), 46–49. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2017-286-1-46-49>. EDN: <https://elibrary.ru/XXRFKL>
8. Жданова, О. Б., Часовских, О. В., Руднева, О. В., & Успенский, А. В. (2023). К вопросу об изменении морфологии селезенки при нематодозах у мышей при иммуностимуляции. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(3), 11–25. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-11-25>. EDN: <https://elibrary.ru/BWEZCJ>
9. Жданова, О. Б., & Часовских, О. В. (2024). Изучение распределения личинок в мышцах и некоторые показатели периферической крови *Gallus gallus* при экспериментальном заражении *Trichinella pseudospiralis*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(4), 63–81. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-4-1236>. EDN: <https://elibrary.ru/HIIPLL>
10. Мезенцев, С. В. (2012). Эпизоотологические аспекты распространения трихинеллеза в Алтайском крае и защиты человека и животных от этой инвазии. *Вестник НГАУ*, (2), 89–94.

11. Мезенцев, С. В. (2005). Безопасность мяса птицы отряда куриных в личных подсобных хозяйствах. *Практик*, (7–8), 23–27.
12. Мартусевич, А. К., & Жданова, О. Б. (2006). Информативность исследования свободного кристаллообразования при зоонозах на модели лабораторных животных. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион*, (1), 30–39. EDN: <https://elibrary.ru/HVDMUV>
13. Мартусевич, А. К., & Жданова, О. Б. (2013). Исследование зависимости кристаллогенной активности биосреды от интенсивности экспериментальной инвазии *Trichinella spiralis*. *Российский паразитологический журнал*, (2), 64–71. EDN: <https://elibrary.ru/REPHNN>
14. Мартусевич, А. К., Жданова, О. Б., & Зверева, Т. А. (2006). О кристаллогенезе биосубстратов животных. *Вятский медицинский вестник*, (3–4), 33–38. EDN: <https://elibrary.ru/PBPOBD>
15. Одоевская, И. М., & Букина, Л. А. (2014). Брюхоногие моллюски и их роль в передаче трихинеллезной инвазии. *Медицинская паразитология и паразитарные болезни*, (3), 20–22. EDN: <https://elibrary.ru/TSFTAD>
16. Одоевская, И. М. (2011). Значение птиц в диссеминации личинок *Trichinella spp.* в прибрежных и водных биоценозах. *Медицинская паразитология и паразитарные болезни*, (1), 12–16. EDN: <https://elibrary.ru/UNDOGN>
17. Одоевская, И. М. (2007). Диагностическая эффективность экскреторно-секреторных антигенов трихинелл в иммуноферментной реакции. *Медицинская паразитология и паразитарные болезни*, (4), 19–24. EDN: <https://elibrary.ru/PIZREN>
18. Пшеничный, А. А. (2003). *Эпизоотологические и клинко-патогенетические аспекты трихинеллеза птиц* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата ветеринарных наук]. Краснодар. 187 с.
19. Пшеничный, А. А. (2004). *Эпизоотологические и клинко-патогенетические аспекты трихинеллеза птиц* [Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата ветеринарных наук]. Ставропольский государственный аграрный университет. Ставрополь. 30 с. EDN: <https://elibrary.ru/NHMRWX>
20. Сапунов, А., Пшеничный, А., & Иващенко, А. (2006). Трихинеллез птиц: распространение, биология. *Птицеводство*, (1), 15. EDN: <https://elibrary.ru/NYJMFV>
21. Шайкенов, Б. Ш., & Соколова, Л. А. (1981). О распространении *Trichinella pseudospiralis* в природе. В *Материалы докладов 3-й Всесоюзной конференции по проблеме трихинеллеза человека и животных* (с. 71–73). Вильнюс.
22. Barido, F. H., & Son, K. L. (2021). Changes in the activity of proteolytic enzymes, signs associated with tenderness, and quality properties of chicken breast under the

- influence of adenosine 5'-monophosphate when stored in the refrigerator. *Poultry Science*. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101056>
23. Boulou, L. M., Samara, L. A., & Hagaz, H. J. A. (1995). B *8th International Conference of Trichinellosis: Abstract Book* (p. 29). Rome.
24. Bruschi, F., Pozio, E., Watanabe, N., et al. (1999). *International Archives of Allergy and Immunology*, 119(4), 291–296.
25. Cabaj, W. (1987). *Acta Parasitologica Polonica*, 32(4), 361–367.
26. Napisanova, L. A., Zhdanova, O. B., Okulova, I. I., & Uspensky, A. V. (2018). Features of the distribution of trichinella larvae in muscles in a raccoon dog. *Theory and Practice of Controlling Parasitic Diseases*, (19), 324. EDN: <https://elibrary.ru/YTEGYT>
27. Jongwutiwes, S., Chantachum, N., Kraivichian, P., Siriwasatien, P., Putaporntip, C., Tamburrini, A., La Rosa, G. F., Sreesunpasirikul, C., Yingyord, P., & Pozio, E. (1998). First outbreak of human trichinellosis caused by *Trichinella pseudospiralis*. *Clinical Infectious Diseases*, 26(1), 111–115. <https://doi.org/10.1086/516278>
28. Pozio, E., La Rosa, G., Rossi, P., & Murrell, K. D. (1992). *Journal of Parasitology*, 78(4), 647–653.
29. Pozio, E., Christensson, D., Steen, M., & Marucci, G. (2004). *Trichinella pseudospiralis* foci in Sweden. *Veterinary Parasitology*, 125, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2004.07.020>. EDN: <https://elibrary.ru/LZRARJ>
30. Ranque, S., Faugère, B., Pozio, E., La Rosa, G., Tamburrini, A., Pellisier, J. F., & Brouqui, P. (2000). *Trichinella pseudospiralis* outbreak in France. *Emerging Infectious Diseases*, 6(5), 543–547. <https://doi.org/10.3201/eid0605.000517>
31. Rudneva, O. V., Napisanova, L. A., Zhdanova, O. B., & Berezhko, V. K. (2018). Evaluation of the protective activity of different immunostimulatory drugs at the experimental trichinosis on white mice. *International Journal of High Dilution Research*, 17(2), 17–18. EDN: <https://elibrary.ru/SCXENM>
32. Penkova, P. A. (1976). B *Fourth International Conference on Trichinellosis* (pp. 31–32). Poznan, Poland.
33. Seryodkin, I. V., Odoyevskaya, I. M., Konyaev, S. V., & Spiridonov, S. E. (2020). *Trichinella* infection of wild carnivores in Primorsky Krai, Russian Far East. *Nature Conservation Research*, 5(S2), 31–40. <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.040>. EDN: <https://elibrary.ru/SBNVRV>
34. Zhdanova, O., Haidarova, A. A., Napisanova, L. A., Rossohin, D., & Lozhnicina, O. (2015). The possibility of using *Trichinella spiralis* as an experimental model in the field of high dilutions. *International Journal of High Dilution Research*, 14(2), 60–61. <https://doi.org/10.51910/ijhdr.v14i2.796>. EDN: <https://elibrary.ru/VAKWGZ>
35. Zhdanova, O. B., Rudneva, O. V., Akulinina, Yu. K., & Napisanova, L. A. (2019). Evaluation of the effectiveness of different immunostimulatory medicine at the ex-

perimental trichinosis and leishmaniosis on white mice. *International Journal of High Dilution Research*, 18(2), 12. <https://doi.org/10.51910/ijhdr.v18i02.998>. EDN: <https://elibrary.ru/XMWVFZ>

References

1. Avtandilov, G. G. (1990). *Medical morphometry: A guide*. Meditsina. 384 pp.
2. Asatryan, A. M., & Movsesyan, S. O. (1985). Biological and morphological features of *T. pseudospiralis* in various host species. In *Proceedings of the 4th All-Union Conference on the Problem of Trichinellosis in Humans and Animals* (pp. 30–35). Yerevan.
3. Bolyakhina, S. A., & Efremova, E. A. (2023). Comparison of morphological changes in the blood of chickens during experimental infection with *T. spiralis* and *T. pseudospiralis*. *Teoriya i praktika bor'by s parazitarnymi boleznyami*, (24), 95–99. <https://doi.org/10.31016/978-5-6048555-6-0.2023.24.95-99>. EDN: <https://elibrary.ru/YGEMYD>
4. Britov, V. A. (1982). *Trichinellosis pathogens*. Nauka. 272 pp.
5. Garkavi, B. L. (2007). Trichinellosis caused by *Trichinella pseudospiralis* (morphology and biology of the pathogen, epizootiology and epidemiology, diagnosis, control and prevention measures). *Rossiyskiy parazitologicheskii zhurnal*, (2), 35–116. EDN: <https://elibrary.ru/KDRQIF>
6. Garkavi, B. L. (1994). *Helminth zoonoses: Control and prevention measures*. 50 pp.
7. Zhdanova, O. B., Ashikhmin, S. P., Okulova, I. I., & Beltyukova, Z. N. (2017). Prevalence of *T. spiralis* and some features of trichinellosis prevention in the Kirov Region. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya — ZNiSO*, (1), 46–49. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2017-286-1-46-49>. EDN: <https://elibrary.ru/XXRFLK>
8. Zhdanova, O. B., Chasovskikh, O. V., Rudneva, O. V., & Uspensky, A. V. (2023). On the issue of spleen morphology changes in mice with nematodiasis under immunostimulation. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(3), 11–25. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-11-25>. EDN: <https://elibrary.ru/BWEZCJ>
9. Zhdanova, O. B., & Chasovskikh, O. V. (2024). Study of larval distribution in muscles and some peripheral blood parameters of *Gallus gallus* during experimental infection with *Trichinella pseudospiralis*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(4), 63–81. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-4-1236>. EDN: <https://elibrary.ru/HIIPLL>
10. Mezentsev, S. V. (2012). Epizootiological aspects of trichinellosis spread in the Altai Territory and protection of humans and animals from this invasion. *Vestnik NGAU*, (2), 89–94.
11. Mezentsev, S. V. (2005). Safety of poultry meat (order Galliformes) in private subsidiary farms. *Praktik*, (7–8), 23–27.

12. Martusevich, A. K., & Zhdanova, O. B. (2006). Informativeness of free crystal formation studies in zoonoses using a laboratory animal model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region*, (1), 30–39. EDN: <https://elibrary.ru/HVD-MUV>
13. Martusevich, A. K., & Zhdanova, O. B. (2013). Study of the dependence of the crystallogenic activity of a biological medium on the intensity of experimental *Trichinella spiralis* invasion. *Rossiyskiy parazitologicheskiy zhurnal*, (2), 64–71. EDN: <https://elibrary.ru/REPHNN>
14. Martusevich, A. K., Zhdanova, O. B., & Zvereva, T. A. (2006). On the crystallogenesis of animal biosubstrates. *Vyatskiy meditsinskiy vestnik*, (3–4), 33–38. EDN: <https://elibrary.ru/PBPOBD>
15. Odoevskaya, I. M., & Bukina, L. A. (2014). Gastropods and their role in the transmission of trichinellosis invasion. *Meditsinskaya parazitologiya i parazitarnye bolezni*, (3), 20–22. EDN: <https://elibrary.ru/TSFTAD>
16. Odoevskaya, I. M. (2011). The significance of birds in the dissemination of *Trichinella spp.* larvae in coastal and aquatic biocenoses. *Meditsinskaya parazitologiya i parazitarnye bolezni*, (1), 12–16. EDN: <https://elibrary.ru/UNDOGN>
17. Odoevskaya, I. M. (2007). Diagnostic efficacy of excretory-secretory antigens of trichinella in the enzyme immunoassay. *Meditsinskaya parazitologiya i parazitarnye bolezni*, (4), 19–24. EDN: <https://elibrary.ru/IIZREH>
18. Pshenichnyy, A. A. (2003). *Epizootiological and clinicopathological aspects of avian trichinellosis* [Doctoral dissertation, Candidate of Veterinary Sciences]. Krasnodar. 187 pp.
19. Pshenichnyy, A. A. (2004). *Epizootiological and clinicopathological aspects of avian trichinellosis* [Abstract of doctoral dissertation, Candidate of Veterinary Sciences]. Stavropol State Agrarian University. Stavropol. 30 pp. EDN: <https://elibrary.ru/NHMRWX>
20. Sapunov, A., Pshenichnyy, A., & Ivashchenko, A. (2006). Avian trichinellosis: Distribution, biology. *Ptitsevodstvo*, (1), 15. EDN: <https://elibrary.ru/NYJMFV>
21. Shaikenov, B. Sh., & Sokolova, L. A. (1981). On the spread of *Trichinella pseudospiralis* in nature. In *Proceedings of the 3rd All-Union Conference on the Problem of Trichinellosis in Humans and Animals* (pp. 71–73). Vilnius.
22. Barido, F. H., & Son, K. L. (2021). Changes in the activity of proteolytic enzymes, signs associated with tenderness, and quality properties of chicken breast under the influence of adenosine 5'-monophosphate when stored in the refrigerator. *Poultry Science*. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101056>
23. Boulos, L. M., Samara, L. A., & Hagaz, H. J. A. (1995). In *8th International Conference of Trichinellosis: Abstract Book* (p. 29). Rome.

24. Bruschi, F., Pozio, E., Watanabe, N., et al. (1999). *International Archives of Allergy and Immunology*, 119(4), 291–296.
25. Cabaj, W. (1987). *Acta Parasitologica Polonica*, 32(4), 361–367.
26. Napisanova, L. A., Zhdanova, O. B., Okulova, I. I., & Uspensky, A. V. (2018). Features of the distribution of trichinella larvae in muscles in a raccoon dog. *Theory and Practice of Controlling Parasitic Diseases*, (19), 324. EDN: <https://elibrary.ru/YTEGYF>
27. Jongwutiwes, S., Chantachum, N., Kraivichian, P., Siriyasatien, P., Putaporntip, C., Tamburrini, A., La Rosa, G. F., Sreesunpasirikul, C., Yingyoud, P., & Pozio, E. (1998). First outbreak of human trichinellosis caused by *Trichinella pseudospiralis*. *Clinical Infectious Diseases*, 26(1), 111–115. <https://doi.org/10.1086/516278>
28. Pozio, E., La Rosa, G., Rossi, P., & Murrell, K. D. (1992). *Journal of Parasitology*, 78(4), 647–653.
29. Pozio, E., Christensson, D., Steen, M., & Marucci, G. (2004). *Trichinella pseudospiralis* foci in Sweden. *Veterinary Parasitology*, 125, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2004.07.020>. EDN: <https://elibrary.ru/LZRARJ>
30. Ranque, S., Faugère, B., Pozio, E., La Rosa, G., Tamburrini, A., Pellisier, J. F., & Brouqui, P. (2000). *Trichinella pseudospiralis* outbreak in France. *Emerging Infectious Diseases*, 6(5), 543–547. <https://doi.org/10.3201/eid0605.000517>
31. Rudneva, O. V., Napisanova, L. A., Zhdanova, O. B., & Berezhko, V. K. (2018). Evaluation of the protective activity of different immunostimulatory drugs at the experimental trichinosis on white mice. *International Journal of High Dilution Research*, 17(2), 17–18. EDN: <https://elibrary.ru/SCXENM>
32. Penkova, R. A. (1976). In *Fourth International Conference on Trichinellosis* (pp. 31–32). Poznan, Poland.
33. Seryodkin, I. V., Odoysvskaya, I. M., Konyaev, S. V., & Spiridonov, S. E. (2020). Trichinella infection of wild carnivores in Primorsky Krai, Russian Far East. *Nature Conservation Research*, 5(S2), 31–40. <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.040>. EDN: <https://elibrary.ru/SBNVRV>
34. Zhdanova, O., Haidarova, A. A., Napisanova, L. A., Rossohin, D., & Lozhnicina, O. (2015). The possibility of using *Trichinella spiralis* as an experimental model in the field of high dilutions. *International Journal of High Dilution Research*, 14(2), 60–61. <https://doi.org/10.51910/ijhdr.v14i2.796>. EDN: <https://elibrary.ru/VAKWGZ>
35. Zhdanova, O. B., Rudneva, O. V., Akulinina, Yu. K., & Napisanova, L. A. (2019). Evaluation of the effectiveness of different immunostimulatory medicine at the experimental trichinosis and leishmaniosis on white mice. *International Journal of High Dilution Research*, 18(2), 12. <https://doi.org/10.51910/ijhdr.v18i02.998>. EDN: <https://elibrary.ru/XMWVZF>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

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

Вятский ГАТУ; ВНИИП – филиал ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН

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

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

Мартусевич Андрей Кимович, доктор биологических наук, профессор, в.н.с. лаборатории инновационных технологий пищевых производств

Вятский ГАТУ

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

cryst-mart@yandex.ru

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

Вятский ГАТУ

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

beoli@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

Cheremushkinskaya Str., Moscow, 117218, Russian Federation

oliabio@yandex.ru

Andrey K. Martusevich, Ph.D. in Biological Sciences, Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Innovative Food Production Technologies

Vyatka State Agrotechnological University
133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, 610017, Russian Federation
cryst-mart@yandex.ru

Olga V. Chasovskikh, Candidate of Veterinary Sciences, Head of the Department of Morphology, Microbiology, Chemistry, and Pharmacology
Vyatka State Agrotechnological University
133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, 610017, Russian Federation
beoli@mail.ru

Поступила 10.05.2025

После рецензирования 11.07.2025

Принята 30.07.2025

Received 10.05.2025

Revised 11.07.2025

Accepted 30.07.2025

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432)

EDN: [GLOWAJ](https://www.edn.ru/GLOWAJ)

УДК 636.2.082:612.015.1:612.453.9

Original article



Влияние уровня адреналина на мясную продуктивность и качество мяса бычков абердин-ангусской породы при определении его содержания в волосе

А.Н. Фролов¹, О.А. Завьялов¹, З.А. Галиева^{1,2}

¹ФГБНУ ФНИЦ БСТ РАН, Оренбург, Российская Федерация

²БашГАУ, Уфа, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Интенсификация современного животноводства неизбежно приводит к усилению стрессовой нагрузки на организм животных, что негативно сказывается на их продуктивности и качестве продукции. Существующие методы оценки стрессового состояния по биологическим жидкостям (кровь, слюна) обладают существенным недостатком - они отражают лишь кратковременные гормональные колебания. В этой связи особую актуальность приобретает поиск надежных интегральных показателей хронического стресса, среди которых перспективным представляется определение концентрации адреналина в волосе.

Цель. Изучить влияние уровня адреналина оцененного по волосу на мясную продуктивность, качество мяса и минеральный обмен у бычков абердин-ангусской породы.

Материалы и методы. Исследование выполнено на 50 бычках абердин-ангусской породы. Концентрацию адреналина определяли методом иммуноферментного анализа в образцах волос, отобранных с холки животных. На основании полученных данных процентильным методом сформированы три экспериментальные группы: I - с низким (1,24-1,55 нг/мл), II - с умеренным (1,58-2,69 нг/мл) и III - с высоким (2,76-3,14 нг/мл) уровнем гормона. После проведения контрольного убоя выполнена комплексная оценка убойных показателей, морфологического состава туш, химического анализа и определение минерального профиля длиннейшей мышцы спины. Статистическая обработка данных проведена с использованием пакета программ Statistica 10.0.

Результаты. Установлено, что повышенный уровень адреналина ассоциирован со снижением массы парной туши на 5,8%, убойной массы - на 6,0%. При ухудшении качественных характеристик говядины: содержание внутримышечного жира снижалось на 18%, энергетическая ценность - на 11%, концентрация кальция - на 22%, калия - на 31%, цинка - на 18%, селена - на 28%.

Концентрация адреналина в волосе может служить репрезентативным биомаркером хронического стресса, оказывающего существенное влияние на продуктивность и качественные характеристики мяса.

Ключевые слова: мясное скотоводство; бычки; откорм; мясная продуктивность; волос; гормоны; стресс; адреналин

Для цитирования. Фролов, А. Н., Завьялов, О. А., & Галиева, З. А. (2026). Влияние уровня адреналина на мясную продуктивность и качество мяса бычков абердин-ангусской породы при определении его содержания в волосе. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 60–82. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432>

The influence of adrenaline level on meat productivity and meat quality of Aberdeen Angus bulls based on its determination in hair

A.N. Frolov¹, O.A. Zavyalov¹, Z.A. Galieva^{1,2}

¹FSSI FRC BST RAS, Orenburg, Russian Federation

²BashSAU, Ufa, Russian Federation

Abstract

Background. The intensification of modern animal husbandry inevitably leads to increased stress load on animals, which negatively affects their productivity and product quality. Existing methods for assessing stress status using biological fluids (blood, saliva) have a significant drawback - they reflect only short-term hormonal fluctuations. In this regard, the search for reliable integral indicators of chronic stress becomes particularly relevant, among which the determination of adrenaline concentration in hair appears promising.

Purpose. To study the effect of adrenaline levels assessed in hair on meat productivity, meat quality and mineral metabolism in Aberdeen Angus bulls.

Materials and methods. The study was performed on 50 Aberdeen Angus bulls. Adrenaline concentration was determined by enzyme immunoassay in hair samples collected from the animals' withers. Based on the data obtained, three experimental groups were formed by the percentile method: I - with low (1.24-1.55 ng/ml), II - with

moderate (1.58-2.69 ng/ml) and III - with high (2.76-3.14 ng/ml) hormone levels. After control slaughter, a comprehensive assessment of slaughter indicators, morphological composition of carcasses, chemical analysis and determination of the mineral profile of the longissimus dorsi muscle was performed. Statistical data processing was performed using the Statistica 10.0 software package.

Results. It was found that elevated adrenaline levels were associated with a decrease in hot carcass weight by 5.8% and slaughter weight by 6.0%. With deterioration of beef quality characteristics: intramuscular fat content decreased by 18%, energy value by 11%, calcium concentration by 22%, potassium by 31%, zinc by 18%, selenium by 28%.

Adrenaline concentration in hair can serve as a representative biomarker of chronic stress that significantly affects productivity and meat quality characteristics.

Keywords: beef cattle farming; bulls; fattening; meat productivity; hair; hormones; stress; adrenaline

For citation. Frolov, A. N., Zavyalov, O. A., & Galieva, Z. A. (2026). The influence of adrenaline level on meat productivity and meat quality of Aberdeen Angus bulls based on its determination in hair. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 60–82. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432>

Введение

В условиях глобализации сельского хозяйства и растущего спроса на высококачественную мясную продукцию проблема хронического стресса у сельскохозяйственных животных выходит на первый план. Интенсификация животноводства, сопровождающаяся изменением условий содержания, транспортировкой, ветеринарными обработками и другими технологическими воздействиями, приводит к длительному на организм животных воздействию стресс-факторов. Хронический стресс не только снижает благополучие крупного рогатого скота, но и негативно влияет на ключевые показатели продуктивности, включая прирост живой массы, конверсию корма и качественные характеристики мяса [10, p. 95; 18, p. 26].

В связи с этим разработка надежных и объективных методов оценки стрессовой нагрузки приобретает особую значимость для современного животноводства. Традиционно уровень стресса оценивают по концентрации гормонов кортизола и адреналина в крови, слюне или моче [13, p. 3]. Однако эти методы имеют существенные ограничения: они отражают лишь кратковременные гормональные изменения и сильно зависят от времени взятия проб, условий транспортировки и даже индивидуальной реакции животного на процедуру забора биоматериала [47, p. 591; 51, p. 1060-61]. В результате полученные данные не всегда позволяют достовер-

но оценить кумулятивное воздействие стрессоров на организм в течение продолжительного периода. В последние годы в качестве перспективной альтернативы для долгосрочного мониторинга стресса активно исследуется волосяной покров животных [2, р. 19]. Гормоны стресса, включая адреналин, способны накапливаться в волосах в процессе их роста, что позволяет ретроспективно анализировать уровень стрессовой нагрузки за несколько недель или даже месяцев [19, р. 13]. Этот метод уже успешно применяется в исследованиях на людях и лабораторных животных, однако его валидация для сельскохозяйственных видов, особенно мясного скота, остается недостаточно изученной [37, р. 104383]. Особый интерес представляет изучение адреналина как маркера хронического стресса у бычков специализированных мясных пород, таких как абердин-ангусская. Эта порода широко используется в мясном скотоводстве благодаря высокой скороспелости, выраженной мраморности мяса и адаптивным качествам [5, р. 953; 38, р. 1124]. Однако, согласно исследованиям, животные мясных пород могут быть более чувствительны к стрессу по сравнению с молочными, что потенциально влияет на их продуктивность и качество мяса [16, р. 3644]. В частности, хроническая активация симпатoadреналовой системы способна изменять метаболические процессы в мышечной ткани, что может отражаться на таких ключевых параметрах, как активность ферментов протеолиза (кальпаинов и катепсинов), влияющих на нежность мяса [24, р. 36; 56, р. 109652], соотношение быстрых и медленных мышечных волокон, определяющее текстуру и сочность продукта [22, р. 830, 26, р. 3], окислительно-восстановительный баланс, связанный с сохранностью мяса при хранении [49, р. 182], а также водосвязывающую способность, влияющую на потери при термической обработке [21, р. 523]. Несмотря на растущий интерес к использованию волос в качестве биоматериала, многие аспекты остаются малоизученными. В частности, недостаточно данных о методологии анализа – отсутствуют унифицированные протоколы экстракции и детекции адреналина из волосяного покрова крупного рогатого скота [43, р. 349; 46, р. 73], корреляция с продуктивностью – не установлены четкие взаимосвязи между уровнем адреналина в волосе и показателями мясной продуктивности [40, р. 579], породных особенностях – влияние генетических факторов на накопление катехоламинов [7, р. 452; 48, р. 3084], а также отсутствуют нормативные значения для оценки степени стрессовой нагрузки [29, р. 100437]. Проведение данного исследования позволит не только восполнить эти пробелы, но и разработать практические рекомендации для животноводческих предприятий. Внедрение

метода анализа адреналина в волосе может стать важным инструментом для объективной оценки уровня хронического стресса у крупного рогатого скота, прогнозирования качества мясной продукции на ранних этапах откорма, оптимизации технологий содержания с учетом поведенческих и физиологических особенностей животных, а также повышения рентабельности производства за счет снижения потерь, связанных со стресс-индуцированным снижением продуктивности. Таким образом, данная работа вносит вклад как в фундаментальные аспекты физиологии стресса у сельскохозяйственных животных, так и в развитие практических решений для современного мясного скотоводства.

Цель исследования – изучение влияния уровня адреналина, оцененного по его концентрации в волосе на мясную продуктивность и качество мяса бычков абердин-ангусской породы.

Материалы и методы

Исследование выполнено в ИП КФХ Набоян К.А. (Кинельский район, Самарская область) на бычках абердин-ангусской породы ($n=50$) в возрасте 18 месяцев, от которых перед убоем произведен отбор волос для определения в нем концентрации адреналина. На основании полученных данных животных распределили на три группы: I группа ($n=14$): концентрация адреналина ≤ 25 -го перцентиля; II группа ($n=19$): 25-75-й перцентили; III группа ($n=17$): ≥ 75 -го перцентиля. Основанием выбора данных интервалов послужили ранее проведенные исследования [35, р. 459].

Бычки в период заключительного откорма (15-18 мес.) получали полноценный рацион, который раздавали трижды в сутки. Кормовая смесь включала 60 % концентратов (дроблёная кукуруза, ячмень, пшеница, рожь и премикс) и 40 % грубых и сочных кормов (сено разнотравное, суданской травы и сенаж люцерны). Условия кормления и содержания в процессе заключительного откорма (15-18 месяцев) были идентичными для всех обследованных животных и соответствовали рекомендуемым нормам кормления скота [1, с. 170]. Реализация предлагаемых методов и подходов, заявленных в исследовании, осуществлялась с использованием приборной базы центра коллективного пользования ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», г. Оренбург и убойного пункта хозяйства.

Оценка убойных показателей и отбор средних проб мяса. Убой животных осуществляли по достижении ими 18-месячного возраста с последующей классификацией туш согласно действующим стандартам

(ГОСТ 34120-2017). Для лабораторных анализов отбирали пробы мышечной ткани: из каждой левой полутуши после суточного охлаждения при температуре 2-4°C, весом: 400 г мясного фарша (средняя проба) и 200 г длиннейшей мышцы спины (участок между 9-11 ребрами). Лабораторные исследования включали: определение содержания влаги и сухих веществ (ГОСТ 33319-2015), количественного содержания белка (ГОСТ 25011-2017), уровень жира (ГОСТ 23042-2015), содержание золы (ГОСТ 31727-2012), на основании которых производили расчет энергетической ценности. Дополнительно в длиннейшей мышце спины проводили измерение водородного показателя (pH) и влагоудерживающей способности.

Методика определения уровня адреналина. Отбор проб волос проводили однократно перед убоем животных, забирая материал с верхней части холки (минимальная навеска 0,4 г) [34, р. 633]. Для стрижки использовали профессиональную машинку Heiniger Saphir (Швейцария) с металлическими ножами, устанавливая высоту среза 1,5 мм. Во избежание контаминации лезвия перед каждым отбором проб обрабатывали 96 %-ным этанолом. Все манипуляции выполняли в одноразовых перчатках Elegreen TPE из винилтеплогового каучука, срезая волосы максимально близко к коже. Образцы помещали в сухие бумажные конверты и хранили в затемнённом месте при комнатной температуре до начала анализа. Очистку проб осуществляли по следующему протоколу: замачивание в дистиллированной воде при 40-60°C в течение 3 ч, двухчасовая ультразвуковая обработка в 40 % этаноле (частота 35 кГц, мощность 300 (450) Вт, амплитуда 10 мм), затем аналогичная по параметрам обработка в бидистиллированной воде. Очищенные образцы измельчали в вибрационной мельнице IMC vMILL05 со стальным размольным узлом до достижения медианного размера частиц (d_{50}) 20 мкм. Экстракцию гормонов проводили по модифицированной методике, ранее апробированной для исследований на человеке и приматах [33, р. 50882]. Концентрацию гормона в образцах определяли с помощью иммуноферментного анализа на микропланшетном анализаторе Infinite F200 PRO («Tecan», Австрия), используя ИФА набор Bovine Epinephrine/Adrenaline, EPI ELISA Kit со следующими характеристиками: диапазон обнаружения: 0,1–100 нг/мл, чувствительность: 0,1 нг/мл, объем исследуемого образца: 50–100 мкл, длина волны детекции: 450 нм (Cusabio Technology LLC, Ltd).

При проведении лабораторных анализов также использовали хроматограф газовый Кристалл-4000 Люкс (СКБ «Хроматэк», Россия), систему капиллярного электрофореза капель 105 (ООО «Люмэкс-Маркетинг»,

Россия), экстрактор Сокслета (Полтавский завод медицинского стекла, Украина), гомогенизатор TissueLyser LT («Qiagen N.V.», Германия), центрифугу Min-iSpin («Eppendorf», Германия). Все измерения проводились с соблюдением стандартных методик и требований к лабораторным исследованиям.

Статистический анализ. Обработку данных проводили с помощью программного обеспечения Statistica 10.0 (разработка «StatSoft, Inc.», США). Для определения достоверности различий применяли t-критерий Стьюдента, при этом порог статистической значимости устанавливали на уровне $p \leq 0,05$. Результаты представлены в виде средних величин (M) с указанием стандартной ошибки среднего ($\pm SEM$).»

Результаты и обсуждение

Проведенный сравнительный анализ кумулятивной концентрации адреналина в волосяном покрове бычков экспериментальных групп выявил статистически значимые межгрупповые различия (рис. 1).

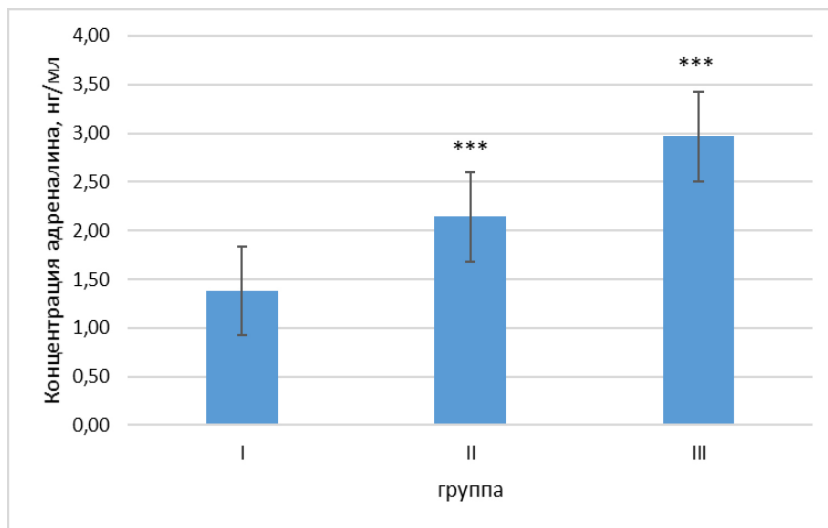


Рис. 1. Концентрация адреналина в волосе бычков абердин-ангусской породы в разрезе сформированных групп, нг/мл

*, **, *** Соответственно $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,001$ по сравнению с I группой.

Fig. 1. Adrenaline concentration in the hair of Aberdeen-Angus bulls, broken down by treatment group, ng/mL

*, **, *** $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, and $p \leq 0.001$, respectively, compared with Group I.

Наибольшие показатели зафиксированы в III группе, где среднее содержание адреналина составило $2,966 \pm 0,125$ нг/мл. Проведенный дисперсионный анализ подтвердил высокую достоверность различий между группами: показатели III группы превышали значения I на 114,91 % ($p \leq 0,001$), а II - на 38,60 % ($p \leq 0,01$). Детальный анализ индивидуальной вариабельности показал следующие диапазоны концентраций: в I группе минимальные значения находились в интервале 1,242-1,546 нг/мл, во II группе диапазон составлял 1,578-2,691 нг/мл, в III группе зафиксирован максимальный разброс показателей - 2,755-3,137 нг/мл. Полученные данные свидетельствуют о выраженной гетерогенности стрессовой нагрузки у животных разных групп. Узкий диапазон вариабельности в I группе (0,304 нг/мл) указывает на относительную однородность адреналинового статуса этих животных, в то время как широкий разброс значений в III группе (0,382 нг/мл) отражает индивидуальные различия в реакции на стресс-факторы. Особого внимания заслуживает прогрессивный характер увеличения концентрации адреналина от I к III группе, что коррелирует с интенсивностью воздействия стрессовых факторов в условиях эксперимента. Статистическая значимость различий ($p \leq 0,001-0,01$) подтверждает репрезентативность полученных данных и позволяет рассматривать уровень адреналина в волосе в качестве надежного биомаркера хронического стресса. Выявленные межгрупповые различия могут быть обусловлены различной чувствительностью симпато-адреналовой системы животных к стрессовым воздействиям, а также индивидуальными особенностями метаболизма катехоламинов.

Концентрация адреналина в волосе достоверно повлияла на все основные убойные показатели бычков во всех опытных группах (табл. 1).

По мере увеличения уровня адреналина в волосе происходило снижение убойных показателей. Так, бычки I группы превосходили сверстников II и III по предубойной массе на 2,55 ($P \leq 0,05$) и 4,20 % ($P \leq 0,01$), массе парной туши – на 3,72 ($P \leq 0,05$) и 5,84 % ($P \leq 0,001$), массе внутреннего жира – на 3,45 ($P \leq 0,05$) и 7,69 % ($P \leq 0,01$), убойной массе – на 3,70 ($P \leq 0,01$) и 5,95% ($P \leq 0,001$) соответственно. Снижение мясной продуктивности при стрессе согласуется с данными других исследований. Известно, что адреналин, выделяющийся в ответ на стресс, активирует катаболические процессы, усиливая распад мышечного гликогена и угнетая синтез белка [25, р. 1293]. Это объясняет уменьшение массы туши и убойного выхода у животных с повышенным уровнем адреналина. Кроме того, стрессовые факторы, такие как погодные условия, ранговые взаимоотношения, преду-

бойное содержание, способствуют снижению жиросотложения [11, р. 14], это связано с мобилизацией энергетических резервов, включая активизацию липазы и процесса расщепления триглицеридов [17, р. 252]. Полученные межгрупповые различия по убойной массе, также могут быть связаны с изменением гидратации мышечной ткани под воздействием адреналина [54, р. 172].

Таблица 1.

Результаты контрольного убоя подопытных бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 1. Results of the control slaughter of Aberdeen-Angus bull calves, by hair adrenaline concentration ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Предубойная живая масса, кг	527,36 $\pm$ 4,8 ^{ab}	514,26 $\pm$ 4,65	506,10 $\pm$ 4,32
Масса парной туши, кг	301,48 $\pm$ 2,92 ^{ab}	290,67 $\pm$ 2,81	284,84 $\pm$ 2,53
Выход туши, %	57,17 $\pm$ 0,314 ^b	56,52 $\pm$ 0,317	56,28 $\pm$ 0,309
Масса внутреннего жира-сырца, кг	19,47 $\pm$ 0,232 ^{ab}	18,82 $\pm$ 0,227 ^c	18,08 $\pm$ 0,208
Выход внутреннего жира-сырца, %	3,69 $\pm$ 0,172	3,66 $\pm$ 0,162	3,57 $\pm$ 0,128
Убойная масса, кг	320,95 $\pm$ 2,27 ^{ab}	309,49 $\pm$ 2,08 ^c	302,92 $\pm$ 1,87
Убойный выход, %	60,86 $\pm$ 0,42	60,18 $\pm$ 0,37	59,85 $\pm$ 0,35

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Морфологический состав туш, установленный методом обвалки, продемонстрировал зависимость мясных качеств от уровня адреналина, ретроспективно определенного в волосяном покрове (табл. 2).

Анализ полученных данных выявил превосходство I группы по массе охлажденной туши на 3,90 ($P \leq 0,05$) и 5,84 % ($P \leq 0,001$), массе мякоти – на 4,23 ($P \leq 0,05$) и 6,78 % ($P \leq 0,01$), при снижении массы костей – на 2,06 и 3,39 % ($P \leq 0,05$) по сравнению со II и III группами соответственно. Эти результаты согласуются с данными Zhao G, (2022) [55, р. 108664], которые установили, что повышенный уровень адреналина ускоряет гликогенолиз в мышечной ткани, приводя к снижению массы туши. Полученные нами данные о снижении массы костей в группах с высоким адреналином подтверждают выводы о катаболическом действии адреналина на костную ткань [23, р. 442]. Адреналин индуцирует окислительный стресс в мышечной ткани, что проявляется в снижении выхода мякоти [20, р. 686]. Кроме того, полученные нами результаты подтверждают выводы о негативном

влиянии повышенного уровня катехоламинов на мясную продуктивность [28, р. 252]. Механизм наблюдаемых изменений может быть объяснен активацией β -адренорецепторов под действием эпинефрина, что приводит к мобилизации энергетических ресурсов и подавлению анаболических процессов [44, р. 329].

Таблица 2.

Морфологический состав туш бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 2. Morphological composition of Aberdeen Angus bull carcasses, depending on the concentration of adrenaline in the hair ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the Research Institute of the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Масса охлажденной туши, кг	297,54 $\pm$ 3,042 ^{ab}	286,39 $\pm$ 3,062	281,12 $\pm$ 3,026
Масса мякоти, кг	239,86 $\pm$ 3,056 ^{ab}	230,12 $\pm$ 3,038	224,62 $\pm$ 3,038
Выход мякоти, %	80,61 $\pm$ 0,248 ^b	80,35 $\pm$ 0,248	79,90 $\pm$ 0,234
Масса костей, кг	47,58 $\pm$ 0,372 ^b	46,76 $\pm$ 0,334	46,53 $\pm$ 0,324
Выход костей, %	15,99 $\pm$ 0,152 ^b	16,33 $\pm$ 0,142	16,55 $\pm$ 0,136
Масса сухожилий и связок, кг	10,10 $\pm$ 1,748	9,51 $\pm$ 1,782	9,97 $\pm$ 1,732
Выход сухожилий и связок, %	3,39 $\pm$ 0,234	3,32 $\pm$ 0,234	3,55 $\pm$ 0,232
Индекс мясности	5,04 $\pm$ 0,122	4,92 $\pm$ 0,126	4,83 $\pm$ 0,122
Показатель пищевой ценности	4,47 $\pm$ 0,106	4,36 $\pm$ 0,108	4,28 $\pm$ 0,096

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Биохимический состав мышечной ткани служит ключевым диагностическим критерием качества мяса, отражая его физиологическую зрелость, энергетическую ценность и эффективность конверсии питательных веществ корма в условиях различного адреналинового статуса организма (табл. 3).

В мякоти туш бычков I группы больше содержалось сухого вещества – на 0,15 и 0,75 % ($P \leq 0,05$), жира – на 0,23 и 0,9 % ($P \leq 0,05$), синтезировано в мякоти жира – на 6,10 ($P \leq 0,001$) и 14,66 % ($P \leq 0,001$), увеличилась и энергетическая ценность мякоти туши – на 5,14 ($P \leq 0,01$) и 11,07 % ($P \leq 0,001$). Полученные нами данные свидетельствуют о том, что низкие уровни адреналина способствует более эффективному липогенезу и накоплению энергетических ресурсов в мышечной ткани [9, р. 11]. Выявленные различия в химическом составе мякоти туш связаны по нашему мнению с тем, что адреналин, как ключевой гормон симпатoadреналовой системы, оказывает

влияние на мобилизацию энергетических субстратов [36, p. 70]. При хронически повышенном уровне адреналина усиливается липолиз, проявляющийся в снижении депонирования жира в тканях [3, p. 2500]. В то же время у животных с более низкой концентрацией адреналина преобладают анаболические процессы, что способствует увеличению содержания жира и энергетической ценности мяса.

Таблица 3.

Химический состав и энергетическая ценность мякоти туш бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 3. Chemical composition and energy value of the carcass meat of Aberdeen Angus bulls, depending on the concentration of adrenaline in the hair ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Сухое вещество, %	33,1 $\pm$ 0,156 ^b	32,95 $\pm$ 0,168 ^c	32,35 $\pm$ 0,136
Протеин, %	18,98 $\pm$ 0,21	19,08 $\pm$ 0,202	19,14 $\pm$ 0,198
Жир, %	13,11 $\pm$ 0,186 ^b	12,88 $\pm$ 0,182	12,21 $\pm$ 0,172
Зола, %	1,01 $\pm$ 0,062	0,99 $\pm$ 0,07	1,0 $\pm$ 0,068
Синтезировано в мякоти, кг:			
протеина	45,53 $\pm$ 1,192	43,91 $\pm$ 1,167	42,99 $\pm$ 1,093
жира	31,45 $\pm$ 0,278 ^{ab}	29,64 $\pm$ 0,302 ^c	27,43 $\pm$ 0,296
Энергетическая ценность 1 кг мякоти, МДж	8,36 $\pm$ 0,134	8,29 $\pm$ 0,172	8,04 $\pm$ 0,184
Энергетическая ценность мякоти туши, МДж	2005,9 $\pm$ 18,08 ^{ab}	1907,8 $\pm$ 17,96 ^c	1805,9 $\pm$ 17,58

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Влияние уровня адреналина (определенного в волосе) на аккумуляцию интрамускульного жира оценивали посредством анализа химического состава длиннейшей мышцы спины у бычков абердин-ангусской породы (табл. 4).

Поведенный анализ выявил достоверные различия в концентрации адреналина в волосе между группами бычков, что оказало значимое влияние на биохимический состав длиннейшей мышцы спины (m. longissimus dorsi). У животных I группы с минимальным уровнем адреналина (1,242-1,546 нг/мл) отмечено наибольшее содержание внутримышечного жира (на 0,35-0,4% выше, $P \leq 0,05$) и триптофана (на 3,74-6,31% выше, $P \leq 0,05-0,01$) в мышечной ткани. Эти результаты коррелируют с данными Park et

al. (2018) [39, p. 1044], которые установили обратную зависимость между концентрацией катехоламинов и интенсивностью липогенеза в скелетных мышцах. Повышенное содержание триптофана может свидетельствовать об изменении протеолитических процессов, что подтверждается исследованиями Martin et al. (2014) [31, p. 4206], связавшими уровень этой аминокислоты с водосвязывающей способностью мышечных белков. Бычки III группы с максимальной концентрацией адреналина характеризовались достоверно меньшим содержанием жира (на 0,10-0,29 %, $P \leq 0,05$) и более высоким уровнем белка (на 0,47-0,82 %, $P \leq 0,01$) в мышечной ткани по сравнению с другими группами. По-видимому, это связано с активирующим влиянием адреналина на протеинкиназу А и последующее усиление протеосинтеза [53, p. 58]. Кроме того, обнаруженные изменения в составе мышечной ткани могут быть связаны с адреналин-индуцированной модуляцией гидратации миофибриллярных белков [27, p. 1115; 52, p. 540].

Таблица 4.

Химический состав и энергетическая ценность длиннейшей мышцы спины бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойн К.А.)

Table 4. Chemical composition and energy value of the longissimus dorsi muscle of Aberdeen Angus bulls, depending on the concentration of adrenaline in the hair ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Сухое вещество, %	24,82 $\pm$ 0,158	24,51 $\pm$ 0,140	24,4 $\pm$ 0,142
Протеин, %	21,63 $\pm$ 0,142	21,68 $\pm$ 0,204	21,62 $\pm$ 0,132
Жир, %	2,19 $\pm$ 0,121 ^b	1,84 $\pm$ 0,142	1,79 $\pm$ 0,136
Зола, %	1,00 $\pm$ 0,081	0,99 $\pm$ 0,078	0,99 $\pm$ 0,074
Энергетическая ценность 1 кг мякоти, МДж	4,57 $\pm$ 0,094	4,44 $\pm$ 0,76	4,41 $\pm$ 0,082
Триптофан, мг/%	376,71 $\pm$ 3,65 ^{ab}	363,12 $\pm$ 2,94 ^c	354,36 $\pm$ 3,38
Оксипролин, мг/%	54,90 $\pm$ 0,58	55,18 $\pm$ 0,52	55,48 $\pm$ 0,48
pH	5,46 $\pm$ 0,098	5,52 $\pm$ 0,108	5,72 $\pm$ 0,104
Влагоёмкость, %	55,22 $\pm$ 0,356	54,78 $\pm$ 0,344	54,48 $\pm$ 0,308
БКП	6,9 $\pm$ 0,120 ^b	6,6 $\pm$ 0,118	6,4 $\pm$ 0,112

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Результаты исследования устанавливают прямую связь между кумулятивной концентрацией адреналина в волосе, отражающей хронический стресс, и

изменением элементного состава мышечной ткани. Повышение уровня адреналина коррелирует со значительными сдвигами в содержании основных минералов, что указывает на нарушение физиологического статуса животных и может служить диагностическим критерием скрытого стресса (Табл.5).

Таблица 5.

Содержание химических элементов в длиннейшей мышце спины бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 5. Chemical element content in the longest back muscle of Aberdeen-Angus bulls, as a function of adrenaline concentration in the hair ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Макроэлементы			
Ca	364,2 $\pm$ 11,14 ^{ab}	310,5 $\pm$ 14,59	284,6 $\pm$ 11,93
K	17602 $\pm$ 390,5 ^{ab}	13451 $\pm$ 321,2	13440 $\pm$ 471,3
Mg	1125 $\pm$ 26,7 ^b	1158 $\pm$ 22,7 ^c	928 $\pm$ 29,1
Na	2812 $\pm$ 24,4 ^a	3109 $\pm$ 35,4 ^c	2785 $\pm$ 40,5
P	8114 $\pm$ 343,3 ^a	9336 $\pm$ 318,0 ^c	7960 $\pm$ 576,3
Эссенциальные микроэлементы			
Fe	219,9 $\pm$ 19,3	186,3 $\pm$ 18,2	183,9 $\pm$ 30,4
Zn	240,6 $\pm$ 2,33 ^{ab}	221,6 $\pm$ 3,40 ^c	197,3 $\pm$ 4,28
Co	0,024 $\pm$ 0,003	0,023 $\pm$ 0,005	0,021 $\pm$ 0,004
Cr	2,11 $\pm$ 0,285	2,19 $\pm$ 0,345	1,99 $\pm$ 0,543
Cu	3,06 $\pm$ 0,027 ^b	3,08 $\pm$ 0,043 ^c	2,92 $\pm$ 0,043
I	0,408 $\pm$ 0,025 ^b	0,373 $\pm$ 0,033	0,284 $\pm$ 0,036
Mn	1,01 $\pm$ 0,122	0,93 $\pm$ 0,216	0,83 $\pm$ 0,281
Se	0,878 $\pm$ 0,051 ^b	0,848 $\pm$ 0,043 ^c	0,629 $\pm$ 0,060
Условно-эссенциальные микроэлементы			
B	1,52 $\pm$ 0,076	1,63 $\pm$ 0,093	1,52 $\pm$ 0,056
Ni	4,32 $\pm$ 0,231 ^b	4,83 $\pm$ 0,189 ^c	3,03 $\pm$ 0,396
As	0,019 $\pm$ 0,003 ^{ab}	0,031 $\pm$ 0,004	0,039 $\pm$ 0,007
Токсичные микроэлементы			
Al	27,5 $\pm$ 2,90	31,8 $\pm$ 3,62	24,8 $\pm$ 7,58
Cd	0,0030 $\pm$ 0,0004	0,0034 $\pm$ 0,0002	0,0037 $\pm$ 0,0002
Pb	0,045 $\pm$ 0,0112 ^{ab}	0,095 $\pm$ 0,0144	0,075 $\pm$ 0,0086
Sr	0,389 $\pm$ 0,050	0,459 $\pm$ 0,0741	0,473 $\pm$ 0,0824

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Установленные закономерности свидетельствуют о комплексном влиянии хронического стресса на метаболизм макро- и микроэлементов в мышечной ткани. Наблюдается достоверное снижение концентрации кальция в мышечной ткани по мере увеличения уровня адреналина: в III группе показатель был на 21,8 % ниже, чем в I ($p \leq 0,05$). Это может быть связано с активацией кальций-зависимых протеолитических ферментов калпаиновой системы под воздействием хронического стресса [45, р. 733]. Аналогичная тенденция отмечена для калия, содержание которого в I группе было на 30,9 % выше, чем в II и III группах ($p \leq 0,05$), что свидетельствует о нарушении электролитного баланса и функции Na^+/K^+ -АТФазы при повышенной адреналиновой нагрузке [6, р. 1270]. Достоверные изменения наблюдались также в содержании магния, натрия и фосфора. Повышенный уровень магния во II группе ($1158 \pm 22,7$ мг/кг) по сравнению с III ($928 \pm 29,1$ мг/кг; $p \leq 0,05$) может отражать компенсаторные механизмы поддержания мембранного потенциала клеток [45, р. 52]. Динамика содержания фосфора демонстрирует его увеличение во II группе с последующим снижением в III, что коррелирует с изменениями энергетического метаболизма в условиях стресса [4, р. 519]. Среди эссенциальных микроэлементов наиболее выраженные изменения отмечены для цинка, содержание которого последовательно снижалось от $240,6 \pm 2,33$ мг/кг в I группе до $197,3 \pm 4,28$ мг/кг в III ($p \leq 0,05$). Поскольку цинк является кофактором более 300 ферментов, его дефицит может существенно влиять на антиоксидантный статус мышечной ткани [41, р. 94]. Аналогичная тенденция наблюдалась для селена (снижение на 28,4 % в III группе по сравнению с I; $p \leq 0,05$) и йода (снижение на 30,4%), что свидетельствует об угнетении антиоксидантной защиты при хроническом стрессе [42, р. 1257]. Интересные изменения отмечены для условно-эссенциальных элементов. Содержание никеля увеличивалось во II группе ($4,83 \pm 0,189$ мг/кг) с последующим резким снижением в группе III ($3,03 \pm 0,396$ мг/кг; $p \leq 0,05$), что может отражать перераспределение этого элемента между тканями при длительном стрессе [8, р. 36]. Концентрация мышьяка прогрессивно увеличивалась от $0,019 \pm 0,003$ мг/кг в I группе до $0,039 \pm 0,007$ мг/кг в III ($p \leq 0,05$), что требует дополнительного изучения возможных механизмов его аккумуляции. Несмотря на отсутствие статистически значимых различий в содержании алюминия, кадмия и стронция, отмечена тенденция к увеличению концентрации кадмия в III группе. Содержание свинца было максимальным в группе II ($0,095 \pm 0,0144$ мг/кг), превышая показатель группы I в 2,1 раза ($p \leq 0,05$), что может быть связано с изменением проницаемости биологических барьеров при стрессе [12, р. 55]. Выявленные изменения

минерального состава могут быть объяснены несколькими физиологическими механизмами. Во-первых, хронический стресс приводит к активации симпато-адреналовой системы и повышению проницаемости клеточных мембран [14, p. 1034]. Во-вторых, изменяется распределение элементов между внутри- и внеклеточными пространствами вследствие нарушения работы ионных насосов [32, p. 877]. В-третьих, модулируется активность металл-связывающих белков и транспортных систем [30, p. 119]. Особого внимания заслуживает корреляция между уровнем адреналина и содержанием элементов, участвующих в антиоксидантной защите (Zn, Se, Cu). Их прогрессирующее снижение в группах с более высоким адреналиновым статусом свидетельствует об истощении компенсаторных механизмов при хроническом стрессе [49, p. 183]. Полученные данные имеют важное значение для разработки методов коррекции минерального обмена у животных, подвергающихся хроническому стрессу. Результаты свидетельствуют о необходимости включения в рационы дополнительных источников цинка, селена и других микроэлементов для поддержания антиоксидантного статуса и качества мяса [50, p. 71].

Полученные результаты имеют важное практическое значение для мясного скотоводства, так как позволяют прогнозировать качественные характеристики говядины на основе показателей адреналиновой активности. Для более глубокого понимания выявленных закономерностей перспективным направлением дальнейших исследований представляется изучение молекулярных механизмов влияния адреналина на экспрессию ключевых липогенных генов (PPAR γ , FASN) и оценка комплексного воздействия других стресс-гормонов на метаболизм мышечной ткани.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что определение концентрации адреналина в волосяном покрове представляет собой репрезентативный метод оценки хронического стресса у крупного рогатого скота. Полученные данные демонстрируют статистически значимое негативное влияние повышенного уровня адреналина на основные показатели мясной продуктивности и качественные характеристики говядины. Выявленные закономерности свидетельствуют о существенных нарушениях метаболических процессов при длительном воздействии стресс-факторов. Результаты исследования подтверждают перспективность использования адреналинового статуса в качестве диагностического критерия при оценке благополучия животных и прогнозировании качества продукции.

Заключение комитета по этике. Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Методика проведения эксперимента была одобрена Этическим комитетом ФНЦ БСТ РАН (протокол № 1 от 11.03.2024 г.).

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

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

Информация о спонсорстве. Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 24-16-00093

Список литературы / References

1. Калашников, А. П., Фисинин, В. И., Щеглов, В. В., & Первов, Н. Г. (2003). *Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных*. Знание. 456 с. (Kalashnikov, A. P., Fisinin, V. I., Shcheglov, V. V., & Pervov, N. G. (2003). *Norms and rations for feeding farm animals*. Znanie. 456 p.). ISBN: 5-94587-093-5. EDN: <https://elibrary.ru/PXQMHL>
2. Baier, F., Grandin, T., Engle, T., & Edwards-Callaway, L. (2019). Evaluation of hair characteristics and animal age on the impact of hair cortisol concentration in feedlot steers. *Frontiers in Veterinary Science*, 6, 323. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00323>
3. Bergen, W. G., & Mersmann, H. J. (2005). Comparative aspects of lipid metabolism: impact on contemporary research and use of animal models. *The Journal of Nutrition*, 135(11), 2499–2502. <https://doi.org/10.1093/jn/135.11.2499>
4. Berridge, M. J., Bootman, M. D., & Roderick, H. L. (2003). Calcium signalling: dynamics, homeostasis and remodelling. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 4(7), 517–529. <https://doi.org/10.1038/nrm1155>. EDN: <https://elibrary.ru/YKQCKT>
5. Chung, K. Y., Lee, S. H., Cho, S. H., Kwon, E. G., & Lee, J. H. (2018). Current situation and future prospects for beef production in South Korea — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(7), 951–960. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0187>

6. Clausen, T. (2003). $\text{Na}^+\text{-K}^+$ pump regulation and skeletal muscle contractility. *Physiological Reviews*, 83(4), 1269–1324. <https://doi.org/10.1152/physrev.00011.2003>. EDN: <https://elibrary.ru/KZASUN>
7. Cooke, A. S., Mullan, S., Morten, C., Hockenhull, J., Le Grice, P., Le Cocq, K., Lee, M. R. F., Cardenas, L. M., & Rivero, M. J. (2023). Comparison of the welfare of beef cattle in housed and grazing systems: hormones, health, and behaviour. *The Journal of Agricultural Science*, 161(3), 450–463. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000357>. EDN: <https://elibrary.ru/GTJYEB>
8. Denkhau, E., & Salnikow, K. (2002). Nickel essentiality, toxicity, and carcinogenicity. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 42(1), 35–56. [https://doi.org/10.1016/s1040-8428\(01\)00214-1](https://doi.org/10.1016/s1040-8428(01)00214-1). EDN: <https://elibrary.ru/YKJJBX>
9. Dunshea, F. R., D'Souza, D. N., Pethick, D. W., Harper, G. S., & Warner, R. D. (2005). Effects of dietary factors and other metabolic modifiers on quality and nutritional value of meat. *Meat Science*, 71(1), 8–38. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.05.001>
10. EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), Nielsen, S. S., Alvarez, J., Boklund, A., Dippel, S., Dorea, F., Figuerola, J., Herskin, M. S., Michel, V., Miranda Chueca, M. Á., Nannoni, E., Nonno, R., Riber, A. B., Stahl, K., Stegeman, J. A., Thulke, H. H., Tuytens, F., Cozzi, G., Knierim, U., ... Winckler, C. (2025). Welfare of beef cattle. *EFSA Journal*, 23(7), e9518. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9518>. EDN: <https://elibrary.ru/TPQBDK>
11. Ferguson, D. M., & Warner, R. D. (2008). Have we underestimated the impact of pre-slaughter stress on meat quality in ruminants? *Meat Science*, 80(1), 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.05.004>
12. Flora, G., Gupta, D., & Tiwari, A. (2012). Toxicity of lead: A review with recent updates. *Interdisciplinary Toxicology*, 5(2), 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
13. García-Torres, S., Cabeza de Vaca, M., Tejerina, D., Romero-Fernández, M. P., Ortiz, A., Franco, D., Sentandreu, M. A., & Oliván, M. (2021). Assessment of stress by serum biomarkers in calves and their relationship to ultimate pH as an indicator of meat quality. *Animals*, 11(8), 2291. <https://doi.org/10.3390/ani11082291>. EDN: <https://elibrary.ru/XIAHJS>
14. Goldstein, D. S. (2010). Adrenal responses to stress. *Cellular and Molecular Neurobiology*, 30(8), 1433–1440. <https://doi.org/10.1007/s10571-010-9606-9>. EDN: <https://elibrary.ru/LFKZSI>
15. Goll, D. E., Thompson, V. F., Li, H., Wei, W., & Cong, J. (2003). The calpain system. *Physiological Reviews*, 83(3), 731–801. <https://doi.org/10.1152/physrev.00029.2002>. EDN: <https://elibrary.ru/LWZUZV>

16. González, L. A., Schwartzkopf-Genswein, K. S., Bryan, M., Silasi, R., & Brown, F. (2012). Relationships between transport conditions and welfare outcomes during commercial long haul transport of cattle in North America. *Journal of Animal Science*, 90(10), 3640–3651. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4796>
17. Grandin, T. (1997). Assessment of stress during handling and transport. *Journal of Animal Science*, 75(1), 249–257. <https://doi.org/10.2527/1997.751249x>. EDN: <https://elibrary.ru/YAUYYKC>
18. Grandin, T. (2016). Evaluation of the welfare of cattle housed in outdoor feedlot pens. *Veterinary and Animal Science*, 1–2, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2016.11.001>
19. Heimbürge, S., Kanitz, E., & Otten, W. (2019). The use of hair cortisol for the assessment of stress in animals. *General and Comparative Endocrinology*, 270, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2018.09.016>
20. Holmes, J. H., Ashmore, C. R., & Robinson, D. W. (1973). Effects of stress on cattle with hereditary muscular hypertrophy. *Journal of Animal Science*, 36(4), 684–694. <https://doi.org/10.2527/jas1973.364684x>
21. Hughes, J. M., Oiseth, S. K., Purslow, P. P., & Warner, R. D. (2014). A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science*, 98(3), 520–532. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.022>
22. Joo, S. T., Kim, G. D., Hwang, Y. H., & Ryu, Y. C. (2013). Control of fresh meat quality through manipulation of muscle fiber characteristics. *Meat Science*, 95(4), 828–836. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.044>
23. Kikuchi, K., Yamada, T., & Sugi, H. (2009). Effects of adrenaline on glycogenolysis in resting anaerobic frog muscles studied by ^{31}P -NMR. *The Journal of Physiological Sciences*, 59(6), 439–446. <https://doi.org/10.1007/s12576-009-0054-6>
24. Koohmaraie, M., & Geesink, G. H. (2006). Contribution of postmortem muscle biochemistry to the delivery of consistent meat quality with particular focus on the calpain system. *Meat Science*, 74(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.025>
25. Koolhaas, J. M., Bartolomucci, A., Buwalda, B., de Boer, S. F., Flügge, G., Korte, S. M., Meerlo, P., Murison, R., Olivier, B., Palanza, P., Richter-Levin, G., Sgoifo, A., Steimer, T., Stiedl, O., van Dijk, G., Wöhr, M., & Fuchs, E. (2011). Stress revisited: a critical evaluation of the stress concept. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 35(5), 1291–1301. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.02.003>
26. Listrat, A., Lebre, B., Louveau, I., Astruc, T., Bonnet, M., Lefaucheur, L., Picard, B., & Bugeon, J. (2016). How muscle structure and composition influence meat and flesh quality. *The Scientific World Journal*, 2016, 3182746. <https://doi.org/10.1155/2016/3182746>

27. Loerch, S. C., & Fluharty, F. L. (1999). Physiological changes and digestive capabilities of newly received feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, 77(5), 1113–1119. <https://doi.org/10.2527/1999.7751113x>
28. Lowe, T. E., Devine, C. E., Wells, R. W., & Lynch, L. L. (2004). The relationship between postmortem urinary catecholamines, meat ultimate pH, and shear force in bulls and cows. *Meat Science*, 67(2), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.10.013>
29. Mackey, S. J., Cooke, R. F., de Souza, I. S., & Pickett, A. T. (2025). Effects of administering the maternal bovine appeasing substance on growth performance, cortisol level and carcass characteristics of finishing feedlot cattle. *Veterinary and Animal Science*, 29, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2025.100457>. EDN: <https://elibrary.ru/URFWXX>
30. Maret, W. (2010). Metalloproteomics, metalloproteomes, and the annotation of metalloproteins. *Metallomics*, 2(2), 117–125. <https://doi.org/10.1039/b915804a>
31. Martin, J. N., Garmyn, A. J., Miller, M. F., Hodgen, J. M., Pfeiffer, K. D., Thomas, C. L., Rathmann, R. J., Yates, D. A., Hutcheson, J. P., & Brooks, J. C. (2014). Comparative effects of beta-adrenergic agonist supplementation on the yield and quality attributes of selected subprimals from calf-fed Holstein steers. *Journal of Animal Science*, 92(9), 4204–4216. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7881>
32. McEwen, B. S. (2007). Physiology and neurobiology of stress and adaptation: central role of the brain. *Physiological Reviews*, 87(3), 873–904. <https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2006>. EDN: <https://elibrary.ru/MJUBNT>
33. Meyer, J., Novak, M., Hamel, A., & Rosenberg, K. (2014). Extraction and analysis of cortisol from human and monkey hair. *Journal of Visualized Experiments*, 83, e50882. <https://doi.org/10.3791/50882>
34. Miroshnikov, S., Kharlamov, A., Zavyalov, O., Frolov, A., Bolodurina, I., Arapova, O., & Duskaev, G. (2015). Method of sampling beef cattle hair for assessment of elemental profile. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14(9), 632–636. <https://doi.org/10.3923/pjn.2015.632.636>. EDN: <https://elibrary.ru/UZXNBR>
35. Miroshnikov, S., Zavyalov, O., Frolov, A., Bolodurina, I., Skalny, A., Kalashnikov, V., Grabeklis, A., & Tinkov, A. (2017). The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos Taurus*). *Biological Trace Element Research*, 180(1), 456–462. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0991-5>. EDN: <https://elibrary.ru/XNCEKI>
36. Möstl, E., & Palme, R. (2002). Hormones as indicators of stress. *Domestic Animal Endocrinology*, 23(1–2), 67–74. [https://doi.org/10.1016/s0739-7240\(02\)00146-7](https://doi.org/10.1016/s0739-7240(02)00146-7)
37. Mustonen, P., Karlsson, L., Kataja, E. L., Scheinin, N. M., Kortessluoma, S., Coimbra, B., Rodrigues, A. J., Sousa, N., & Karlsson, H. (2019). Maternal prenatal hair

- cortisol is associated with prenatal depressive symptom trajectories. *Psychoneuroendocrinology*, 109, 104383. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2019.104383>
38. Papaleo Mazzucco, J., Goszczynski, D. E., Ripoli, M. V., Melucci, L. M., Pardo, A. M., Colatto, E., Rogberg-Muñoz, A., Mezzadra, C. A., Depetris, G. J., Giovambattista, G., & Villarreal, E. L. (2016). Growth, carcass and meat quality traits in beef from Angus, Hereford and cross-breed grazing steers, and their association with SNPs in genes related to fat deposition metabolism. *Meat Science*, 114, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.12.018>
39. Park, S. J., Beak, S. H., Jung, D. J. S., Kim, S. Y., Jeong, I. H., Piao, M. Y., Kang, H. J., Fassah, D. M., Na, S. W., Yoo, S. P., & Baik, M. (2018). Genetic, management, and nutritional factors affecting intramuscular fat deposition in beef cattle — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(7), 1043–1061. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0310>
40. Pochigaeva, K., Druzhkova, T., Yakovlev, A., Onufriev, M., Grishkina, M., Chepelev, A., Guekht, A., & Gulyaeva, N. (2017). Hair cortisol as a marker of hypothalamic-pituitary-adrenal axis activity in female patients with major depressive disorder. *Metabolic Brain Disease*, 32(2), 577–583. <https://doi.org/10.1007/s11011-017-9952-0>. EDN: <https://elibrary.ru/YUWJQX>
41. Prasad, A. S. (1995). Zinc: an overview. *Nutrition*, 11(1 Suppl), 93–99.
42. Rayman, M. P. (2012). Selenium and human health. *The Lancet*, 379(9822), 1256–1268. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61452-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61452-9)
43. Reid, J., Parker, K., Clemens, L., & Bristow, M. (2021). Validity and reliability of method used to analyse hair cortisol concentration. *F1000Research*, 10, 349. <https://doi.org/10.12688/f1000research.28187.1>. EDN: <https://elibrary.ru/OJGEJZ>
44. Robinson, M. M., Bell, C., Peelor, F. F., 3rd, & Miller, B. F. (2011). β -Adrenergic receptor blockade blunts postexercise skeletal muscle mitochondrial protein synthesis rates in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 301(2), R327–R334. <https://doi.org/10.1152/ajp-regu.00160.2011>
45. Romani, A. M. (2013). Magnesium in health and disease. In A. Sigel, H. Sigel, & R. K. O. Sigel (Eds.), *Interrelations between essential metal ions and human diseases* (pp. 49–79). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8_3
46. Russell, E., Kirschbaum, C., Laudenslager, M. L., Stalder, T., de Rijke, Y., van Rossum, E. F., Van Uum, S., & Koren, G. (2015). Toward standardization of hair cortisol measurement: results of the first international interlaboratory round robin. *Therapeutic Drug Monitoring*, 37(1), 71–75. <https://doi.org/10.1097/FTD.0000000000000148>
47. Russell, E., Koren, G., Rieder, M., & Van Uum, S. (2012). Hair cortisol as a biological marker of chronic stress: current status, future directions and unanswered

- questions. *Psychoneuroendocrinology*, 37(5), 589–601. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.09.009>
48. Schmidt, S. E., Neuendorff, D. A., Riley, D. G., Vann, R. C., Willard, S. T., Welsh, T. H., Jr, & Randel, R. D. (2014). Genetic parameters of three methods of temperament evaluation of Brahman calves. *Journal of Animal Science*, 92(7), 3082–3087. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7494>
49. Sies, H. (2015). Oxidative stress: a concept in redox biology and medicine. *Redox Biology*, 4, 180–183. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2015.01.002>. EDN: <https://elibrary.ru/UPRKFH>
50. Spears, J. W., & Weiss, W. P. (2008). Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *The Veterinary Journal*, 176(1), 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.015>
51. Tallo-Parra, O., Manteca, X., Sabes-Alsina, M., Carbajal, A., & Lopez-Bejar, M. (2015). Hair cortisol detection in dairy cattle by using EIA: protocol validation and correlation with faecal cortisol metabolites. *Animal*, 9(6), 1059–1064. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000294>
52. Wahrenberg, H., Bolinder, J., & Arner, P. (1991). Adrenergic regulation of lipolysis in human fat cells during exercise. *European Journal of Clinical Investigation*, 21(5), 534–541. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2362.1991.tb01406.x>
53. Walker, C. E., & Drouillard, J. (2012). Effects of catecholamines on gut microflora and potential for beta-adrenergic agonists to impact ruminal fermentation. *The Open Agriculture Journal*, 6, 57–66. <https://doi.org/10.2174/1874331501206010057>
54. Warriss, P. D. (2003). Optimal lairage times and conditions for slaughter pigs: a review. *The Veterinary Record*, 153(6), 170–176. <https://doi.org/10.1136/vr.153.6.170>
55. Zhao, G., Bai, X., Tian, W., Ru, A., Li, J., Wang, H., Wang, K., Xiao, K., Zhu, C., & Li, H. (2022). The effect of shower time, electrolyte treatment, and electrical stimulation on meat quality of cattle longissimus thoracis muscle in cold weather. *Meat Science*, 184, 108664. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108664>. EDN: <https://elibrary.ru/KEMFKP>
56. Zhao, Y., Xiang, C., Roy, B. C., Bruce, H. L., Blecker, C., Zhang, Y., Liu, C., Zhang, D., Chen, L., & Huang, C. (2025). Apoptosis and its role in postmortem meat tenderness: A comprehensive review. *Meat Science*, 219, 109652. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109652>. EDN: <https://elibrary.ru/ANIUDY>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ 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*

Галиева Зулфия Асхатовна, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины; доцент

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»; ФГБОУ ВО «Бакирский государственный аграрный университет»

*ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Республика Башкортостан, Российская Федерация
zulfia2704@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksey N. Frolov, Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Beef Cattle Breeding and Beef Production Technology

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

*29, 9 Janvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
forleh@mail.ru*

SPIN-code: 8129-5450

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2554>

Scopus AuthorID: 56714917700

ResearcherID: H-7679-2017

Oleg A. Zavyalov, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Department of Beef Cattle Breeding and Beef Production Technology

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

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

oleg-zavyalov83@mail.ru

SPIN-code: 6946-7296

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2033-3956>

Scopus AuthorID: 56823498900

ResearcherID: N-4454-2014

Zulfiya A. Galieva, Candidate of Agricultural Sciences, Researcher of the Department of Beef Cattle Breeding and Beef Production Technology; Associate Professor

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education "Bashkir State Agrarian University"

29, 9 Janvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 34, 50-letiya Oktyabrya Str., Ufa, 450001, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

zulfia2704@mail.ru

SPIN-code: 5315-9065

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6588-3316>

Поступила 21.08.2025

После рецензирования 22.09.2025

Принята 30.09.2025

Received 21.08.2025

Revised 22.09.2025

Accepted 30.09.2025

Физиология и биохимия растений / Plant Physiology and Biochemistry

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1416](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1416)EDN: [GLQLNN](https://www.edn.ru/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1416)

УДК 631.671.3:633.852.73



Оценка морфо-физиологических признаков листьев *Olea europaea* L. в связи с засухоустойчивостью

С.Ю. Цюпка, И.В. Булавин, А.В. Синченко, В.А. Цюпка

ФГБУН «Никитский ботанический сад-Национальный научный центр»,
Ялта, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Маслина европейская (*Olea europaea* L.) является одной из основных плодовых культур в мире. Мировое выращивание оливок оценивается в 10,9 млн гектаров, большая часть из которых находится в зоне недостаточного водообеспечения. Разработка новых высокоурожайных сортов, устойчивых к засухе, является одной из наиболее эффективных стратегий повышения урожайности маслины. Однако селекция по данному признаку осложняется отсутствием быстрых, воспроизводимых методов скрининга устойчивости к гидротермическому стрессу из-за вовлечения в реакцию ряда физиологических и морфологических признаков.

Цель – определить морфологические и физиологические признаки, связанные с засухоустойчивостью маслины европейской и пригодные для массового анализа селекционного материала.

Материалы и методы. Исследования проводили в 2022-2024 гг. на 60-летних деревьях, с плотностью посадки 400 деревьев на га и южной экспозицией склона. В качестве объектов были выбраны 14 генотипов *O. europaea* различного генетического происхождения. Структурные и физиологические исследования, а также статистический анализ выполняли общепринятым способом.

Результаты. Выявлена зависимость между морфологическими характеристиками листа, показателями водного режима растений и относительным выходом электролита. Самые высокие коэффициенты корреляции отмечены между относительным выходом электролита и площадью устьичной щели ($r=0,89$), а также индексом площади трихом ($r=-0,85$). По шкале корреляции Чеддока такие коэффициенты говорят о высокой зависимости между данными параметрами.

Заключение. Отмечена значительная вариация морфологических признаков, ассоциированных с засухоустойчивостью, некоторые из которых могут быть использованы в качестве биомаркеров для дифференциации сортов и гибридов маслины. Полученные результаты исследований могут быть использованы при скрининге селекционных коллекций *O. europaea* на признак засухоустойчивости.

Ключевые слова: маслина; стресс; дегидратация; засуха; устьица; трихомы; площадь листа

Для цитирования. Цюпка, С. Ю., Булавин, И. В., Синченко, А. В., & Цюпка, В. А. (2026). Оценка морфо-физиологических признаков листьев *Olea europaea* L. в связи с засухоустойчивостью. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 83–114. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1416>

Evaluation of morpho-physiological traits of *Olea europaea* L. associated with the drought-resistance

S.Y. Tsiupka, I.V. Bulavin, A.V. Sinchenko, V.A. Tsiupka

Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center, Yalta, Russian Federation

Abstract

Background. Olive (*Olea europaea* L.) is one of the main fruit crops in the world. According to IOC (International olive council) the world olive cultivation is estimated at 10.9 million hectares, most of which is located in the zone of insufficient water supply. The development of new high-yielding varieties tolerant to drought is one of the most effective strategies to increase olive yields. However, breeding for drought tolerance is complicated by the lack of rapid, reproducible screening methods due to the involvement of a number of physiological and morphological traits in the response.

Purpose. Determine the morphological and physiological characteristics associated with drought resistance of olives and suitable for mass analysis of breeding material.

Materials and methods. The experiments were performed in 2022-2024 on 60-year-old trees planted 5x5 m apart, with a planting density of 400 trees per ha and southern exposure of the slope. 14 olive genotypes different by origins were selected. Structural and physiological investigation, as well as statistical analysis, was conducted according to the generally accepted method.

Results. Leaf morphological traits were studied to reduce water loss in 14 European olive genotypes. Leaf measurements included the following leaf characteristics: density of stomata and trichomes, leaf length, width and area, leaf mass per unit area, leaf tissue density, etc., as well as physiological parameters: leaf water-holding capacity, cuticular transpiration rate and relative electrolyte yield observed during cell membrane damage. The highest correlation coefficients for the relative electrolyte yield were noted

with the stomatal slit area ($r=0.89$) and the trichome area index ($r=-0.85$). According to the Chaddock correlation scale, such coefficients indicate a high dependence between these parameters.

Keywords: olive; stress; dehydration; drought; stomata; trichomes; leaf area

For citation. Tsiupka, S. Y., Bulavin, I. V., Sinchenko, A. V., & Tsiupka, V. A. (2026). Evaluation of morpho-physiological traits of *Olea europaea* L. associated with the drought-resistance. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 83–114. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1416>

Введение

Маслина европейская (*Olea europaea* L.) является одной из основных плодовых культур в мире. По данным ИОС (International olive council) мировое выращивание оливок оценивается в 10,9 млн га, из которых около 9 млн га выращивается в Средиземноморском регионе [42]. Растущее понимание питательной ценности оливкового масла и консервной продукции привело к расширению выращивания оливковых деревьев [17; 29]. В Российской Федерации похожие почвенно-климатические условия культивируемого ареала маслины имеет Крым, что делает *O. europaea* перспективной масличной культурой для юга нашего государства. В настоящее время она выращивается в субтропической зоне Крыма и Краснодарского края, однако благодаря высокой экологической пластичности вида есть потенциал для возделывания и в других южных регионах России [56; 62].

Известно, что это оливковое дерево устойчиво к засухе, однако сейчас оно находится под угрозой из-за изменения климата, затрагивающего многие географические зоны, особенно Средиземноморский регион [20; 35-37; 47]. Сезонный недостаток поливной воды характерен также и для сельскохозяйственных угодий Юга России. По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (ИПСС) сценарии изменения климата предсказывают повышение температуры и изменение характера осадков, что приведет к повышению потребности в испарении и снижению доступности почвенной влаги [47; 57]. Засуха – это сложная форма стресса, которая влияет на различные аспекты растений, включая их морфологические, физиологические, биохимические и молекулярные характеристики [17; 47; 55]. Как правило, это негативные изменения, которые приводят к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, в том числе маслины [13; 67]. В связи с этим, крайне важно использовать все доступные инструменты для мониторинга, обнаружения и управления культивированием оливок в условиях засухи.

Снижение экономических потерь возможно при выращивании сортов *O. europaea*, способных адаптироваться к стрессовым условиям, и отбору новых генотипов, устойчивых к гидротермическому стрессу [17; 32; 33]. В то же время селекция маслины осложняется отсутствием быстрых, воспроизводимых методов скрининга из-за вовлечения в реакцию ряда физиологических и морфологических признаков [23; 47]. При анализе засухоустойчивости маслины ряд исследователей выделяют параметры водного режима [31; 48; 59], устьичную и мезофильную проводимость [48; 60], чувствительность фотосинтеза, дыхания и эффективность использования воды [6; 40; 41], особенности структурной организации листьев [10; 16; 28] и проводящей системы (побеги с узкими сосудами ксилемы высокой плотности описаны у Baselag и Dichio [11; 27]. Показано влияние засухи на окислительно-восстановительный статус и гормональную динамику растений *O. europaea* [12; 18; 41; 50].

В то же время, для отбора новых продуктивных и устойчивых генотипов актуален поиск надежных и доступных критериев для масштабного скрининга засухоустойчивых гибридов [15; 44]. В связи с этим, *целью исследования* было определение морфологических и физиологических признаков, связанных с засухоустойчивостью маслины европейской и пригодных для массового анализа селекционного материала.

Материалы и методы

Для исследований использовали растения *O. europaea*, произрастающие на коллекционных участках Никитского ботанического сада – Национального научного центра (НБС–ННЦ, Ялта) в одинаковых климатических и почвенных условиях. Места отбора проб и проведения экспериментов обозначены координатами GPS (44°51'24' N, 34°23'94' E, 200 м над уровнем моря).

Исследования проводили в 2022–2024 гг. на 60-летних деревьях, посаженных на расстоянии 5x5 м друг от друга, с плотностью посадки 400 деревьев на га и южной экспозицией склона. Агротехнический уход за растениями соответствует рекомендациям А.Н. Казас и др. [2]: разовая норма полива 500–600 м³/га (всего 7 вегетационных поливов с годовой нормой 3500–4200 м³/га), внесение удобрений: ежегодно 350 кг сульфат аммония, 75 кг/га калийной соли и 250 кг/га суперфосфата. Химические обработки проводили смесью препаратов по рекомендациям V. Korzin [45]: «Фуфанон» (Cheminova A/S, Дания), «Фитолавин» (Фармбиомедсервис, Россия) и «Фалькон» (Bayer, Германия).

На основании ранее проведенных исследований засухоустойчивости 62 гибридов маслины были выделены генотипы с контрастной засухоустойчивостью [5]. Двенадцать контрастных по засухоустойчивости генотипов были отобраны для дальнейшего детального исследования (из них 10 устойчивых: 35-2/14, 35-2/30, 35-4/31, 35-5/31, 35-6/11, 35-6/15, 35-8/25, 35-8/26, 35-16/13, 35-9/5 и два неустойчивых генотипа: 35-11/25, 35-4/15). Сорта Ascolano и Corregiolo были использованы в качестве контрольных. Corregiolo – мировой стандарт, один из наиболее распространенных сортов масличного назначения [42]; Ascolano (syn. Ascolana Tenera) – один из наиболее распространенных сортов столового (консервного) назначения, мировой стандарт в засухоустойчивости маслины европейской [30; 42; 46].

Период отбора проб соответствовал наиболее засушливым условиям вегетационного сезона на ЮБК (вторая декада августа). В это время преобладала жаркая, ветреная и сухая погода. Максимальная температура воздуха днем повышалась до 29,7°C в 2022 г., и до 34,0°C – 34,1 °C в 2023 и 2024 гг. соответственно. Среднесуточная температура составляла 26,4°C, количество осадков за декаду не превышало 12,4 мм. Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы 26 мм (13% НВ) [3; 4].

Гидротермический стресс моделировали в лабораторных условиях с помощью климатической тест камеры Memmert CTC256 при постоянной температуре воздуха 30°C и относительной влажности воздуха 30%, что соответствует максимальному напряжению гидрометеостресса в летнее время в условиях Крыма.

Водоудерживающую способность, потерю воды в листьях определяли весовым методом [24; 58]. Измеряли вес свежих листьев (FW), вес листьев после 24-часового насыщения (TW) [43], вес высушенных листьев при 105°C. Замеры водоотдачи проводили через 24, 48 и 72 часа. Исследование показателей водного режима выполняли в период максимального воздействия засухи в трех биологических повторностях ((3 растения×20 листьев)×три раза).

Для оценки степени повреждения клеточных мембран в листовых пластинках рассчитывали скорость утечки электролита (EL) с использованием уравнения [53; 65]:

$$EL = (EC1 \div EC2) \times 100 \quad (1)$$

Электропроводность измеряли с помощью кондуктометра Starter 300с (Ohaus, США).

Морфометрический анализ листьев включал: измерение их длины и ширины, определение отношения длины к ширине, площади, сырой и су-

хой массы, удельного веса, удельной листовой поверхности и плотности. Замеры выполняли в программном обеспечении ImageJ v. 1.53 [21].

Расчетные показатели определяли по формулам [38; 52; 64]:

$$LD = (DW \div FW) \times 1000 \quad (2)$$

$$LMA = DW \div LA \quad (3)$$

$$SLA = LA \div DW \quad (4)$$

$$TAI = (\pi \times R^2) \times TD \quad (5)$$

$$T_{sp.} = TD \div StD \quad (6)$$

$$SI = StL \div StW \quad (7)$$

$$SPS = (StL \times StW \times \pi) \div 4 \quad (8)$$

$$SSC = (StW \div StL) \times 100 \quad (9)$$

$$PCA = (StL^2 \div StD) \times 100 \quad (10)$$

$$RSS = (SPS \times StD \times 100) \times 1000000 \quad (11)$$

где LD – плотность листа $г\ кг^{-1}$, LMA – удельный вес листа, $г/м^2$; SLA – удельная листовая поверхность, $м^2/кг^{-1}$, TAI – индекс площади трихом, T_{sp} – отношение количества трихом к количеству устьиц, SI – устьичный индекс, SPS – площадь устьичной щели, SSC – коэффициент формы устьиц, PCI – индекс потенциальной проводимости, RSS – относительная поверхность устьиц, DW – сухой вес листа, FW – сырой вес листа, LA – площадь листа, R – радиус трихом, TD – плотность трихом, StD – плотность устьиц, StL – длина устьичной щели, $мкм.$, StW – ширина устьичной щели, $мкм.$

Для электронной сканирующей микроскопии вырезали фрагменты листа и наклеивали их на медную пластинку с помощью термопасты Ал-Сил-3. Пластинку с препаратами закрепляли на столике замораживающей приставки «Deben Coolstage» (Великобритания). Материал исследовали с помощью СЭМ-микроскопа LEO 1430 VP (Carl Zeiss, Германия) при $-30^{\circ}C$ в условиях высокого вакуума с использованием детектора обратно отраженных электронов 4QBSD – в ускоряющем напряжении от 17 до 20 кВ и рабочем расстоянии 14-30 мм [1].

Распределение, плотность устьиц и трихом исследовали на слепках адаксиальной и абаксиальной стороны листовых пластинок [8; 66]. Анализ микропрепаратов выполняли с помощью микроскопа AxioScope A 1 (Carl Zeiss, Германия) (20 образцов $\times$ 5 полей зрения) при увеличении $200\times$ с площадью обзора $0,24\ мм^2$. Количество устьиц и трихом рассчитывали на один $мм^2$.

Статистический анализ проводили с использованием программного обеспечения Statistica 6.0 и Past v. 4.03. Графическую обработку проводили с помощью Python-библиотек Matplotlib and Scikit-learn.

Результаты и обсуждение

Показатели водного режима

Анализ показателей водного режима 14 образцов маслины выявил значительные различия в выборке. Оводненность листьев в состоянии полного насыщения составляла 67-69% без существенных различий между генотипами. Потеря воды листьями за 24 часа дегидратации варьировала от 6,6% (гибридная форма 35-16/13) до 38,4% (гибридная форма 35-4/15). По данным S. Rhizopoulou [54], а также M. Guerfel [40] листья оливы переносят чрезвычайно низкий водный потенциал (-10 МПа) и теряют до 40% воды из тканей с ненарушенной способностью к регидратации. Уже через 48 часов обезвоживания у неустойчивых генотипов были отмечены летальные значения потери воды тканями листа. Хлорозы и некрозы визуализировались на адаксиальной стороне листовой пластинки. При более значительном повреждении наблюдалось полное потемнение листовой поверхности, связанное, по всей видимости, с окислением фенольных соединений, которые попадают в межклеточное пространство при повреждении клеточной мембраны. Гибель тканей листа отчетливо просматривалась при скручивании листьев и их быстром усыхании. Варьирование показателей потери воды через 48 часов обезвоживания позволяет дифференцировать генотипы по степени засухоустойчивости. Максимальную устойчивость к обезвоживанию показал генотип 35-16/13 (рабочее название гибридной формы Эллада), у которого через 72 часа искусственной дегидратации потеря воды составляла 20,8%, в то время как у устойчивого к засухе контрольного сорта Ascolano данный показатель составил 37,9%. Показатели водоудерживающей способности листьев у всех генотипов снижались с увеличением воздействия стресс-фактора, однако у устойчивых генотипов снижение величины данного показателя не было таким выраженным как у неустойчивых (рис. 1). Гибридные формы 35-2/14, 35-2/30, 35-4/31, 35-5/31, 35-6/11, 35-6/15, 35-8/25, 35-8/26, 35-16/13, 35-9/5 по водоудерживающей способности превосходили контрольные сорта через 72 часа обезвоживания (от 15,1 до 25,15%).

Оценка повреждаемости мембран методом утечки электролита

Для оценки степени повреждения клеточных мембран, рассчитывали утечку электролита. Отмечено, что при 24 и 48 часах дегидратации у сортов и гибридных форм маслины значительных изменений в утечке электролита не выявлено, а значения были близки к контрольным условиям, что говорит об отсутствии необратимых летальных изменений в клетке (рис. 1). Исключение составляли гибридные формы 35-4/15 и 35-11/25, у

которых уже через 24 часа обезвоживания выход электролита составлял 59 и 75% соответственно, а при дальнейшей дегидратации достигал 100%.

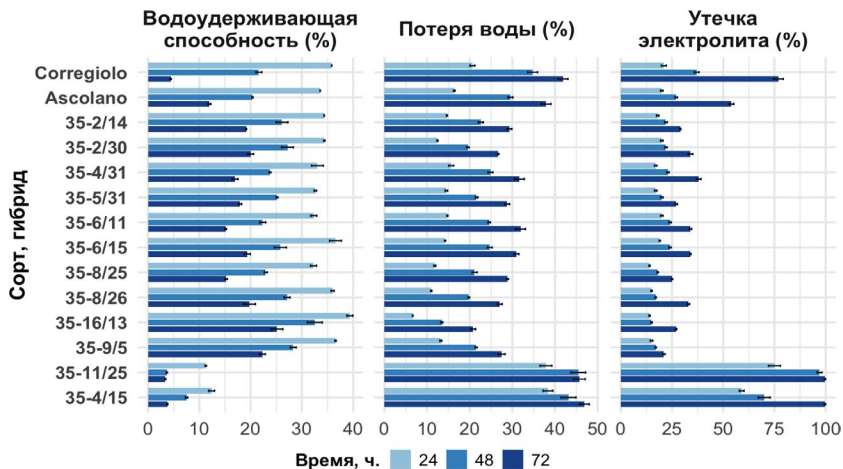


Рис. 1. Показатели водного режима и оценка повреждения тканей листа *O. europaea* методом утечки электролита

Fig. 1. Water status indicators and assessment of leaf tissue damage in *O. europaea* using the electrolyte leakage method

Относительный выход электролита, наблюдаемый при повреждении клеточной мембраны при 72 часах дегидратации тканей, варьировал от 21% (гибридная форма 35-9/5) до 100% (гибридные формы 35-4/15, 35-11/25). Значительные повреждения клеточной мембраны отмечены и у контрольных сортов, выход электролита при этом составил 54% (Ascolano) и 77% (Corregiolo).

Морфометрические характеристики листа

Листовые пластинки сортов и гибридов *O. europaea* по форме были от эллиптических до узколанцетных, цельнокрайние, опушенные, гипостоматические. Пельчатые волоски формировались с двух сторон, при этом их наибольшее количество отмечено в нижней части листа (рис. 2). Устьица аномоцитного типа. Количественные исследования трихом на адаксиальной и абаксиальной поверхности, а также устьиц выявили вариации по данным признакам (табл. 1).

Максимальное количество трихом на адаксиальной стороне листа выявлено у гибридной формы 35-2/14 (57,6 шт/мм²), на абаксиальной – у гибридной формы 35-8/25 (103,4 шт/мм²). Самая высокая плотность устьиц отмечена у гибрида 35-2/14 (460,2 шт/мм²). Среди изученных генотипов

выявлены значительные различия по длине устьичной щели: минимальные значения отмечены у устойчивых гибридных форм 35-9/5 и 35-16/13 (18,3 и 18,5 мкм соответственно), а максимальные - у неустойчивых гибридов 35-11/25 и 35-4/15 (21,7 и 21,5 мкм соответственно).

Таблица 1.

**Количественные исследования трихом и устьиц на поверхностях
листовых пластинок *O. europaea***

Table 1. Quantitative studies of trichomes and stomata on the surfaces of *O. europaea* leaf blades

Сорт, форма	Трихомы, адаксиальная сторона, шт/мм ²	Трихомы, абаксиальная сторона, шт/мм ²	Количество устьиц, шт/мм ²	Размер устьичной щели, мкм
Corregiolo	41,20±2,56 ^{gkl}	65,60±3,22 ^k	339,40±22,71	21,2±1,3 ^{hkl}
Ascolano	34,80±1,16 ^{fil}	69,20±3,87	388,80±17,75	20,6±0,9
35-2/14	57,60 ±4,92	80,2±2,18 ⁱ	460,20±9,45	20,1±1,1
35-2/30	30,56±3,09	88,00±4,05 ^a	369,10±10,21 ^{gl}	20,2±1,8
35-4/31	25,80±3,88	68,00±6,12	355,6±13,76 ^{gl}	20,1±1,9
35-5/31	27,2±3,06 ^{ab}	70,2±1,98 ^{gimk}	373,80±4,13 ^{gl}	18,6±1,9 ^{amnn}
35-6/11	31,6±2,54 ^b	82,00±1,70 ^{fi}	427,20±10,8 ^{ef}	20,2±1,1
35-6/15	29,9±2,76	74,66±2,33	389,70±9,31	19,9±1,0
35-8/25	29,40±1,60	103,40±2,52 ^{efgi}	350,40±23,59 ⁱ	18,9±1,4 ^{amnn}
35-8/26	30,00±2,12	75,20±4,85 ⁱ	405,80±16,79	19,4±1,3
35-16/13	31,20±3,65	84,40±4,00 ^{bf}	381,80±22,97	18,5±0,9 ^{amnn}
35-9/5	23,80±1,16 ^{abm}	85,80±5,25	445,60±16,76 ^{efi}	18,3±1,0 ^{amnn}
35-11/25	37,00±2,78 ^l	78,00±0,84 ^f	383,80±6,81	21,7±1,6 ^{hkl}
35-4/15	36,00±2,30	80,20±3,07	388,60±17,21	21,5±1,4 ^{hkl}

Примечание: ^{a,b}, – существенные статистические отличия между одинаковыми показателями в столбце, $p \leq 0.05$

Отмечены значительные различия между гибридами по ряду морфометрических параметров. Площадь листа изученных генотипов варьировала от 3,72 (у генотипа 35-16/13) до 6,54 см² (у генотипа 35-11/25) (табл. 2). Максимальные значения удельного веса листа (LMA) – одного из показателей склерофилии листьев отмечены у генотипа 35-16/13 (255,4 г/м²).

Показатели LMA в наших исследованиях были близки к данным полученным Е.А. Bacelar [10] в засушливых условиях на сортах испанской и португальской селекции. Как отмечает Centritto [19], листья засухоустойчивых сортов, имеют более высокую LMA, что является следствием увеличения плотности или толщины листовой ткани. По комплексу морфометрических показателей листа, ассоциированных с признаком засухоустойчивости выделена гибридная форма 35-16/13.

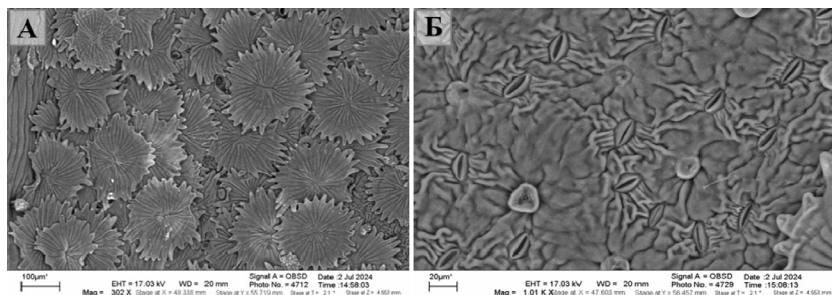


Рис. 2. Снимок поверхности листовой пластинки гибрида 35-2/30 *O. europaea* (сканирующая электронная микроскопия)

Fig. 2. Image of the surface of a leaf blade of the hybrid 35-2/30 *O. europaea* (scanning electron microscopy)

Примечание: А – пельтатные волоски абаксиальной поверхности, Б – устьища на абаксиальной поверхности.

Таблица 2.

Оценка морфологических показателей листьев *O. europaea*

Table 2. Assessment of morphological characteristics of *O. europaea* leaves

Сорт, форма	L	W	L/W	LA	FW	DW	LMA	SLA	LD
Corregiolo	63,39	13,79*	4,60*	5,91	0,206	0,119	201,21	4,97*	577,67
Ascolano	61,12	11,71	5,22	5,16	0,196	0,116	224,81	4,45	591,84
35-2/14	64,18	12,16	5,28	5,66	0,201	0,114	201,41	4,96*	567,16
35-2/30	49,06*	10,01	4,90	3,81*	0,168*	0,097*	254,59*	3,93*	577,38
35-4/31	55,98	11,07	5,06	4,84	0,188	0,103	212,81	4,70	547,87*
35-5/31	69,11*	12,26	5,64	6,48	0,223*	0,127	195,99*	5,10*	569,51
35-6/11	60,78	11,62	5,23	5,05	0,199	0,113	223,76	4,47	567,84
35-6/15	54,09	11,43	4,73*	4,88	0,187	0,106	217,21	4,60	566,84
35-8/25	62,71	11,37	5,52	5,17	0,198	0,111	214,70	4,66	560,61
35-8/26	52,17*	10,76	4,85	4,67	0,173*	0,102	218,41	4,58	589,60
35-16/13	48,44*	9,87*	4,91	3,72*	0,166*	0,095*	255,38*	3,92*	572,28
35-9/5	51,54*	10,94	4,71*	4,64	0,176*	0,101	217,67	4,59	573,86
35-11/25	68,36*	12,55	5,45	6,54*	0,219*	0,120	183,49*	5,45*	547,95*
35-4/15	62,69	11,35	5,52	5,16	0,197	0,112	217,05	4,61	568,53
HCP _{0.05}	7,11	1,80	0,46	1,33	0,018	0,016	27,78	0,50	43,86

Примечание: L – длина листа, мм; W – ширина листа, мм; LA – площадь листа, см²; FW – сырой вес листа, г; DW – сухой вес листа, г; LMA – удельный вес листа, г/м²; SLA – удельная листовая поверхность, м²/кг⁻¹; LD – плотность листа г кг⁻¹, * – существенная разница с контролем (Ascolano)(при p≤0.05, n=300)

Корреляционный анализ

Отмечены тесные корреляционные связи между показателями водного режима растений (водоудерживающая способность и потеря воды листьями) и относительным выходом электролита (рис. 3). Высокие показатели корреляции позволяют использовать эти параметры в качестве биомаркеров для селекционного отбора маслины на признак засухоустойчивости.

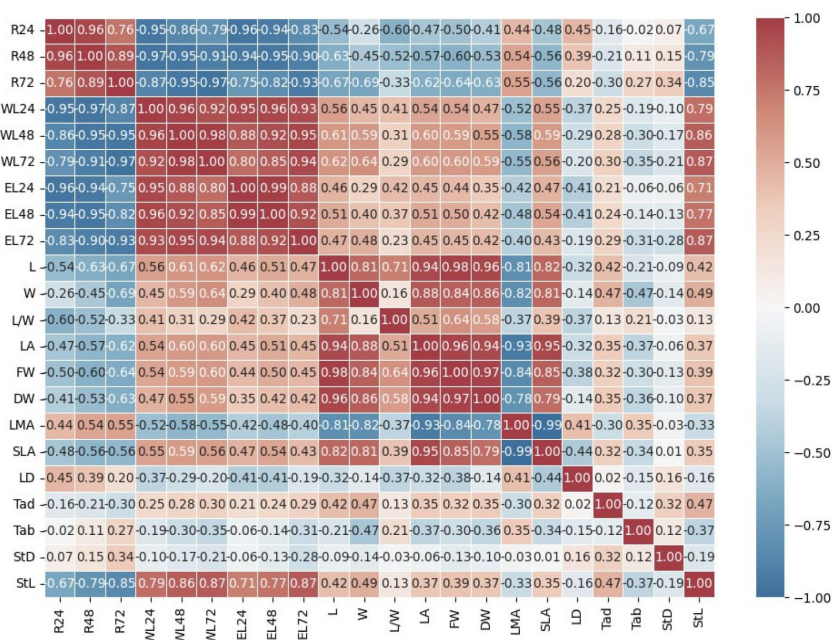


Рис. 3. Тепловая карта корреляции между морфофизиологическими параметрами, ассоциированными с признаком засухоустойчивости
Fig. 3. Heat map showing the correlation between morphophysiological parameters associated with drought tolerance

Примечание: R24, R48 и R72 – водоудерживающая способность листьев *O. europaea* через 24, 48 и 72 часа обезвоживания; WL24, WL48 и WL72 – потеря воды листьями через 24, 48 и 72 часа дегидратации; EL24, EL48 и EL72 – относительный выход электролита через 24, 48 и 72 часа обезвоживания, %, L – длина листа, W – ширина листа, LA – площадь листа, FW – сырой вес листа, DW – сухой вес листа, LMA – удельный вес листа, г/м²; SLA – удельная листовая поверхность, м²/кг⁻¹, LD – плотность листа г кг⁻¹, Tad – количество трихом, адаксиальная сторона, шт./мм², Tab – количество трихом, абаксиальная сторона, шт./мм², StD – количество устьиц, шт./мм², StL – длина устьичной щели, мкм.

Также выявлена зависимость между морфологическими характеристиками листа, показателями водного режима растений и относительным выходом электролита. Самые высокие коэффициенты корреляции отмечены между размером устьичной щели и водоудерживающей способностью ($r=-0,85$), потерей воды листьями ($r=0,87$) и относительным выходом электролита ($r=0,87$). По шкале корреляции Чеддока такие коэффициенты говорят о высокой зависимости между данными параметрами. Таким образом, быстрый скрининг наиболее засухоустойчивых генотипов *O. europaea* возможен по параметрам: обезвоживание тканей листа при 72 часа дегидратации, длина устьичной щели.

Такие параметры как длина и ширина листовой пластинки, площадь листа, свежий и сухой вес листа, удельная листовая поверхность и удельный вес листа также имеют заметную ($r=0,5-0,7$) или умеренную ($r=0,3-0,5$) корреляцию с показателями водного статуса растения и утечкой электролита, однако не могут использоваться в качестве морфологических биомаркеров засухоустойчивости растения.

Анализ главных компонент

Для оценки взаимосвязей между различными изученными критериями водного режима растений маслины помимо корреляционного анализа был использован анализ основных компонент (PCA). Взаимосвязь между различными критериями водного режима растений маслины: водоудерживающей способности (R24, R48, R72), водопотерей (WL24, WL48, WL72) при искусственной дегидратации, относительным выходом электролита при повреждении клеточной мембраны графически и основными ксероморфными признаками листа представлена на рисунке (рис. 4).

Как известно косинус угла между векторами двух индексов аппроксимирует коэффициент корреляции между ними. Косинус углов не всегда точно переводится в коэффициенты корреляции, так как диаграмма не объясняет всех изменений в наборе данных. Тем не менее, углы достаточно информативны, чтобы составить целостную картину о взаимосвязях между водопотерей и другими показателями водного режима растения [63]. Как видно из рисунка наиболее информативным индикатором, имеющим отрицательную корреляцию с водопотерей (WL) и относительным выходом электролита (EL) при повреждении клеточной мембраны является водоудерживающая способность (R). Среди морфологических характеристик листа наибольшую связь с показателями водного режима и утечкой электролита показывает размер устьичной щели. Остальные показатели в наших исследованиях не выявили тесной связи с засухоустойчивостью.

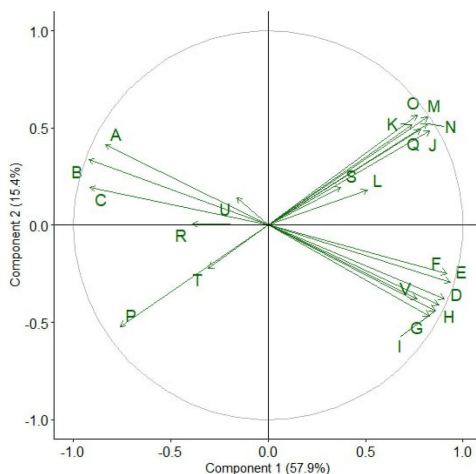


Рис. 4. Анализ главных компонент (PCA)

Fig. 4. Principal Component Analysis (PCA)

Примечание: А,В,С – водоудерживающая способность листьев *O. europaea* через 24, 48 и 72 часа обезвоживания; D,Е, F – потеря воды листьями через 24, 48 и 72 часа дегидратации; G, H, I – относительный выход электролита через 24, 48 и 72 часа обезвоживания; J – длина листа; K – сырой вес листа; L – отношение длины листа к ширине листа; M – площадь листа; N – ширина листа; O – сухой вес листа; P – удельный вес листа; Q – удельная листовая поверхность; R – плотность листа; S – количество трихом на адаксиальной стороне листа; T – количество трихом на абаксиальной стороне листа; U – количество устьиц, шт./мм²; V – длина устьичной щели.

Таблица 3.

Корреляционная матрица физиологических и морфометрических признаков

Table 3. Correlation matrix of physiological and morphometric traits

Индексы	R24	R48	R72	WL24	WL48	WL72	EL24	EL48	EL72
TAI	0.82	0.83	0.86	-0.79	-0.80	-0.84	-0.66	-0.81	-0.85
TrS	0.60	0.58	0.61	-0.73	-0.77	-0.76	-0.54	-0.68	-0.68
SI	0.54	0.49	0.49	-0.34	-0.48	-0.44	-0.37	-0.40	-0.41
SPS	-0.87	-0.83	-0.82	0.85	0.80	0.80	0.89	0.88	0.89
SSC	-0.55	-0.50	-0.52	0.43	0.39	0.40	0.52	0.50	0.59
PCI	-0.69	-0.67	-0.67	0.62	0.68	0.65	0.59	0.61	0.66
RSS	-0.89	-0.86	-0.88	0.79	0.84	0.80	0.89	0.87	0.87

Примечание: TAI – индекс площади трихом, TrS – отношение количества трихом к количеству устьиц, SI – устьичный индекс, SPS – площадь устьичной щели, SSC – коэффициент формы устьиц, PCI – индекс потенциальной проводимости, RSS – относительная поверхность устьиц

Большинство зарубежных авторов указывают на большое влияние устьиц и трихом в формировании засухоустойчивости растений *O. europaea*, в связи с этим при анализе литературы были определены основные индексы, которые теоретически могут быть использованы в качестве биомаркеров [14; 52; 64]. Практический анализ возможности использования данных коэффициентов в качестве биомаркеров засухоустойчивости проведен нами на выборке из 14 генотипов (табл. 3). Как видно из табл. 3 самую высокую корреляцию с физиологическими показателями засухоустойчивости показывают: индекс площади трихом, площадь устьичной щели и относительная поверхность устьиц. Данные показатели могут быть использованы для оценки селекционного материала маслины на признак засухоустойчивости.

Обсуждение результатов

В работе R. Razouk с соавторами отмечается высокое значение фенотипирования листьев в скрининге засухоустойчивости *O. europaea* с акцентом на структурные и функциональные признаки листьев [52]. Хорошо известно, что засухоустойчивость растений, включая маслину европейскую, определяется различными генетическими факторами, которые кодируют морфологические, фенологические, физиологические, биохимические и молекулярные признаки [26].

В нашей работе исследованы связи между морфологическими признаками листьев и реакцией оливок на водный стресс у сортов и гибридов селекции и интродукции Никитского ботанического сада. Полученные результаты коррелируют с данными R. Razouk с соавторами [52], – нами выявлена значительная фенотипическая изменчивость по длине, ширине и площади листа, плотности устьиц и трихом. Исследования Pita и Pardos показали, что генотипы из засушливых областей, как правило, имеют более мелкие листья, чем генотипы из областей с достаточным увлажнением. Поскольку небольшие листья испаряют меньше воды, чем крупные за счет меньшей площади испарения. Этот признак является одним из основных критериев ксероморфности растений – приспособительной реакции растений к засушливым условиям произрастания [51]. В наших исследованиях площадь листа изученных генотипов варьировала от 3,72 (у генотипа 35-16/13) до 6,54 см² (у генотипа 35-11/25). Максимальные значения удельного веса листа (LMA) – одного из показателей склерофилии листьев отмечены у генотипа 35-16/13 (255,4 г/м²). Показатели LMA в наших исследованиях были близки к данным полученным E.A. Bascalar в

засушливых условиях на сортах испанской и португальской селекции [10]. Как отмечает Centritto листья засухоустойчивых сортов, как правило, имеют более высокую LMA, что является следствием увеличения плотности или толщины листовой ткани [19].

Широкий диапазон морфологических вариаций в наших исследованиях показал большое разнообразие структурных и функциональных признаков листьев, которые связаны с эффективностью использования воды. Как отмечает Gholami с соавторами такое разнообразие может отражать существование широкого диапазона уровней пластичности внутри вида *O. europaea* по устойчивости к абиотическому стрессу, включая засуху [39].

Влияние засухи на несколько основных морфологических и анатомических особенностей листьев было исследовано рядом авторов [17; 28; 47; 55] в попытке объяснить происхождение разницы в устойчивости к засухе между устойчивыми и неустойчивыми сортами маслины. Ими отмечено снижение размера листьев, увеличение плотности трихом в засушливых условиях. Эти дифференциальные изменения в морфологии листьев могут объяснить, по крайней мере частично, разницу в засухоустойчивости между сортами. В частности, плотность устьиц и трихом могут считаться ключевыми структурными особенностями листьев, которые определяют способность дерева выдерживать водный стресс. Поэтому их можно использовать в качестве критериев для выбора сортов оливок, которые более устойчивы к засухе [28; 34; 52; 61; 64]. Подобные результаты получены Trabelsi с соавторами, которыми также отмечено снижение площади листьев, изменение в плотности устьиц и трихом в условиях засухи [61].

A. Petridis и E.A. Bacelar с соавторами акцентируют, что оливковые деревья, произрастающие в средиземноморских экосистемах, развили характеристики защиты от потери воды посредством жесткого контроля устьичной транспирации, высокой плотности листовой ткани, толстых слоев кутикулы и трихом и, в связи с этим, достаточно устойчивы к засухе [11; 50], что также согласуется с нашими данными.

При анализе морфометрических биомаркеров засухоустойчивости R. Razouk с соавторами предложено проводить корреляционный анализ и анализ главных компонент используя утечку электролита и величину потери воды как стандарты для сравнения [52]. В наших исследованиях отмечены значительные повреждения клеточной мембраны у отдельных гибридов и контрольных сортов (выход электролита при этом составил 54% (Ascolano) и 77% (Corregiolo)). Похожие результаты получены S. Partì с соавторами [49]. В их исследованиях относительный выход электролита

у сортов Giarraffa, Leccino, Maurino в различных вариантах опыта варьировал от 15 до 85%. Моделированием различных стрессовых условий, связанных с засухой и анализом данных, полученных при повреждении клеточной мембраны при дегидратации, занимались также S. Ahmadipour с соавторами в Иране [9], B. Abdallah с соавторами в Тунисе [7], N. Denaxa с соавторами в Греции [22], M. Dias с соавторами в Португалии [25] и др. Исследователи отмечали, что увеличение стресса значительно влияло на повышение выхода ионов из клеточной мембраны, наблюдаемого при повреждении клетки в период засухи. Также были выявлены значительные межсортовые различия по степени засухоустойчивости.

Заключение

1. Отмечена значительная вариация морфологических и физиологических признаков, ассоциированных с признаком засухоустойчивости, которые могут быть использованы в качестве биомаркеров для дифференциации сортов и гибридов маслины по степени устойчивости к засухе.

2. Среди физиологических показателей наиболее информативными критериями можно считать водоудерживающую способность листьев, а среди морфологических – размер устьичной щели, индекс площади трихом, площадь устьичной щели и относительная поверхность устьиц. Перечисленные признаки имеют высокую корреляционную связь с относительным выходом электролита, наблюдаемом при повреждении клеточной мембраны и указывающем на невозвратные летальные изменения в клетке.

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

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-26-00066, <https://rscf.ru/project/24-26-00066/> на базе Уникальной научной установки «ФИТО-БИОГЕН» и ЦКП «Физиолого-биохимические методы исследования растительных объектов».

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Список литературы

1. Бабоша, А. В., Рябенко, А. С., & Кумахова, Т. Х. (2023). Микроморфология поверхности эпидермы листьев некоторых видов Ruginae (Rosaceae). *Бота-*

- нический журнал, 108(1), 23–36. <https://doi.org/10.31857/S0006813623010027>. EDN: <https://elibrary.ru/LNHXBL>
2. Казас, А. Н., Литвинова, Т. В., Мязина, Л. Ф., Синько, Л. Т., Хохлов, С. Ю., Чернобай, И. Г., Шишкина, Е. Л., Шолохова, В. А., & Ядров, А. А. (2012). *Субтропические плодовые и орехоплодные культуры: научно-справочное издание*. Симферополь: ИТ «Ариал». 304 с. ISBN: 978-617-648-078-5. EDN: <https://elibrary.ru/YPXVSN>
 3. Корсакова, С. П., & Корсаков, П. Б. (2024). Климатическая характеристика сезонов 2023 года на Южном берегу Крыма. *Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян», 15*, 7–23. EDN: <https://elibrary.ru/FLOADH>
 4. Корсакова, С. П., & Корсаков, П. Б. (2024). Особенности микроклимата в Приморской полосе Южного берега Крыма. *Биология растений и садоводство: теория, инновации, 4 (173)*, 62–77. EDN: <https://elibrary.ru/JNDSEY>
 5. Цюпка, С. Ю., Плугатарь, Ю. В., Цюпка, В. А., & Булавин, И. В. (2025). Оценка засухоустойчивости сортов и гибридов маслины европейской. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 17(2)*. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1148>. EDN: <https://elibrary.ru/HAMDEP>
 6. Abdallah, B. M., Methenni, K., Nouairi, I., Zarrouk, M., & Youssef, N. B. (2017). Drought priming improves subsequent more severe drought in a drought-sensitive cultivar of olive cv. Chétoui. *Scientia Horticulturae, 221*, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.021>
 7. Abdallah, B. M., Trupiano, D., Polzella, A., de Zio, E., Sassi, M., Scaloni, A., Zarrouk, M., Youssef, N. B., & Scippa, G. S. (2018). Unraveling physiological, biochemical and molecular mechanisms involved in olive (*Olea europaea* L. cv. Chétoui) tolerance to drought and salt stresses. *Journal of Plant Physiology, 220*, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.10.009>
 8. Adiba, A., Haddioui, A., Boutagayout, A., Zayani, I., Hssaini, L., Hamdani, A., & Razouk, R. (2024). Growth and physiological responses of various pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars to induced drought stress. *Vegetos, 37(3)*, 887–899. <https://doi.org/10.1007/s42535-023-00625-1>. EDN: <https://elibrary.ru/QGJJJV>
 9. Ahmadipour, S., Arji, I., Ebadi, A., & Abdossi, V. (2018). Physiological and biochemical responses of some olive cultivars (*Olea europaea* L.) to water stress. *Cellular and Molecular Biology (Noisy-le-Grand, France), 64*, 20–29. <https://doi.org/10.14715/cmb/2017.64.15.4>
 10. Bacelar, E. A., Correia, C. M., Moutinho-Pereira, J. M., Goncalves, B. C., Lopes, J. I., & Torres-Pereira, J. M. (2004). Sclerophylly and leaf anatomical traits of five field-grown olive cultivars growing under drought conditions. *Tree Physiology, 24*, 233–239. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.2.233>. EDN: <https://elibrary.ru/XOBURJ>

11. Bacelar, E. A., Moutinho-Pereira, J. M., Gonçalves, B. C., Ferreira, H. F., & Correia, C. M. (2007). Changes in growth, gas exchange, xylem hydraulic properties and water use efficiency of three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 60, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2006.10.003>
12. Bacelar, E. A., Santos, D. L., Moutinho-Pereira, J. M., Gonçalves, B. C., Ferreira, H. F., & Correia, C. M. (2006). Immediate responses and adaptive strategies of three olive cultivars under contrasting water availability regimes: Changes on structure and chemical composition of foliage and oxidative damage. *Plant Science*, 170, 596–605. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.10.014>
13. Bartolini, S., Leccese, A., & Andreini, L. (2014). Influence of canopy fruit location on morphological, histochemical and biochemical changes in two oil olive cultivars. *Plant Biosystems*, 148, 1221–1230. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.980360>
14. Batool, T., Zafar, M., Elshikh, M. S., Mustafa, A. E. Z. M., Ahmad, M., Makhkamov, T., & Musthafa, M. M. (2025). Foliar epidermal micromorphology: a contribution to the taxonomy of family Oleaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72(2), 1853–1880. <https://doi.org/10.1007/s10722-024-02060-w>. EDN: <https://elibrary.ru/JFKOFO>
15. Bennani, S., Nsarellah, N., Birouk, A., Ouabbou, H., & Tadesse, W. (2016). Effective selection criteria for screening drought tolerant and high yielding bread wheat genotypes. *Universal Journal of Agricultural Research*, 4, 134–142. <https://doi.org/10.13189/ujar.2016.040404>
16. Boughalleb, F., & Hajlaoui, H. (2011). Physiological and anatomical changes induced by drought in two olive cultivars (cv. Zalmati and Chemlali). *Acta Physiologiae Plantarum*, 33, 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0516-8>. EDN: <https://elibrary.ru/YBPQIF>
17. Brito, C., Dinis, L. T., Moutinho-Pereira, J., & Correia, C. M. (2019). Drought stress effects and olive tree acclimation under a changing climate. *Plants*, 8(7), 232. <https://doi.org/10.3390/plants8070232>. EDN: <https://elibrary.ru/MCAEOT>
18. Brito, C., Dinis, L.-T., Meijón, M., Ferreira, H., Pinto, G., Moutinho-Pereira, J., & Correia, C. (2018). Salicylic acid modulates olive tree physiological and growth responses to drought and rewatering events in a dose dependent manner. *Journal of Plant Physiology*, 230, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.08.004>. EDN: <https://elibrary.ru/YKHJVZ>
19. Centritto, M. (2002). The effects of elevated [CO₂] and water availability on growth and physiology of peach (*Prunus persica*) plants. *Plant Biosystems — An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 136, 177–188. <https://doi.org/10.1080/11263500212331351079>

20. Cortignani, R., Dell'Unto, D., & Dono, G. (2021). Paths of adaptation to climate change in major Italian agricultural areas: Effectiveness and limits in supporting the profitability of farms. *Agricultural Water Management*, 244, 106433. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106433>. EDN: <https://elibrary.ru/TUIQFJ>
21. Cosmulescu, S., Scricciu, F., & Manda, M. (2020). Determination of leaf characteristics in different medlar genotypes using the ImageJ program. *Horticultural Science*, 47(2), 117. <https://doi.org/10.17221/97/2019-HORTSCI>. EDN: <https://elibrary.ru/SVETFY>
22. Denaxa, N. K., Damvakaris, T., & Roussos, P. A. (2020). Antioxidant defense system in young olive plants against drought stress and mitigation of adverse effects through external application of alleviating products. *Scientia Horticulturae*, 259, 108812. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108812>. EDN: <https://elibrary.ru/KXMZVC>
23. Dencic, S., Kastori, R., Kobiljski, B., & Duggan, B. (2000). Evaluation of grain yield and its components in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. *Euphytica*, 113, 43–52. <https://doi.org/10.1023/A:1003997700865>. EDN: <https://elibrary.ru/AGMLIH>
24. Deslauriers, A., Caron, L., & Rossi, S. (2015). Carbon allocation during defoliation: testing a defense-growth trade-off in balsam fir. *Frontiers in Plant Science*, 6, 338. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00338>
25. Dias, M. C., Correia, S., Serôdio, J., Silva, A. M. S., Freitas, H., & Santos, C. (2018). Chlorophyll fluorescence and oxidative stress endpoints to discriminate olive cultivars tolerance to drought and heat episodes. *Scientia Horticulturae*, 231, 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.007>. EDN: <https://elibrary.ru/YEXJID>
26. Diaz-Rueda, P., Franco-Navarro, J. D., Messoria, R., Espartero, J., Rivero-Núñez, C. M., Aleza, P., Capote, N., Cantos, M., García-Fernández, J. L., & De Cires, A. (2020). SILVOLIVE, a germplasm collection of wild subspecies with high genetic variability as a source of rootstocks and resistance genes for olive breeding. *Frontiers in Plant Science*, 11, 629. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00629>. EDN: <https://elibrary.ru/ZFOORU>
27. Dichio, B., Montanaro, G., Sofo, A., & Xiloyannis, C. (2013). Stem and whole-plant hydraulics in olive (*Olea europaea*) and kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Trees*, 27, 183–191. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0787-3>. EDN: <https://elibrary.ru/NBHTIQ>
28. Ennajeh, M., Vadel, A. M., Cochard, H., & Khemira, H. (2010). Comparative impacts of water stress on the leaf anatomy of a drought-resistant and a drought-sensitive olive cultivar. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85(4), 289–294. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512670>. EDN: <https://elibrary.ru/NZJFTD>

-
29. FAO. (2025). *FAOSTAT*. Retrieved March 1, 2025, from <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
 30. Faraloni, C., Cutino, I., Petruccelli, R., Leva, A. R., Lazzeri, S., & Torzillo, G. (2011). Chlorophyll fluorescence technique as a rapid tool for in vitro screening of olive cultivars (*Olea europaea* L.) tolerant to drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 73, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.10.011>. EDN: <https://elibrary.ru/PMZBFB>
 31. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2012). Drought stress in plants: an overview. In R. Aroca (Ed.), *Plant responses to drought stress — from morphological to molecular features* (pp. 1–33). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
 32. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185–212. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12. EDN: <https://elibrary.ru/MMKSSJ>
 33. Fernandez, J. E. (2014). Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 158–179. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.12.003>
 34. Fernández, V., Almonte, L., Bahamonde, H. A., Galindo-Bernabeu, A., Sáenz-Arce, G., & Colchero, J. (2024). Chemical and structural heterogeneity of olive leaves and their trichomes. *Communications Biology*, 7(1), 352. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06053-4>. EDN: <https://elibrary.ru/TUDOHR>
 35. Fouial, A., Khadra, R., Daccache, A., & Lamaddalena, N. (2016). Modelling the impact of climate change on pressurised irrigation distribution systems: Use of a new tool for adaptation strategy implementation. *Biosystems Engineering*, 150, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.010>
 36. Fraga, H., Marco, M., Leolini, L., & Santos, J. A. (2020a). Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies. *Agronomy*, 11(1), 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>. EDN: <https://elibrary.ru/IPNHTF>
 37. Fraga, H., Pinto, J. G., & Santos, J. A. (2020b). Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo, Portugal. *Agricultural Water Management*, 237, 106193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106193>. EDN: <https://elibrary.ru/URQLZU>
 38. Gara, T. W., Rahimzadeh-Bajgiran, P., & Darvishzadeh, R. (2021). Forest leaf mass per area (LMA) through the eye of optical remote sensing: A review and future outlook. *Remote Sensing*, 13(17), 3352. <https://doi.org/10.3390/rs13173352>. EDN: <https://elibrary.ru/VJFPHU>

39. Gholami, R., & Zahedi, S. M. (2019). Identifying superior drought-tolerant olive genotypes and their biochemical and some physiological responses to various irrigation levels. *Journal of Plant Nutrition*, 42, 2057–2069. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1648672>
40. Guerfel, M., Baccouri, O., Boujnah, D., Chaïbi, W., & Zarrouk, M. (2009a). Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 119(3), 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.006>. EDN: <https://elibrary.ru/YARJEZ>
41. Guerfel, M., Ouni, Y., Boujnah, D., & Zarrouk, M. (2009b). Photosynthesis parameters and activities of enzymes of oxidative stress in two young ‘Chemlali’ and ‘Chetoui’ olive trees under water deficit. *Photosynthetica*, 47, 340. <https://doi.org/10.1007/s11099-009-0054-z>
42. IOC. (2025). *International Olive Council*. Retrieved February 24, 2025, from <https://www.internationaloliveoil.org/>
43. Islam, M. S., Hasan, K., Islam, R., Chowdhury, K., Pramanik, M. H., Iqbal, M. A., Rajendran, K., Iqbal, R., Soufan, W., & Kamran, M. (2023). Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA_3). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1048768. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1048768>. EDN: <https://elibrary.ru/QAVFIS>
44. Jatoi, W. A., Baloch, M. J., Kumbhar, M. B., Khan, N. U., & Kerio, M. I. (2011). Effect of water stress on physiological and yield parameters at anthesis stage in elite spring wheat cultivars. *Sarhad Journal of Agriculture*, 27(1), 59–65.
45. Korzin, V., Tsiupka, S., Plugatar, Y., Tsiupka, V., Shoferistov, E., & Korzh, D. (2022). Photosynthetic activity of olive leaves before and after treatment with an experimental mixture of pesticides. *Acta Horticulturae*, 1339, 377–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1339.47>. EDN: <https://elibrary.ru/ZSFWST>
46. Liu, H., Na, H. E., Li, Y. J., Ning, D. L., Ting, M. A., & Xiao, L. J. (2013). Evaluation on drought stress tolerance of six olive varieties cultivated in Yunnan. *Journal of West China Forestry Science*, 42, 107–110. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133324000>
47. Majikumna, K. U., Zineddine, M., & El Hilali Alaoui, A. (2024). Olive tree drought stress: A systematic review. *Journal of Water and Climate Change*, 15(12), 5741–5762. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.158>. EDN: <https://elibrary.ru/IWPYIT>
48. Pantin, F., Monnet, F., Jannaud, D., Costa, J. M., Renaud, J., Muller, B., Simonneau, T., & Genty, B. (2013). The dual effect of abscisic acid on stomata. *New Phytologist*, 197, 65–72. <https://doi.org/10.1111/nph.12013>
49. Parri, S., Romi, M., Hoshika, Y., Giovannelli, A., Dias, M. C., Piritore, F. C., Cai, G., & Cantini, C. (2023). Morpho-physiological responses of three Italian olive tree

- (*Olea europaea* L.) cultivars to drought stress. *Horticulturae*, 9, 830. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070830>. EDN: <https://elibrary.ru/WBWOTR>
50. Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., Koundouras, S., & Giannakoula, A. (2012). Effect of water deficit on leaf phenolic composition, gas exchange, oxidative damage and antioxidant activity of four Greek olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 60, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.07.014>
 51. Pita, P., & Pardos, J. A. (2001). Growth, leaf morphology, water use and tissue relations of *Eucalyptus globulus* clones in response to water deficit. *Tree Physiology*, 21, 599–607. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.9.599>
 52. Razouk, R., Hssaini, L., Alghoum, M., Adiba, A., & Hamdani, A. (2022). Phenotyping olive cultivars for drought tolerance using leaf macro-characteristics. *Horticulturae*, 8, 939. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100939>. EDN: <https://elibrary.ru/ZECORS>
 53. Rezaei, M., & Rohani, A. (2023). Estimating freezing injury on olive trees: A comparative study of computing models based on electrolyte leakage and tetrazolium tests. *Agriculture*, 13, 1137. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061137>. EDN: <https://elibrary.ru/YNEACX>
 54. Rhizopoulou, S., Meletiyou-Christou, M. S., & Diamantoglou, S. (1991). Water relations for sun and shade leaves of four Mediterranean evergreen sclerophylls. *Journal of Experimental Botany*, 42(5), 627–635. <https://doi.org/10.1093/jxb/42.5.627>. EDN: <https://elibrary.ru/IRIROZ>
 55. Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: Causes, consequences, and tolerance. In M. Hossain, S. Wani, S. Bhattacharjee, D. Burritt, & L. S. Tran (Eds.), *Drought stress tolerance in plants* (Vol. 1). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_1. EDN: <https://elibrary.ru/YXWFMX>
 56. Slobodova, N., Sharko, F., Gladysheva-Azgari, M., Petrova, K., Tsiupka, S., Tsiupka, V., Boulygina, E., Rastorguev, S., & Tsygankova, S. (2023). Genetic diversity of common olive (*Olea europaea* L.) cultivars from Nikita Botanical Gardens collection revealed using RAD-Seq method. *Genes*, 14, 1323. <https://doi.org/10.3390/genes14071323>. EDN: <https://elibrary.ru/QEJYSJ>
 57. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
 58. Tanentzap, F. M., Stempel, A., & Ryser, P. (2015). Reliability of leaf relative water content (RWC) measurements after storage: Consequences for in situ measurements. *Botany*, 93(9), 535–541. <https://doi.org/10.1139/CJB-2015-0065>
 59. Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Morales-Sillero, A., Martín-Palomo, M. J., Mayr, S., Beikircher, B., & Fernández, J. E. (2013). Shoot hydraulic characteris-

- tics, plant water status and stomatal response in olive trees under different soil water conditions. *Plant and Soil*, 373, 77–87. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1774-1>. EDN: <https://elibrary.ru/VAVNXG>
60. Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Perez-Martin, A., & Hernandez-Santana, V. (2015). Role of hydraulic and chemical signals in leaves, stems and roots in the stomatal behaviour of olive trees under water stress and recovery conditions. *Tree Physiology*, 35, 415–424. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu055>
61. Trabelsi, L., Mbarek, H. B., Ncube, B., Hassena, A. B., Zouari, M., Soua, N., & Gargouri, K. (2024). Impact of arid climate on ecophysiological characteristics and water utilization patterns of two olive cultivars (*Olea europaea* L.) in the Mediterranean dryland: A case study of ‘Chemlali Sfax’ and ‘Koroneiki’. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 9(3), 1227–1242. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00573-5>. EDN: <https://elibrary.ru/AVVWLK>
62. Tsiupka, S. (2018). A historical review of olive germplasm evaluation and cultivar development in Crimea. *Acta Horticulturae*, 1208, 97–104. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1208.13>. EDN: <https://elibrary.ru/VALEBR>
63. Tsiupka, V., Tsiupka, S., Plugatar, Y., Bulavin, I., & Komar-Tyomnaya, L. (2023). Assessment of the drought-tolerance criteria for screening peach cultivars. *Horticulturae*, 9, 1045. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9091045>. EDN: <https://elibrary.ru/IMTMBP>
64. Tunç, Y., Yılmaz, K. U., & Yaman, M. (2023). Determination of stoma and leaf characteristics with chlorophyll and carotenoid amounts of some domestic and foreign olive (*Olea europaea* L.) varieties. *Erwerbs-Obstbau*, 65, 1769–1778. <https://doi.org/10.1007/s10341-023-00906-8>. EDN: <https://elibrary.ru/KABGZK>
65. Vafadar, M., Rezaei, M., & Khadivi, A. (2024). Frost hardness of 10 olive cultivars after natural and controlled freezing. *Scientia Horticulturae*, 325, 112687. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112687>. EDN: <https://elibrary.ru/GJZZTE>
66. Zajicova, I., Tihlarikova, E., Cifrova, P., Kyjakova, P., Nedela, V., Sechet, J., Havelkova, L., Kloutvorova, J., & Schwarzerova, K. (2019). Analysis of apple epidermis in respect to ontogenic resistance against *Venturia inaequalis*. *Plant Biology*, 63, 662–670. <https://doi.org/10.32615/bp.2019.134>
67. Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, 242, 126626. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>. EDN: <https://elibrary.ru/LOFYKR>

References

1. Babosha, A. V., Ryabchenko, A. S., & Kumakhova, T. Kh. (2023). Micromorphology of the epidermal surface of leaves of some *Pyrinae* (Rosaceae) species. *Botanich-*

- eskiy zhurnal*, 108(1), 23–36. <https://doi.org/10.31857/S0006813623010027>. EDN: <https://elibrary.ru/LNHXBL>
2. Kazas, A. N., Litvinova, T. V., Myazina, L. F., Sinko, L. T., Khokhlov, S. Yu., Chernobay, I. G., Shishkina, E. L., Sholokhova, V. A., & Yadrov, A. A. (2012). *Subtropical fruit and nut crops: A scientific reference publication*. Simferopol: IT “Arial”. 304 p. ISBN: 978-617-648-078-5. EDN: <https://elibrary.ru/YPXVSN>
 3. Korsakova, S. P., & Korsakov, P. B. (2024). Climatic characteristics of the 2023 seasons on the Southern Coast of Crimea. *Nauchnye zapiski prirodnogo zapovednika “Mys Mart’yan”*, 15, 7–23. EDN: <https://elibrary.ru/FLOADH>
 4. Korsakova, S. P., & Korsakov, P. B. (2024). Features of the microclimate in the coastal zone of the Southern Coast of Crimea. *Biologiya rasteniy i sadovodstvo: teoriya, innovatsii*, 4(173), 62–77. EDN: <https://elibrary.ru/JNDSEY>
 5. Tsyupka, S. Yu., Plugatar, Yu. V., Tsyupka, V. A., & Bulavin, I. V. (2025). Assessment of drought resistance of European olive cultivars and hybrids. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(2). <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1148>. EDN: <https://elibrary.ru/HAMDEP>
 6. Abdallah, B. M., Methenni, K., Nouairi, I., Zarrouk, M., & Youssef, N. B. (2017). Drought priming improves subsequent more severe drought in a drought-sensitive cultivar of olive cv. Chétoui. *Scientia Horticulturae*, 221, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.021>
 7. Abdallah, B. M., Trupiano, D., Polzella, A., de Zio, E., Sassi, M., Scaloni, A., Zarrouk, M., Youssef, N. B., & Scippa, G. S. (2018). Unraveling physiological, biochemical and molecular mechanisms involved in olive (*Olea europaea* L. cv. Chétoui) tolerance to drought and salt stresses. *Journal of Plant Physiology*, 220, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.10.009>
 8. Adiba, A., Haddioui, A., Boutagayout, A., Zayani, I., Hssaini, L., Hamdani, A., & Razouk, R. (2024). Growth and physiological responses of various pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars to induced drought stress. *Vegetos*, 37(3), 887–899. <https://doi.org/10.1007/s42535-023-00625-1>. EDN: <https://elibrary.ru/QGJJJV>
 9. Ahmadipour, S., Arji, I., Ebadi, A., & Abdossi, V. (2018). Physiological and biochemical responses of some olive cultivars (*Olea europaea* L.) to water stress. *Cellular and Molecular Biology (Noisy-le-Grand, France)*, 64, 20–29. <https://doi.org/10.14715/cmb/2017.64.15.4>
 10. Bacelar, E. A., Correia, C. M., Moutinho-Pereira, J. M., Goncalves, B. C., Lopes, J. I., & Torres-Pereira, J. M. (2004). Sclerophylly and leaf anatomical traits of five field-grown olive cultivars growing under drought conditions. *Tree Physiology*, 24, 233–239. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.2.233>. EDN: <https://elibrary.ru/XOBURJ>

11. Bacelar, E. A., Moutinho-Pereira, J. M., Gonçalves, B. C., Ferreira, H. F., & Correia, C. M. (2007). Changes in growth, gas exchange, xylem hydraulic properties and water use efficiency of three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 60, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2006.10.003>
12. Bacelar, E. A., Santos, D. L., Moutinho-Pereira, J. M., Gonçalves, B. C., Ferreira, H. F., & Correia, C. M. (2006). Immediate responses and adaptive strategies of three olive cultivars under contrasting water availability regimes: Changes on structure and chemical composition of foliage and oxidative damage. *Plant Science*, 170, 596–605. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.10.014>
13. Bartolini, S., Leccese, A., & Andreini, L. (2014). Influence of canopy fruit location on morphological, histochemical and biochemical changes in two oil olive cultivars. *Plant Biosystems*, 148, 1221–1230. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.980360>
14. Batool, T., Zafar, M., Elshikh, M. S., Mustafa, A. E. Z. M., Ahmad, M., Makhkamov, T., & Musthafa, M. M. (2025). Foliar epidermal micromorphology: a contribution to the taxonomy of family Oleaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72(2), 1853–1880. <https://doi.org/10.1007/s10722-024-02060-w>. EDN: <https://elibrary.ru/JFKOFO>
15. Bennani, S., Nsarellah, N., Birouk, A., Ouabbou, H., & Tadesse, W. (2016). Effective selection criteria for screening drought tolerant and high yielding bread wheat genotypes. *Universal Journal of Agricultural Research*, 4, 134–142. <https://doi.org/10.13189/ujar.2016.040404>
16. Boughalleb, F., & Hajlaoui, H. (2011). Physiological and anatomical changes induced by drought in two olive cultivars (cv. Zalmati and Chemlali). *Acta Physiologiae Plantarum*, 33, 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0516-8>. EDN: <https://elibrary.ru/YBPQIF>
17. Brito, C., Dinis, L. T., Moutinho-Pereira, J., & Correia, C. M. (2019). Drought stress effects and olive tree acclimation under a changing climate. *Plants*, 8(7), 232. <https://doi.org/10.3390/plants8070232>. EDN: <https://elibrary.ru/MCAEOT>
18. Brito, C., Dinis, L.-T., Meijón, M., Ferreira, H., Pinto, G., Moutinho-Pereira, J., & Correia, C. (2018). Salicylic acid modulates olive tree physiological and growth responses to drought and rewatering events in a dose dependent manner. *Journal of Plant Physiology*, 230, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.08.004>. EDN: <https://elibrary.ru/YKHJVZ>
19. Centritto, M. (2002). The effects of elevated [CO₂] and water availability on growth and physiology of peach (*Prunus persica*) plants. *Plant Biosystems — An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 136, 177–188. <https://doi.org/10.1080/11263500212331351079>

20. Cortignani, R., Dell'Unto, D., & Dono, G. (2021). Paths of adaptation to climate change in major Italian agricultural areas: Effectiveness and limits in supporting the profitability of farms. *Agricultural Water Management*, 244, 106433. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106433>. EDN: <https://elibrary.ru/TUIQFJ>
21. Cosmulescu, S., Scricciu, F., & Manda, M. (2020). Determination of leaf characteristics in different medlar genotypes using the ImageJ program. *Horticultural Science*, 47(2), 117. <https://doi.org/10.17221/97/2019-HORTSCI>. EDN: <https://elibrary.ru/SVETFY>
22. Denaxa, N. K., Damvakaris, T., & Roussos, P. A. (2020). Antioxidant defense system in young olive plants against drought stress and mitigation of adverse effects through external application of alleviating products. *Scientia Horticulturae*, 259, 108812. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108812>. EDN: <https://elibrary.ru/KXMZVC>
23. Dencic, S., Kastori, R., Kobiljski, B., & Duggan, B. (2000). Evaluation of grain yield and its components in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. *Euphytica*, 113, 43–52. <https://doi.org/10.1023/A:1003997700865>. EDN: <https://elibrary.ru/AGMLIH>
24. Deslauriers, A., Caron, L., & Rossi, S. (2015). Carbon allocation during defoliation: testing a defense-growth trade-off in balsam fir. *Frontiers in Plant Science*, 6, 338. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00338>
25. Dias, M. C., Correia, S., Serôdio, J., Silva, A. M. S., Freitas, H., & Santos, C. (2018). Chlorophyll fluorescence and oxidative stress endpoints to discriminate olive cultivars tolerance to drought and heat episodes. *Scientia Horticulturae*, 231, 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.007>. EDN: <https://elibrary.ru/YEXJID>
26. Diaz-Rueda, P., Franco-Navarro, J. D., Messoria, R., Espartero, J., Rivero-Núñez, C. M., Aleza, P., Capote, N., Cantos, M., García-Fernández, J. L., & De Cires, A. (2020). SILVOLIVE, a germplasm collection of wild subspecies with high genetic variability as a source of rootstocks and resistance genes for olive breeding. *Frontiers in Plant Science*, 11, 629. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00629>. EDN: <https://elibrary.ru/ZFOORU>
27. Dichio, B., Montanaro, G., Sofo, A., & Xiloyannis, C. (2013). Stem and whole-plant hydraulics in olive (*Olea europaea*) and kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Trees*, 27, 183–191. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0787-3>. EDN: <https://elibrary.ru/NBHTIQ>
28. Ennajeh, M., Vadel, A. M., Cochard, H., & Khemira, H. (2010). Comparative impacts of water stress on the leaf anatomy of a drought-resistant and a drought-sensitive olive cultivar. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85(4), 289–294. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512670>. EDN: <https://elibrary.ru/NZJFTD>

-
29. FAO. (2025). *FAOSTAT*. Retrieved March 1, 2025, from <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
 30. Faraloni, C., Cutino, I., Petrucci, R., Leva, A. R., Lazzeri, S., & Torzillo, G. (2011). Chlorophyll fluorescence technique as a rapid tool for in vitro screening of olive cultivars (*Olea europaea* L.) tolerant to drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 73, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.10.011>. EDN: <https://elibrary.ru/PMZBFB>
 31. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2012). Drought stress in plants: an overview. In R. Aroca (Ed.), *Plant responses to drought stress — from morphological to molecular features* (pp. 1–33). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
 32. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185–212. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12. EDN: <https://elibrary.ru/MMKSSJ>
 33. Fernandez, J. E. (2014). Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 158–179. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.12.003>
 34. Fernández, V., Almonte, L., Bahamonde, H. A., Galindo-Bernabeu, A., Sáenz-Arce, G., & Colchero, J. (2024). Chemical and structural heterogeneity of olive leaves and their trichomes. *Communications Biology*, 7(1), 352. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06053-4>. EDN: <https://elibrary.ru/TUDOHR>
 35. Fouial, A., Khadra, R., Daccache, A., & Lamaddalena, N. (2016). Modelling the impact of climate change on pressurised irrigation distribution systems: Use of a new tool for adaptation strategy implementation. *Biosystems Engineering*, 150, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.010>
 36. Fraga, H., Marco, M., Leolini, L., & Santos, J. A. (2020a). Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies. *Agronomy*, 11(1), 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>. EDN: <https://elibrary.ru/IPNHTF>
 37. Fraga, H., Pinto, J. G., & Santos, J. A. (2020b). Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo, Portugal. *Agricultural Water Management*, 237, 106193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106193>. EDN: <https://elibrary.ru/URQLZU>
 38. Gara, T. W., Rahimzadeh-Bajgiran, P., & Darvishzadeh, R. (2021). Forest leaf mass per area (LMA) through the eye of optical remote sensing: A review and future outlook. *Remote Sensing*, 13(17), 3352. <https://doi.org/10.3390/rs13173352>. EDN: <https://elibrary.ru/VJFPHU>

39. Gholami, R., & Zahedi, S. M. (2019). Identifying superior drought-tolerant olive genotypes and their biochemical and some physiological responses to various irrigation levels. *Journal of Plant Nutrition*, 42, 2057–2069. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1648672>
40. Guerfel, M., Baccouri, O., Boujnah, D., Chaïbi, W., & Zarrouk, M. (2009a). Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 119(3), 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.006>. EDN: <https://elibrary.ru/YARJEZ>
41. Guerfel, M., Ouni, Y., Boujnah, D., & Zarrouk, M. (2009b). Photosynthesis parameters and activities of enzymes of oxidative stress in two young ‘Chemlali’ and ‘Chetoui’ olive trees under water deficit. *Photosynthetica*, 47, 340. <https://doi.org/10.1007/s11099-009-0054-z>
42. IOC. (2025). *International Olive Council*. Retrieved February 24, 2025, from <https://www.internationaloliveoil.org/>
43. Islam, M. S., Hasan, K., Islam, R., Chowdhury, K., Pramanik, M. H., Iqbal, M. A., Rajendran, K., Iqbal, R., Soufan, W., & Kamran, M. (2023). Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA_3). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1048768. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1048768>. EDN: <https://elibrary.ru/QAVFIS>
44. Jatoi, W. A., Baloch, M. J., Kumbhar, M. B., Khan, N. U., & Kerio, M. I. (2011). Effect of water stress on physiological and yield parameters at anthesis stage in elite spring wheat cultivars. *Sarhad Journal of Agriculture*, 27(1), 59–65.
45. Korzin, V., Tsiupka, S., Plugatar, Y., Tsiupka, V., Shoferistov, E., & Korzh, D. (2022). Photosynthetic activity of olive leaves before and after treatment with an experimental mixture of pesticides. *Acta Horticulturae*, 1339, 377–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1339.47>. EDN: <https://elibrary.ru/ZSFWST>
46. Liu, H., Na, H. E., Li, Y. J., Ning, D. L., Ting, M. A., & Xiao, L. J. (2013). Evaluation on drought stress tolerance of six olive varieties cultivated in Yunnan. *Journal of West China Forestry Science*, 42, 107–110. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133324000>
47. Majikumna, K. U., Zineddine, M., & El Hilali Alaoui, A. (2024). Olive tree drought stress: A systematic review. *Journal of Water and Climate Change*, 15(12), 5741–5762. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.158>. EDN: <https://elibrary.ru/IWPTYIT>
48. Pantin, F., Monnet, F., Jannaud, D., Costa, J. M., Renaud, J., Muller, B., Simonneau, T., & Genty, B. (2013). The dual effect of abscisic acid on stomata. *New Phytologist*, 197, 65–72. <https://doi.org/10.1111/nph.12013>
49. Parri, S., Romi, M., Hoshika, Y., Giovannelli, A., Dias, M. C., Piritore, F. C., Cai, G., & Cantini, C. (2023). Morpho-physiological responses of three Italian olive tree (*Olea europaea* L.) cultivars to drought stress. *Horticulturae*, 9, 830. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070830>. EDN: <https://elibrary.ru/WBWOTR>

50. Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., Koundouras, S., & Giannakoula, A. (2012). Effect of water deficit on leaf phenolic composition, gas exchange, oxidative damage and antioxidant activity of four Greek olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 60, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.07.014>
51. Pita, P., & Pardos, J. A. (2001). Growth, leaf morphology, water use and tissue relations of *Eucalyptus globulus* clones in response to water deficit. *Tree Physiology*, 21, 599–607. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.9.599>
52. Razouk, R., Hssaini, L., Alghoum, M., Adiba, A., & Hamdani, A. (2022). Phenotyping olive cultivars for drought tolerance using leaf macro-characteristics. *Horticulturae*, 8, 939. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100939>. EDN: <https://elibrary.ru/ZECORS>
53. Rezaei, M., & Rohani, A. (2023). Estimating freezing injury on olive trees: A comparative study of computing models based on electrolyte leakage and tetrazolium tests. *Agriculture*, 13, 1137. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061137>. EDN: <https://elibrary.ru/YNEACX>
54. Rhizopoulou, S., Meletiyou-Christou, M. S., & Diamantoglou, S. (1991). Water relations for sun and shade leaves of four Mediterranean evergreen sclerophylls. *Journal of Experimental Botany*, 42(5), 627–635. <https://doi.org/10.1093/jxb/42.5.627>. EDN: <https://elibrary.ru/IRIROZ>
55. Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: Causes, consequences, and tolerance. In M. Hossain, S. Wani, S. Bhattacharjee, D. Burritt, & L. S. Tran (Eds.), *Drought stress tolerance in plants* (Vol. 1). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_1. EDN: <https://elibrary.ru/YXWFMX>
56. Slobodova, N., Sharko, F., Gladysheva-Azgari, M., Petrova, K., Tsiupka, S., Tsiupka, V., Boulygina, E., Rastorguev, S., & Tsygankova, S. (2023). Genetic diversity of common olive (*Olea europaea* L.) cultivars from Nikita Botanical Gardens collection revealed using RAD-Seq method. *Genes*, 14, 1323. <https://doi.org/10.3390/genes14071323>. EDN: <https://elibrary.ru/QEJYSJ>
57. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
58. Tanentzap, F. M., Stempel, A., & Ryser, P. (2015). Reliability of leaf relative water content (RWC) measurements after storage: Consequences for in situ measurements. *Botany*, 93(9), 535–541. <https://doi.org/10.1139/CJB-2015-0065>
59. Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Morales-Sillero, A., Martín-Palomo, M. J., Mayr, S., Beikircher, B., & Fernández, J. E. (2013). Shoot hydraulic characteristics, plant water status and stomatal response in olive trees under different soil water conditions. *Plant and Soil*, 373, 77–87. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1774-1>. EDN: <https://elibrary.ru/VAVNXG>

60. Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Perez-Martin, A., & Hernandez-Santana, V. (2015). Role of hydraulic and chemical signals in leaves, stems and roots in the stomatal behaviour of olive trees under water stress and recovery conditions. *Tree Physiology*, 35, 415–424. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu055>
61. Trabelsi, L., Mbarek, H. B., Ncube, B., Hassena, A. B., Zouari, M., Soua, N., & Gargouri, K. (2024). Impact of arid climate on ecophysiological characteristics and water utilization patterns of two olive cultivars (*Olea europaea* L.) in the Mediterranean dryland: A case study of ‘Chemlali Sfax’ and ‘Koroneiki’. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 9(3), 1227–1242. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00573-5>. EDN: <https://elibrary.ru/AVVWLK>
62. Tsiupka, S. (2018). A historical review of olive germplasm evaluation and cultivar development in Crimea. *Acta Horticulturae*, 1208, 97–104. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1208.13>. EDN: <https://elibrary.ru/VALEBR>
63. Tsiupka, V., Tsiupka, S., Plugatar, Y., Bulavin, I., & Komar-Tyomnaya, L. (2023). Assessment of the drought-tolerance criteria for screening peach cultivars. *Horticulturae*, 9, 1045. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9091045>. EDN: <https://elibrary.ru/IMTMBP>
64. Tunç, Y., Yılmaz, K. U., & Yaman, M. (2023). Determination of stoma and leaf characteristics with chlorophyll and carotenoid amounts of some domestic and foreign olive (*Olea europaea* L.) varieties. *Erwerbs-Obstbau*, 65, 1769–1778. <https://doi.org/10.1007/s10341-023-00906-8>. EDN: <https://elibrary.ru/KABGZK>
65. Vafadar, M., Rezaei, M., & Khadivi, A. (2024). Frost hardness of 10 olive cultivars after natural and controlled freezing. *Scientia Horticulturae*, 325, 112687. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112687>. EDN: <https://elibrary.ru/GJZZTE>
66. Zajicova, I., Tihlarikova, E., Cifrova, P., Kyjakova, P., Nedela, V., Sechet, J., Havelkova, L., Kloutvorova, J., & Schwarzerova, K. (2019). Analysis of apple epidermis in respect to ontogenic resistance against *Venturia inaequalis*. *Plant Biology*, 63, 662–670. <https://doi.org/10.32615/bp.2019.134>
67. Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, 242, 126626. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>. EDN: <https://elibrary.ru/LOFYKR>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Цюпка Сергей Юрьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела плодовых культур

ФГБУН «Никитский ботанический сад-Национальный научный центр»

ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация

tsupkanbg@mail.ru

Булавин Илья Владимирович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией клеточной биологии и анатомии, старший научный сотрудник

ФГБУН «Никитский ботанический сад-Национальный научный центр»

ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация

cellbiolnbs@yandex.ru

Синченко Анастасия Вячеславовна, младший научный сотрудник лаборатории Курчатовский геномный центр – НБС-ННЦ

ФГБУН «Никитский ботанический сад-Национальный научный центр»

ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация

nas.sin4enko@gmail.com

Цюпка Валентина Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Курчатовский геномный центр – НБС-ННЦ

ФГБУН «Никитский ботанический сад-Национальный научный центр»

ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация

valentina.brailko@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Sergei Y. Tsiupka, PhD, Senior Researcher

Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center

52, Nikitsky Descent, Yalta, 298648, Russian Federation

tsupkanbg@mail.ru

SPIN-code: 6975-4327

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1678-014X>

ResearcherID: HJZ-0652-2023

Scopus Author ID: 55799874500

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Sergei-Tsiupka>

Iliya V. Bulavin, PhD, Head of the Laboratory of Plant Cell Biology and Anatomy, Senior Researcher

Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center

52, Nikitsky Descent, Yalta, 298648, Russian Federation

cellbiolnbs@yandex.ru

SPIN-code: 2834-9125

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9929-0946>

ResearcherID: ABA-2273-2020

Scopus Author ID: 56811269600

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Iliya-Bulavin?ev=hdr_xprf

Anastasia V. Sinchenko, Junior Researcher, Laboratory of Plant Genomics and Bioinformatics

Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center

52, Nikitsky Descent, Yalta, 298648, Russian Federation

nas.sin4enko@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4079-2418>

Valentina A. Tsiupka, PhD, Leading Researcher of the Laboratory of the Kurchatov Genome Center – NBG-NSC

Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center

52, Nikitsky Descent, Yalta, 298648, Russian Federation

valentina.brailko@yandex.ru

SPIN-code: 2173-9806

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3853-0210>

ResearcherID: AAS-6393-2020

Scopus Author ID: 57190663916

Поступила 08.08.2025

После рецензирования 23.09.2025

Принята 07.10.2025

Received 08.08.2025

Revised 23.09.2025

Accepted 07.10.2025

Экология, почвоведение и природопользование / Ecology, Soil Science and Nature Management

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369)EDN: [GYRNUV](https://www.edn.ru/gyrnuv/)

УДК 631.879.42:631.812.12



Оценка углеродного следа компоста из куриного помёта, получаемого с использованием технологии компостирования в буртах

А.Р. Камалова¹, Л.Г. Ахметзянова¹, И.Н. Курицин¹, С.Г. Манишкин²,
П.А. Курынцева¹, С.Ю. Селивановская¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»,
Йошкар-Ола, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Компостирование куриного помёта как метод снижения углеродного следа животноводства остаётся недостаточно изученным, особенно в аспекте баланса между эмиссией парниковых газов и долгосрочной стабилизацией углерода в почве. В работе были учтены не только прямые выбросы, но и косвенные, связанные с эксплуатацией автотранспорта и энергозатратными операциями. Полученные данные позволяют оптимизировать процесс с учётом экологической эффективности и соответствия климатическим целям.

Цель. Рассчитать углеродный след компоста, получаемого на модельном предприятии, расположенном в средней полосе России, и использующем технологию компостирования куриного помёта в открытых буртах.

Материалы и методы. В исследовании использовали куриный помёт напольного содержания, полученный с птицефабрики «Атяшево» (Республика Марий Эл). Компостирование осуществляли в двух буртах (24×3×1,1 м, по 28 т сырья) в течение 37 суток, при котором осуществлялся постоянный мониторинг температурного режима и влажности. Прямые выбросы (CO₂, CH₄) определяли газовым хроматографом «ПИА» методом закрытой камеры, косвенные выбросы рассчитывали по данным энергопотребления и топливных затрат согласно GHG-протоколу. Все измерения выполнены в трёхкратной повторности.

Результаты исследований. Было выявлено, что наибольшая интенсивность выделения CO₂ (до 27,17 г C/м²*ч) наблюдалась в начальной фазе из-за активно-

го разложения легкодоступной органики, а к концу процесса эмиссия снизилась до 119,78 г С/м²*ч. Суммарные прямые выбросы за период компостирования составили 1,91 т CO₂. Расчеты согласно Минприроды России №371 показали, что эмиссия CH₄ составила $5,6 \times 10^{-7}$ т, эмиссия N₂O – $3,4 \times 10^{-8}$ т, экспериментально объем эмиссии данных газов установить не удалось, так как концентрация данных газов была на уровне чувствительности прибора. Анализ косвенных выбросов выявил, что транспортировка сырья (0,024 т CO₂), работа ворошителя (0,189 т CO₂) и трактора (0,151 т CO₂) вносили наибольший вклад в углеродный след компоста. Большой вклад вносило гранулирование – 0,72 т CO₂.

Заключение. Расчет по упрощенной методике не учитывает до 63% выбросов: углеродный след компоста составил 0,044 т CO₂/т при расчете по упрощенной методике и 0,117 т CO₂/т при расчете с учетом косвенных выбросов.

Ключевые слова: парниковые газы; компостирование; эмиссия парниковых газов; топливо; углеродный след; куриный помет

Для цитирования. Камалова, А. Р., Ахметзянова, Л. Г., Курицин, И. Н., Ма-нишкин, С. Г., Курынцева, П. А., & Селивановская, С. Ю. (2026). Оценка углеродно-го следа компоста из куриного помета, получаемого с использованием технологии компостирования в буртах. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 115–140. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369>

Assessment of the carbon footprint of chicken manure compost produced using windrow composting technology

A.R. Kamalova¹, L.G. Akhmetzyanova¹, I.N. Kuritsin¹, S.G. Manishkin²,
P.A. Kuryntseva¹, S.Yu. Selivanovskaya¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

²Mari State University, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Abstract

Background. The use of chicken manure composting to mitigate livestock carbon footprint remains understudied, particularly regarding the balance between greenhouse gas emissions and long-term carbon stabilization in soil. This study accounted for both direct emissions and indirect emissions from transportation and energy-intensive operations. The findings enable process optimization considering environmental efficiency and climate goals.

The **purpose** of this study was to calculate the carbon footprint of compost produced through open windrow chicken manure composting at a model facility in central Russia.

Materials and methods. The study utilized floor-based chicken manure from “Atyashevo” poultry farm (Republic of Mari El). Composting was conducted in two windrows (24×3×1,1 m, 28 t raw material each) over 37 days, with continuous temperature and

moisture monitoring. Direct emissions (CO_2 , CH_4) were measured using a “PIA” gas chromatograph with a closed chamber method, while indirect emissions were calculated based on energy consumption and fuel costs following GHG Protocol. All measurements were performed in triplicate.

Results. The highest CO_2 emission intensity (up to $27,17 \text{ g C/m}^2\cdot\text{h}$) occurred during the initial phase due to rapid decomposition of labile organic matter, decreasing to $119,78 \text{ g C/m}^2\cdot\text{h}$ by the end. Total direct emissions reached $1,91 \text{ t CO}_2$. According to Russian Ministry of Natural Resources Method №371, CH_4 emissions were $5,6 \times 10^{-7} \text{ t}$ and N_2O emissions $3,4 \times 10^{-8} \text{ t}$, though these values were below instrument detection limits. Indirect emission analysis revealed that feedstock transportation ($0,024 \text{ t CO}_2$), windrow turner operation ($0,189 \text{ t CO}_2$), tractor use ($0,151 \text{ t CO}_2$), and granulation ($0,72 \text{ t CO}_2$) were major contributors.

Conclusion. Simplified calculation methods underestimated emissions by up to 63%: the compost carbon footprint was $0,044 \text{ t CO}_2/\text{t}$ when using simplified methods and $0,117 \text{ t CO}_2/\text{t}$ when accounting for indirect emissions.

Keywords: greenhouse gases; composting; greenhouse gas emissions; fuel; carbon footprint; chicken manure

For citation. Kamalova, A. R., Akhmetzyanova, L. G., Kuritsin, I. N., Manishkin, S. G., Kuryntseva, P. A., & Selivanovskaya, S. Yu. (2026). Assessment of the carbon footprint of chicken manure compost produced using windrow composting technology. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 115–140. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369>

Введение

Глобальный сельскохозяйственный сектор все больше сталкивается с необходимостью смягчить свое воздействие на окружающую среду, особенно с точки зрения выбросов парниковых газов (ПГ). Животноводство, генерирующее значительные объемы органических отходов, включая навозы и пометы, вносит значительный вклад в сельскохозяйственные выбросы ПГ, который требует эффективного управления для минимизации его углеродного следа [28; 35].

Одним из методов переработки куриного помета в полезный продукт, не требующий высоких капитальных вложений, высокотехнологичного оборудования, является компостирование. Продуктом компостирования является компост, который может быть использован в качестве органического удобрения для повышения урожайности сельскохозяйственной продукции, увеличения разнообразия почвенного микробного сообщества и подавления почвенных фитопатогенов [3; 14; 34; 44]. В процессе

компостирования происходят два процесса - минерализация и синтез органических соединений. Наиболее эффективным с точки зрения снижения углеродного следа считается компостирование, в котором преобладают процессы деструкции сложных органических соединений до прекурсоров гуминовых и фульвокислот с последующим их синтезом [10; 31; 32]. Таким образом, компостирование не только способствует утилизации биомассы, но и позволяет сохранить углерод в стабильных формах, который в последствии будет внесен в почву.

Хотя процесс сопровождается эмиссией CO_2 , связанной с микробной деградацией органического вещества, сам компост как продукт обладает потенциалом для снижения углеродного следа за счет долгосрочного связывания углерода в почве. Птичий помет является богатым источником питательных веществ, таких как углерод и азот, которые могут оказать значительное влияние на общий углеродный след процесса компостирования [5; 41]. В неоптимальных условиях, таких как недостаточная аэрация или избыточная влажность, могут развиваться анаэробные зоны, что приводит к образованию CH_4 , парникового газа с потенциалом глобального потепления (ПГП) в 28-34 раза выше, чем у CO_2 в течение 100 лет [16]. Кроме того, микробная трансформация азотсодержащих соединений во время компостирования может привести к эмиссии N_2O , парникового газа с ПГП в 265-298 раз выше, чем у CO_2 [25; 34]. Эти выбросы в совокупности вносят вклад в углеродный след компостирования, а именно являются прямыми выбросами (сфера охвата 1 / Scope 1), за которые предприятия обязаны отчитываться и тщательно контролировать, чтобы соответствовать глобальным климатическим целям [9; 24; 45].

Углеродный след каждого процесса может варьироваться в зависимости от конкретных используемых методов и технологий [41]. Выбор метода компостирования – бурты, аэрируемые статические кучи, реакторы или вермикомпостирование – может значительно влиять на состав и объем выбросов. Например, валковое компостирование часто связано с более высокими выбросами CH_4 из-за менее последовательной аэрации, в то время как компостирование в аэрируемых кучах позволяет обеспечивать более эффективный контроль над уровнем кислорода и температурой, потенциально снижая выбросы парниковых газов [33].

Согласно законодательству Российской Федерации углеродный след определяется как «общий объем выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, образующихся в ходе производства продукции либо в ходе оказания услуг, который включает в себя прямые выбросы парниковых газов (образуемые в результате осуществления хозяйственной

и иной деятельности), косвенные выбросы парниковых газов (связанные с потреблением электрической, тепловой энергии, иных ресурсов, используемых для обеспечения хозяйственной и иной деятельности и полученных от внешних объектов), поглощения парниковых газов в результате осуществления хозяйственной и иной деятельности, с учетом углеродных единиц, в отношении которых произведен зачет» [7].

Расчет углеродного следа учитывает различные факторы, включая потребление энергии, использование сырья, транспортировку и образование отходов на протяжении всего жизненного цикла продукта или услуги [42]. В этом контексте углеродный след компостирования куриного помета также зависит от множества факторов, таких как потребление энергии во время процесса компостирования, условия хранения и транспортировки самого помета, а также возможные выбросы парниковых газов из конечного продукта компоста [29]. Сам процесс компостирования вносит значительный вклад в выбросы парниковых газов, в первую очередь из-за разложения органического вещества, которое выделяет углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O) [1; 29].

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение динамики углерода при внесении компоста в почву. Это позволит оценить, какая часть углерода стабилизируется в форме гумуса, а какая подвергается минерализации, и определить реальный вклад компостирования в секвестрацию углерода и устойчивое землепользование.

Целью настоящего исследования был расчет углеродного следа компоста, получаемого на модельном предприятии, располагающемся в средней полосе России, и осуществляющем технологию компостирования куриного помета в открытых буртах.

Материалы и методы

Компостирование производили на производственной площадке Медведевского р-на Республики Марий-Эл в закрытом неотапливаемом помещении (720 м²). В качестве сырья для компостирования использовали куриный помет напольного содержания с птицефабрики «Атяшево» Республики Марий Эл. Для осуществления процесса компостирования было заложено два одинаковых бурта длиной 24 м, высотой 1,1 м и шириной 3 м. Масса помета, сформированного в один бурт, составила 28 т. Общая продолжительность цикла компостирования составила 37 дней. На 1, 3, 7 сутки и далее каждые три дня бурты ворошили с помощью самоходного ворошителя Backhus 16.30. Исходная влажность подстилочного помета со-

ставляла 52,8% и поддерживалась на уровне 50–60%. К концу эксперимента влажность компоста составила 44,5%, потеря массы - 2,32 т. Измерения температуры проводились на глубине 0,6 м с помощью цифрового измерителя КС-300 (точность $\pm 1,0$ °C), влажности - измерителем влажности Moisture Analyzer типа «Эвлас-2М». Термофильная фаза (>50 °C) поддерживалась не менее 21 дня, в соответствии с рекомендациями по снижению патогенов и стабилизации органического вещества [23].

Расчет углеродного следа

Существует несколько способов определения углеродного следа, среди которых ключевым является анализ источников выбросов и их доли в общем объеме выбросов при осуществлении контроля. При этом источники выбросов принято делить на две основные категории: прямые и косвенные [19].

1. Прямые выбросы от процессов минерализации органического вещества

Прямые выбросы могут интерпретироваться как первичный углеродный след. В данном эксперименте источником прямых выбросов являются бурты компостирования. Концентрация углекислого газа (CO_2), а также метана (CH_4) в отходящем воздухе из компостных буртов была количественно определена методом закрытой камеры с использованием портативного газового хроматографа «ПИА» (240x160x90мм). Экспозиционную камеру (пластиковая полусфера объемом 22,3 см³) на время измерения устанавливали на поверхность бурта (боковая часть) открытым нижним основанием. Герметизация системы достигалась за счет закапывания основания камеры, а также закрепления на ней силиконовой трубки длиной до 50 см. Поток CO_2 и CH_4 из компоста определялся по скорости изменения концентрации этого газа внутри камеры после выхода хроматографа на рабочий режим. Время экспозиции составляло 4 минуты, после чего осуществляли серию замеров с интервалом 3 сек. Градуировка CO_2 и CH_4 осуществлялась по поверочной газовой смеси производства ООО «ПГС-Сервис», с содержанием CO_2 и CH_4 0,0519 об. и 0,00112 % об., соответственно. Аналогично измерялись пробы окружающего воздуха в рабочей зоне для учета фоновых концентраций парниковых газов. Измерения эмиссии CO_2 , CH_4 , N_2O проводились еженедельно на протяжении 37 дней.

2. Косвенные выбросы от потребления энергоресурсов

Согласно GHG протоколу и стандарту ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021 для продукции определяются косвенные выбросы, относящиеся к сфере охвата 2 (Score 2) и сфере охвата 3 (Score 3) [2, 21]. В процессе производства компоста на модельном предприятии к косвенным выбросам относились:

1. Выбросы от использования электроэнергии на освещение, грануляцию и сушку - сфера охвата 2 (Score 2);

2. Выбросы от сжигания топлива при доставке сырья, работе ворошителя - сфера охвата 3 (Score3).

Косвенные выбросы были рассчитаны на основании данных предприятия по потреблению электроэнергии, списанию дизельного топлива согласно рекомендациям [6; 40].

Все измерения выполняли в трёхкратной повторности. Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Office Excel 2019 (США).-

Результаты и обсуждение

Компостирование – это биологический процесс конверсии органического вещества в продукт, обладающий удобрительными свойствами, который осуществляется микробным сообществом. При этом значительная часть углерода исходной органики выделяется в виде диоксида углерода (CO_2) за счет микробного дыхания в ходе аэробного разложения [15; 21].

1. Количественное определение прямых выбросов от процессов минерализации органического вещества

1.1 Количественное определение прямых выбросов от процессов минерализации органического вещества на основании экспериментальных данных.

Производственный цикл для получения компоста из куриного помета на модельном предприятии составляет 35-40 суток, процесс останавливается, когда температура компостного бурта снижается, а значит и замедляется микробное разложение органического субстрата. На основании экспериментальных данных эмиссии ПГ построена кумулятивная кривая (рис. 1).

В начальный период (28 декабря 2024 – 6 января 2025) наблюдается резкий рост респираторной активности с выделением углекислого газа, что характерно для активной фазы компостирования. Кумулятивная эмиссия CO_2 увеличилась с 2,48 до 27,17 г $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{час}^{-1}$, что указывает на быстрое разложение легкодоступных органических соединений. Далее (6–14 января 2025) скорость выделения CO_2 оставалась высокой, но постепенно замедлялась: по прошествии десяти дней с начала эксперимента (к 14 января 2025) суммарная эмиссия достигла 60,43 г $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{час}^{-1}$. В последующие дни (14–30 января 2025) процесс стабилизировался, прирост эмиссии снижался, что, вероятно, связано с истощением легкодоступного субстрата и переходом к более медленному разложению устойчивых фракций орга-

нического вещества. К концу эксперимента (30 января 2025) кумулятивная эмиссия CO_2 составила $119,78 \text{ г С/м}^2\cdot\text{час}^{-1}$.

Такая динамика является типичной для компостных смесей: существенное выделение CO_2 в активной фазе с последующим замедлением по мере стабилизации процесса [13; 33]. На основе полученных экспериментальных кумулятивной эмиссии, данных активной площади и массы буртов была определена эмиссия CO_2 за 37 суток процесса компостирования - $1,91 \text{ т CO}_2$.

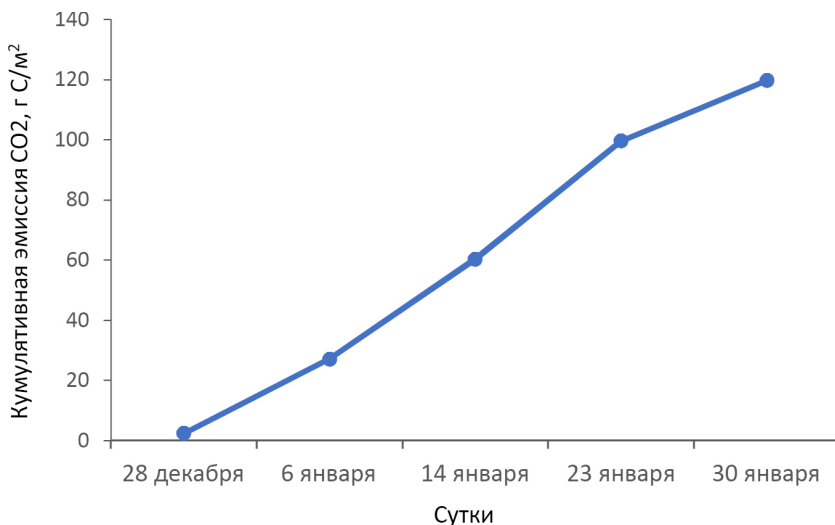


Рис. 1. Кумулятивная эмиссия CO_2

от компостных буртов за период компостирования

Fig. 1. Cumulative CO_2 emissions from compost piles during the composting period

1.2 Количественное определение объема прямых выбросов от процессов минерализации органического вещества расчетным методом

Основными парниковыми газами, которые способствуют глобальному потеплению, являются CH_4 и N_2O . Выброс этих газов зависит от технологии внесения отходов и, прежде всего, от управления процессом [12]. Экспериментальным методом содержание CH_4 и N_2O не были установлены, либо они имели значения сопоставимые с порогом чувствительности прибора (Приложение 1).

Анализ выбросов этих газов при биологической переработке отходов, полученных расчетным методом согласно Приказу Минприроды России

от 27.05.2022 N 371, выявил, что масса образующегося CH_4 составил $5,6 \times 10^{-7}\text{т}$, масса N_2O - $3,4 \times 10^{-8}\text{т}$ (табл. 1) [6]. Это связано с тем, что CH_4 преимущественно выделяется при анаэробном разложении органики [11], тогда как закись азота образуется в процессах нитрификации и денитрификации, интенсивность которых зависит от параметров аэрации и содержания азота в субстрате [15]. Режим ворошения в данном эксперименте был направлен на предотвращение формирования анаэробных зон в теле буртов.

Таблица 1.

Выбросы CH_4 и N_2O при биологической переработке отходов, полученные расчетным методом [6, 27]

Table 1. CH_4 and N_2O emissions from biological waste treatment, calculated using the method described in [6, 27]

Парниковый газ	Масса отходов, Гг	EF, г/кг	R, рекуперированный CH_4 , Гг	Выбросы при биологической переработке отходов, т
CH_4	0,056	10	$1,014 \times 10^{-9}$	$5,6 \times 10^{-7}$
N_2O	0,056	0,6	-	$3,4 \times 10^{-8}$

2. Расчет косвенных выбросов от потребления энергоресурсов

2.1 Расчет выбросов ПГ от сжигания дизельного топлива

Выбросы от сжигания топлива возникают не непосредственно в процессе его использования, а на других этапах жизненного цикла – от добычи и переработки сырья до транспортировки и утилизации отходов. Например, при добыче угля или нефти выделяется метан, а при их перевозке – парниковые газы от работы транспорта. Эти выбросы часто не учитываются в прямых отчётах, но их вклад в общий углеродный след может быть значительным, особенно для ископаемых видов топлива [22; 38]. В национальном стандарте ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021, вступившем в действие 1 января 2022 г., выделено пять категорий источников косвенных выбросов ПГ: от импортированной энергии, от транспорта; от продукции, используемой организацией; выбросы ПГ, связанные с использованием продукции, выпускаемой организацией [4]. В России доля различных отраслей энергетики и транспорта в общем вкладе в выбросы ПГ составляет примерно 60%, что в основном является результатом сжигания органического топлива [28; 35; 44].

Использование топлива для сельскохозяйственной техники из-за интенсивной обработки почвы часто считается одним из главных источников выброса CO_2 . Когда дизельный двигатель сжигает 1 кг топлива, то в атмосферу выбрасывается 15-16 кг различных газов с температурой на выходе

из выхлопной трубы двигателя 150-300°C в зависимости от режимов работы двигателя. Состав этих газов зависит от характеристик применяемого топлива, режимов работы двигателя внутреннего сгорания, типа конструкции и состояния системы питания двигателя, конструкции и состояния системы управления двигателем, но всегда включает в себя токсичные вещества как монооксид углерода, оксиды азота, углеводороды и сажу [7].

На данном модельном предприятии осуществляются следующие операции, сопровождающиеся сжиганием дизельного топлива, а значит и выбросами ПГ:

1. Доставка куриного помета
2. Размещение
3. Компостирование

Таблица 2.

**Расчет эмиссии CO₂ от сжигания топлива автотранспортом
при разных технологических операциях**

Table 2. Calculation of CO₂ Emissions from Fuel Combustion in Motor Vehicles
During Various Operational Activities

Технологическая операция	ТС и единицы	Расход топлива, л/км	Расход топлива, л	Эмиссия CO ₂ от сжигания топлива, тCO ₂
Доставка куриного помета	КАМАЗ, л/км	0,292	8,76	0,024
Размещение	Трактор Беларус 82.1, л/ч	3,5	56,00	0,151
Компостирование	Ворошитель BACKHUS 16.30, л/ч	7	70	0,189
			Итого:	0,3639

В таблице 2 приведены данные о расчете эмиссии углекислого газа (CO₂) от сжигания топлива автотранспортом при различных технологических операциях, связанных с обработкой куриного помета. Наибольший вклад в эмиссию CO₂ вносит работа ворошителя Backhus 16.30, при эксплуатации которого выделяется 0,189 т CO₂, за счет высокого удельного расхода дизельного топлива (7 л/ч). Коэффициент выбросов CO₂ при сжигании дизельного топлива (летнее) составляет 2,7 кг CO₂-экв./л, что объясняет значительные выбросы при длительной работе оборудования [12; 20]. Существенный уровень эмиссии наблюдается также и при разме-

щении куриного помета с использованием трактора Беларус 82.1. В этом случае сжигание топлива приводит к выбросу 0,151 т CO_2 , что соответствует среднему расходу 5,5 л/ч (с учетом типичной нагрузки на двигатель и продолжительности операции). Наименьшие выбросы зафиксированы при транспортировке помета автомобилем КАМАЗ, где удельный расход топлива составляет всего 0,292 л/км. Благодаря высокой топливной эффективности и оптимизации логистических маршрутов, совокупная эмиссия CO_2 не превышает 0,024 т. Это согласуется с данными о том, что грузовые перевозки на средние дистанции при частичной загрузке могут демонстрировать относительно низкую углеродоемкость [37].

2.2 Расчет выбросов ПГ от потребления электроэнергии

Косвенные выбросы ПГ, связанные с использованием электроэнергии, представляют собой значительную часть общего углеродного следа организаций и домохозяйств. Эти выбросы формируются на этапе производства электрической энергии, используемой конечными потребителями, и классифицируются как выбросы второго уровня (Scope 2) в соответствии с международными стандартами, такими как Greenhouse Gas Protocol. Косвенные выбросы включают углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O), выделяющиеся при сжигании топлива для производства электроэнергии. Их объем зависит от количества потребляемой энергии, источника энергии (уголь, газ, атомная энергия или возобновляемые ресурсы) и региональных коэффициентов выбросов энергосистемы. Для расчета косвенных выбросов используются различные методы. Региональный метод предполагает распределение выбросов между всеми потребителями в пределах расчетной зоны пропорционально их энергопотреблению. В рамках Greenhouse Gas Protocol применяются локационный и рыночный подходы [22]. Локационный метод основывается на среднем коэффициенте выбросов для региона, тогда как рыночный метод учитывает конкретные источники энергии, если они сертифицированы. Это позволяет более точно оценить воздействие на окружающую среду от использования электроэнергии.

Факторы, влияющие на величину косвенных выбросов, включают энергодоланс, технологии производства и региональные особенности. Выбросы зависят от доли ископаемого топлива в производстве электроэнергии. В России коэффициенты выбросов зависят от структуры энергосистемы в разных зонах и уровня использования ископаемого топлива.

На модельном предприятии электроэнергия используется в технологических операциях (сушка и грануляция готового продукта), а также поддержание функционирования производственных помещений (освещение).

Наибольший вклад в эмиссию CO₂ вносит гранулирование – на эту операцию приходится 0,72 т CO₂, что составляет 93% от общего объема выбросов (табл. 3). Столь высокая углеродоемкость обусловлена значительным энергопотреблением (1500 кВт·ч), что характерно для процессов механического прессования и термической обработки биомассы [30]. Согласно данным Международного энергетического агентства при среднем углеродоемкости электроэнергии в РФ 0,48 кг CO₂/кВт·ч (декабрь 2024 – февраль 2025) подобные энергозатратные процессы становятся ключевым источником парниковых газов в производственной цепочке [12; 17; 18].

Остальные технологические операции оказывают существенно меньшее влияние на углеродный след: сушка приводит к выбросу 0,031 т CO₂ при расходе 65 кВт·ч, что соответствует типичным значениям для конвективных сушильных установок малой мощности [36]. Освещение генерирует всего 0,022 т CO₂ (45 кВт·ч), что согласуется с современными оценками энергоэффективности LED-систем в промышленных помещениях [43].

Таблица 3.

Расчет эмиссии CO₂ при использовании электроэнергии для разных технологических операций

Table 3. Calculation of CO₂ Emissions from Electricity Use in Various Process Operations

Технологическая операция	Расход электроэнергии, кВт·ч	CO ₂ в кг	Эмиссия CO ₂ от сжигания топлива, тCO ₂
Сушка	65	31,2	0,031
Гранулирование	1500	720	0,72
Освещение	45	21,6	0,022
		Итого:	0,773

3. Сравнение данных экспериментального и расчетного определения выбросов ПГ при компостировании куриного помета

Сравнение двух подходов к расчету углеродного следа от компостирования выявил существенные расхождения в оценках эмиссии парниковых газов (табл. 4). Упрощенная методика [6], учитывающая лишь базовые выбросы от биологического разложения отходов (0,044 т CO₂), демонстрирует почти четырехкратное занижение показателей по сравнению с расширенным расчетом (0,117 т CO₂), включающим все значимые источники эмиссии CO₂. Согласно исследованиям IPCC [26], подобные расхождения характерны для многих биологических процессов переработки отходов, где косвенные выбросы (энергопотребление, работа техники) могут составлять до 75% от общего углеродного следа.

Основное различие между методиками заключается в учете дополнительных факторов эмиссии. Как показано в работах Boldrin et al. (2009), прямое окисление органики при аэробном компостировании способно генерировать до 1,2 т CO_2 на тонну перерабатываемых отходов. При этом энергозатратные операции (ворошение, аэрация, измельчение) с использованием дизельной техники и электрооборудования добавляют еще 0,9-1,5 т CO_2 в зависимости от технологических параметров [12].

Таблица 4.

**Расчет углеродного следа от компостирования по данным [6, 27]
и экспериментальным измерениям**

Table 4. Calculation of the carbon footprint of composting based
on data from [6, 27] and experimental measurements

Показатель	Углеродный след, т CO_2 готового компоста
Компостирование (без учета прямых выбросов CO_2 и энергозатрат)	0,044
Компостирование (с учетом прямых выбросов CO_2 , сжигания топлива и использования электроэнергии)	0,117

Заключение

В исследовании проведено сравнение двух методов расчета углеродного следа компостирования: расчетного (на основании Приказ Минприроды России от 27.05.2022 N 371) и экспериментального. Установлено, что расчетный метод, учитывает эмиссию CO_2 и N_2O от компостирования, но не включает прямые выбросы CO_2 (1,137 т CO_2). Экспериментальная методика, основанная на данных газового хроматографа, учитывает не только прямые выбросы CO_2 от компостных буртов, но и косвенные - от сжигания топлива и потребления электроэнергии. Это позволило получить более полную оценку – 3,047 т CO_2 , что значительно выше расчетного значения. Для достоверной оценки воздействия и разработки эффективных мер снижения эмиссии парниковых газов, рекомендуется применение комплексных методик учета, сочетающие инструментальные измерения и расчет косвенных выбросов.

Приложение 1

Дата	Наименование пробы	Количество выделенного газа, ppm		
		CO_2	CH_4	N_2O
21.12.2024	1	57132,8	ND	ND
21.12.2024	1	56890,75	ND	ND

21.12.2024	1	57210,81	ND	ND
21.12.2024	2	59876,54	ND	ND
21.12.2024	2	58723,89	ND	ND
21.12.2024	2	60123,46	ND	ND
21.12.2024	3	4737,75	ND	ND
21.12.2024	3	4815,33	ND	ND
21.12.2024	3	4693,57	ND	ND
21.12.2024	4	86697,12	ND	ND
21.12.2024	4	85492,47	ND	ND
21.12.2024	4	98055,82	ND	ND
06.01.2025	1	111241,1	1,39	ND
06.01.2025	1	64281,08	1,65	ND
06.01.2025	1	84506,2	3,95	ND
06.01.2025	2	25657,22	2,96	ND
06.01.2025	2	25429,46	1,80	ND
06.01.2025	2	37051,86	ND	ND
06.01.2025	3	54206,3	ND	ND
06.01.2025	3	43044,85	ND	ND
06.01.2025	3	100429,5	ND	ND
06.01.2025	4	81223,43	ND	ND
06.01.2025	4	81240,64	ND	ND
06.01.2025	4	82162,01	ND	ND
14.01.2025	1	89962,87	ND	ND
14.01.2025	1	86366,63	ND	ND
14.01.2025	1	114309,7	ND	ND
14.01.2025	2	115205,7	ND	ND
14.01.2025	2	80888,85	ND	ND
14.01.2025	2	79227,98	ND	ND
14.01.2025	3	92016,19	ND	ND
14.01.2025	3	63182,33	ND	ND
14.01.2025	3	59800,3	ND	ND
14.01.2025	4	58604,53	ND	ND
14.01.2025	4	60328,02	ND	ND
14.01.2025	4	59742,52	ND	ND
23.01.2025	1	38065,33	ND	ND
23.01.2025	1	48511,22	ND	ND
23.01.2025	1	48913,71	ND	ND
23.01.2025	2	52176,99	1,57	ND

23.01.2025	2	56523,81	1,63	ND
23.01.2025	2	47925,86	1,87	ND
23.01.2025	3	59641,16	ND	ND
23.01.2025	3	44979,16	ND	ND
23.01.2025	3	45615,53	ND	ND
23.01.2025	4	37944,62	ND	ND
23.01.2025	4	45221,67	ND	ND
23.01.2025	4	50863,84	ND	ND
30.01.2025	1	29752,63	ND	ND
30.01.2025	1	32653,37	ND	ND
30.01.2025	1	46481,72	ND	ND
30.01.2025	2	21391,72	ND	ND
30.01.2025	2	47526,28	ND	ND
30.01.2025	2	42634,66	ND	ND
30.01.2025	3	34694,67	ND	ND
30.01.2025	3	38314,58	ND	ND
30.01.2025	3	33500,28	ND	ND
30.01.2025	4	31025,51	ND	ND
30.01.2025	4	31602,65	ND	ND
30.01.2025	4	28616,59	ND	ND

Список литературы

1. Брюханов, А. Ю., Романовская, А. А., Шалавина, Е. В., Васильев, Э. В., & Вертянкина, В. Ю. (2024). Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов. *Engineering Technologies and Systems*, 34(4), 563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>. EDN: <https://elibrary.ru/FXVRMF>
2. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации. Москва: Стандартинформ, 2021. 23 с.
3. Семенов, М. В., Железова, А. Д., Ксенофонтова, Н. А., Иванова, Е. А., & Никитин, Д. А. (2023). Куриный помет как органическое удобрение: технологии компостирования и влияние на почвенные свойства (обзор). *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева*, (115), 160–198. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-160-198>. EDN: <https://elibrary.ru/YTVVZW>
4. Морозова, И. А. (2022). Современные требования к учету косвенных выбросов парниковых газов организации. *Стандарты и качество*, (8), 22–27. EDN: <https://elibrary.ru/QVUWEF>

5. Потапов, М. А. (2024). Перспективы применения птичьего помета в виде органического удобрения в сельском хозяйстве. *Инновационная техника и технология*, 11(2), 34–38. EDN: <https://elibrary.ru/IXOZXD>
6. Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». Зарегистрировано в Минюсте России 29.07.2022 № 69451. 257 с.
7. Хафизов, Р. Н., Халиуллин, Ф. Х., Хафизов, К. А., Нурмиев, А. А., Синицкий, С. А., & Галлямов, Э. А. (2021). Пути снижения выброса в атмосферу диоксида углерода. *Вестник Казанского ГАУ*, 3(63), 38–42. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-38-42>. EDN: <https://elibrary.ru/DIBZCJ>
8. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». Получено 5 марта 2025 г. из <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031>
9. Andersen, J. K. (2010). Quantification of greenhouse gas emissions from windrow composting of garden waste. *Journal of Environmental Quality*, 39(2), 713–724. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0329>
10. Bera, R., Saha, S., Datta, A., Mukhopadhyay, K., Barik, A. K., Bhattacharya, P., Mallick, R., Ganguli, M., Narasimhan, V. L., & Quah, E. (2024). Review of different composting methods towards end product quality, cost of production, process adoptability potential, post soil application efficacy and GHG mitigation potential: Fundamental factors behind attending objectivities of any regenerative farming program. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(12), 23–46. <https://doi.org/10.9734/ajee/2024/v23i12633>. EDN: <https://elibrary.ru/RBCPTR>
11. Bogner, J., Riitta, P., Seiji, H., Diaz, C., Mareckova, K., & Diaz, L. (2008). Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). *Waste Management and Research*, 26, 11–32. <https://doi.org/10.1177/0734242X07088433>. EDN: <https://elibrary.ru/XWZZSA>
12. Boldrin, A., Andersen, J. K., Möller, J., Favoino, E., & Christensen, T. H. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 800–812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>
13. Boudihi, E. H., Kifani, F. S., Wahby, I., & Tagne, M. S. (2022). Mathematical modeling and simulation of the stabilization of organic matter during the composting process. *Compost Science & Utilization*, 30, 62–73. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2023.2292568>. EDN: <https://elibrary.ru/HIZVWJ>
14. Chung, W. J., Chang, S. W., Chaudhary, D. K., Shin, J. D., & Kim, H. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction

- during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, 283, 131129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129>. EDN: <https://elibrary.ru/KLKBCN>
15. Davidson, E. A., Carvalho, C. J. R., Vieira, I. C. G., Figueiredo, R. D. O., Moutinho, P., & Yoko Ishida, F. O. (2004). Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. *Ecological Applications*, 14(4), S160–S163. <https://doi.org/10.1890/01-6006>
 16. de Richter, R., Ming, T., Davies, P., Wei, L., & Caillol, S. (2017). Removal of non-CO₂ greenhouse gases by large-scale atmospheric solar photocatalysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 68–96. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.01.001>. EDN: <https://elibrary.ru/VCQYXY>
 17. Electricity Data Explorer. (2024). Получено 6 марта 2025 г. из <https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/>
 18. International Energy Agency. (2023). *CO₂ Emissions in 2022*. 23 p.
 19. The Carbon Trust. Footprinting and reporting. Получено 7 марта 2025 г. из <https://www.carbontrust.com/en-as/what-we-do/net-zero-transition-planning-and-delivery/footprinting-and-reporting>
 20. Fruergaard, T. (2009). Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 724–737. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345276>
 21. Garcia, C. (1991). Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes. *Environmental Management*, 15(3), 433–439. <https://doi.org/10.1007/BF02393889>. EDN: <https://elibrary.ru/HQSQVG>
 22. World Resources Institute. *Greenhouse Gas Protocol*. Получено 7 марта 2025 г. из <https://ghgprotocol.org/>
 23. Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. New York. 752 p.
 24. Hellebrand, H. J. (1998). Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 69(4), 365–375. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0257>
 25. International Energy Agency. (2024). *Methane and Climate Change*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change>
 26. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022 — Mitigation of Climate Change. Full Report*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
 27. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Volume 5: Waste. Chapter 4: Biological Treatment of Solid Waste*. Получено 6 марта 2025 г. из https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf

28. Kabange, N. R., Kwon, Y., Lee, S.-M., Kang, J.-W., Cha, J.-K., & Park, H. (2023). Mitigating greenhouse gas emissions from crop production and management practices, and livestock: A review. *Sustainability*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/su152215889>. EDN: <https://elibrary.ru/WMNJAY>
29. Kang, H.-Y., Lee, J. Y., Kim, G. Y., Hwang, Y. W., Park, K. H., & Lee, D. J. (2024). Analyzing the environmental impact of livestock manure recycling process using life cycle assessment. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 46(10), 582–591. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2024.46.10.582>. EDN: <https://elibrary.ru/RSEAOF>
30. Kumar, D. (2020). Energy and exergy analysis of a natural convection dryer with and without sensible heat storage medium. *Journal of Energy Storage*, 29, 101481. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101481>. EDN: <https://elibrary.ru/IAPKKD>
31. Kusum, A. (2024). Composting: A sustainable approach to waste management. B *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences: Book 8, Part 4, Chapter 1* (IIP Series) (Vol. 3, pp. 59–69). India. <https://doi.org/10.58532/V3BCAG8P4CH1>
32. Li, G., Li, X., Yang, Y., Hong, J., Huang, C., & He, D. (2024). Effects of a nanobio-film-covered echelon oxygen-controlled composting process on carbon and nitrogen conversion and emission reduction efficiency. *Environmental Technology and Innovation*, 35, 103669. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103669>. EDN: <https://elibrary.ru/NFOVCM>
33. Pennell, T., Comeau, L., MacKinley, K., Hann, S., Heung, B., & Kiely, B. (2024). Characterization of carbon dioxide emissions from late-stage windrow composting. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1453306>. EDN: <https://elibrary.ru/CVHSBW>
34. Min, H., Huang, X., Xu, D., Shao, Q., Li, Q., & Wang, H. (2022). Determining the effects of compost substitution on carbon sequestration, greenhouse gas emission, soil microbial community changes, and crop yield in a wheat field. *Life*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/life12091382>. EDN: <https://elibrary.ru/FCTOZS>
35. Mulrow, J., Machaj, K., Deanes, J., & Derrible, S. (2019). The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction features. *Sustainable Production and Consumption*, 18, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.12.001>
36. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press. 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>
37. European Environment Agency. (n.d.). *Rail and waterborne — best for low-carbon motorized transport*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport>
38. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Получено 7 марта

- 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
39. Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., & Sánchez-Monedero, M. (2015). Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters*, 13(3), 223–238. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>. EDN: <https://elibrary.ru/UVWRQX>
 40. Schwarz, M. (2018). Carbon footprint of a university compost facility: Case study of Cornell Farm Services. *Compost Science and Utilization*, 26(2), 128–143. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2018.1438934>
 41. Seidavi, A. R. (2019). Present and potential impacts of waste from poultry production on the environment. *World's Poultry Science Journal*, 75(1), 29–42. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000922>
 42. Stodt, F., Maisch, N., Ruf, P., Lechler, A., Riedel, O., & Reich, C. (2024). *Collaborative Smart Production Supply Chains with Blockchain Based Digital Product Passports*. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1194.v1>
 43. Tsao, J. Y., Saunders, H. D., Creighton, J. R., Coltrin, M. E., & Simmons, J. A. (2010). Solid-state lighting: An energy-economics perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(35). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/35/354001>
 44. Wang, N., He, Y., Zhao, K., Lin, X., He, X., & Chen, A. (2024). Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of agricultural waste composting process: A review. *Journal of Environmental Management*, 354, 120337. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120337>. EDN: <https://elibrary.ru/NUCKBU>
 45. Zhu-Barker, X., Bailey, S. K., Paw, U. K. T., Burger, M., & Horwath, W. R. (2017). Greenhouse gas emissions from green waste composting windrow. *Waste Management*, 59, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.004>

References

1. Bryukhanov, A. Yu., Romanovskaya, A. A., Shalavina, E. V., Vasiliev, E. V., & Verityankina, V. Yu. (2024). The impact of manure and litter processing technologies on greenhouse gas emissions. *Engineering Technologies and Systems*, 34(4), 563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>. EDN: <https://elibrary.ru/FXVRMF>
2. GOST R ISO 14064-1-2021. *Greenhouse gases. Part 1. Requirements and guidance for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals at the organizational level*. Moscow: Standartinform. 23 p.
3. Semenov, M. V., Zhelezova, A. D., Ksenofontova, N. A., Ivanova, E. A., & Nikitin, D. A. (2023). Chicken manure as an organic fertilizer: Composting technologies and impact on soil properties (review). *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V. V. Do-*

- kuchaeva*, (115), 160–198. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-160-198>. EDN: <https://elibrary.ru/YTVVZW>
4. Morozova, I. A. (2022). Modern requirements for accounting for indirect greenhouse gas emissions of an organization. *Standarty i kachestvo*, (8), 22–27. EDN: <https://elibrary.ru/QVUWEF>
 5. Potapov, M. A. (2024). Prospects for the use of poultry manure as an organic fertilizer in agriculture. *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya*, 11(2), 34–38. EDN: <https://elibrary.ru/IXOZXD>
 6. Ministry of Natural Resources of Russia. (2022). *Order No. 371 dated May 27, 2022 "On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emission and removal volumes"*. Registered with the Ministry of Justice of Russia on July 29, 2022, No. 69451. 257 p.
 7. Khafizov, R. N., Khaliullin, F. Kh., Khafizov, K. A., Nurmiev, A. A., Sinitskiy, S. A., & Gallyamov, E. A. (2021). Ways to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere. *Vestnik Kazanskogo GAU*, 3(63), 38–42. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-38-42>. EDN: <https://elibrary.ru/DIBZCJ>
 8. Federal Law No. 296-FZ dated July 2, 2021 “On limiting greenhouse gas emissions”. Retrieved March 5, 2025, from <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031>
 9. Andersen, J. K. (2010). Quantification of greenhouse gas emissions from windrow composting of garden waste. *Journal of Environmental Quality*, 39(2), 713–724. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0329>
 10. Bera, R., Saha, S., Datta, A., Mukhopadhyay, K., Barik, A. K., Bhattacharya, P., Mallick, R., Ganguli, M., Narasimhan, V. L., & Quah, E. (2024). Review of different composting methods towards end product quality, cost of production, process adoptability potential, post soil application efficacy and GHG mitigation potential: Fundamental factors behind attending objectivities of any regenerative farming program. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(12), 23–46. <https://doi.org/10.9734/ajee/2024/v23i12633>. EDN: <https://elibrary.ru/RBCPTR>
 11. Bogner, J., Riitta, P., Seiji, H., Diaz, C., Mareckova, K., & Diaz, L. (2008). Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). *Waste Management and Research*, 26, 11–32. <https://doi.org/10.1177/0734242X07088433>. EDN: <https://elibrary.ru/XWZZSA>
 12. Boldrin, A., Andersen, J. K., Möller, J., Favoino, E., & Christensen, T. H. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 800–812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>

13. Boudihi, E. H., Kifani, F. S., Wahby, I., & Tagne, M. S. (2022). Mathematical modeling and simulation of the stabilization of organic matter during the composting process. *Compost Science & Utilization*, 30, 62–73. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2023.2292568>. EDN: <https://elibrary.ru/HIZVWJ>
14. Chung, W. J., Chang, S. W., Chaudhary, D. K., Shin, J. D., & Kim, H. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, 283, 131129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129>. EDN: <https://elibrary.ru/KLKBCN>
15. Davidson, E. A., Carvalho, C. J. R., Vieira, I. C. G., Figueiredo, R. D. O., Moutinho, P., & Yoko Ishida, F. O. (2004). Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. *Ecological Applications*, 14(4), S160–S163. <https://doi.org/10.1890/01-6006>
16. de Richter, R., Ming, T., Davies, P., Wei, L., & Caillol, S. (2017). Removal of non-CO₂ greenhouse gases by large-scale atmospheric solar photocatalysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 68–96. <https://doi.org/10.1016/j.peecs.2017.01.001>. EDN: <https://elibrary.ru/VCQYXY>
17. Electricity Data Explorer. (2024). Получено 6 марта 2025 г. из <https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/>
18. International Energy Agency. (2023). *CO₂ Emissions in 2022*. 23 p.
19. The Carbon Trust. Footprinting and reporting. Получено 7 марта 2025 г. из <https://www.carbontrust.com/en-as/what-we-do/net-zero-transition-planning-and-delivery/footprinting-and-reporting>
20. Fruergaard, T. (2009). Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 724–737. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345276>
21. Garcia, C. (1991). Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes. *Environmental Management*, 15(3), 433–439. <https://doi.org/10.1007/BF02393889>. EDN: <https://elibrary.ru/HQSQVG>
22. World Resources Institute. *Greenhouse Gas Protocol*. Получено 7 марта 2025 г. из <https://ghgprotocol.org/>
23. Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. New York. 752 p.
24. Hellebrand, H. J. (1998). Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 69(4), 365–375. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0257>
25. International Energy Agency. (2024). *Methane and Climate Change*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change>

26. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022 — Mitigation of Climate Change. Full Report*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
27. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Volume 5: Waste. Chapter 4: Biological Treatment of Solid Waste*. Получено 6 марта 2025 г. из https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf
28. Kabange, N. R., Kwon, Y., Lee, S.-M., Kang, J.-W., Cha, J.-K., & Park, H. (2023). Mitigating greenhouse gas emissions from crop production and management practices, and livestock: A review. *Sustainability*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/su152215889>. EDN: <https://elibrary.ru/WMNJAY>
29. Kang, H.-Y., Lee, J. Y., Kim, G. Y., Hwang, Y. W., Park, K. H., & Lee, D. J. (2024). Analyzing the environmental impact of livestock manure recycling process using life cycle assessment. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 46(10), 582–591. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2024.46.10.582>. EDN: <https://elibrary.ru/RSEAOF>
30. Kumar, D. (2020). Energy and exergy analysis of a natural convection dryer with and without sensible heat storage medium. *Journal of Energy Storage*, 29, 101481. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101481>. EDN: <https://elibrary.ru/IAPKKD>
31. Kusum, A. (2024). Composting: A sustainable approach to waste management. B *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences: Book 8, Part 4, Chapter 1* (IIP Series) (Vol. 3, pp. 59–69). India. <https://doi.org/10.58532/V3BCAG8P4CH1>
32. Li, G., Li, X., Yang, Y., Hong, J., Huang, C., & He, D. (2024). Effects of a nanobio-film-covered echelon oxygen-controlled composting process on carbon and nitrogen conversion and emission reduction efficiency. *Environmental Technology and Innovation*, 35, 103669. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103669>. EDN: <https://elibrary.ru/NFOVCM>
33. Pennell, T., Comeau, L., MacKinley, K., Hann, S., Heung, B., & Kiely, B. (2024). Characterization of carbon dioxide emissions from late-stage windrow composting. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1453306>. EDN: <https://elibrary.ru/CVHSBW>
34. Min, H., Huang, X., Xu, D., Shao, Q., Li, Q., & Wang, H. (2022). Determining the effects of compost substitution on carbon sequestration, greenhouse gas emission, soil microbial community changes, and crop yield in a wheat field. *Life*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/life12091382>. EDN: <https://elibrary.ru/FCTOZS>
35. Mulrow, J., Machaj, K., Deanes, J., & Derrible, S. (2019). The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction features. *Sustainable Production and Consumption*, 18, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.12.001>
36. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press. 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>

37. European Environment Agency. (n.d.). *Rail and waterborne — best for low-carbon motorized transport*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport>
38. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Получено 7 марта 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
39. Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., & Sánchez-Monedero, M. (2015). Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters*, 13(3), 223–238. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>. EDN: <https://elibrary.ru/UVWRQX>
40. Schwarz, M. (2018). Carbon footprint of a university compost facility: Case study of Cornell Farm Services. *Compost Science and Utilization*, 26(2), 128–143. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2018.1438934>
41. Seidavi, A. R. (2019). Present and potential impacts of waste from poultry production on the environment. *World's Poultry Science Journal*, 75(1), 29–42. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000922>
42. Stodt, F., Maisch, N., Ruf, P., Lechler, A., Riedel, O., & Reich, C. (2024). *Collaborative Smart Production Supply Chains with Blockchain Based Digital Product Passports*. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1194.v1>
43. Tsao, J. Y., Saunders, H. D., Creighton, J. R., Coltrin, M. E., & Simmons, J. A. (2010). Solid-state lighting: An energy-economics perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(35). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/35/354001>
44. Wang, N., He, Y., Zhao, K., Lin, X., He, X., & Chen, A. (2024). Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of agricultural waste composting process: A review. *Journal of Environmental Management*, 354, 120337. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120337>. EDN: <https://elibrary.ru/NUCKBU>
45. Zhu-Barker, X., Bailey, S. K., Paw, U. K. T., Burger, M., & Horwath, W. R. (2017). Greenhouse gas emissions from green waste composting windrow. *Waste Management*, 59, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.004>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Камалова Алина Ринатовна, младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, Российская Федерация
akhtjamovaalina07@gmail.com

Ахметзянова Лейсан Габбасовна, заведующий кафедрой прикладной экологии, к.б.н., Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
leisan-ksu@mail.ru

Курицин Иван Николаевич, магистрант кафедры прикладной экологии, Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
ivan-kuritsin@yandex.ru

Манишкин Сергей Геннадьевич, доцент кафедры общего земледелия, растениеводства, агрохимии и защиты растений, к.с.-х.н.
ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»
пл. Ленина, 1, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, РФ
smanishkin@mail.ru

Курынцева Полина Александровна, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, к.б.н., Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
polinazwerewa@yandex.ru

Селивановская Светлана Юрьевна, ведущий научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, д.б.н., профессор, Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alina R. Kamalova, Researcher at the Educational and Scientific Laboratory, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation
akhtjamovaalina07@gmail.com

SPIN-code: 2691-5682

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7857-8756>

ResearcherID: AAO-8646-2020

Scopus Author ID: 56539926700

Leysan G. Akhmetzyanova, Head of the Department of Applied Ecology, Ph.D. of Biological Sciences, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

leisan-ksu@mail.ru

SPIN-code: 1025-3736

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2464-8886>

ResearcherID: F-3849-2015

Scopus Author ID: 55530953200

Ivan N. Kuritsin, Master's student, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ivan-kuritsin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6028-3467>

ResearcherID: NGR-9978-2025

Sergey G. Manishkin, Associate Professor, Ph.D. of Agricultural Sciences
Mari State University

1, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation

smanishkin@mail.ru

SPIN-code: 8294-8485

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4668-7569>

ResearcherID: G-2699-2014

Scopus Author ID: 57214227143

Polina A. Kuryntseva, Senior Researcher, Ph.D. of Biological Sciences, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

polinazwerewa@yandex.ru

SPIN-code: 3916-9347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9274-7077>

ResearcherID: M-3407-2016

Scopus Author ID: 56069925000

Svetlana Y. Selivanovskaya, Senior Scientist, Doctor of biological sciences, Professor,
Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management

Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

SPIN-code: 4867-6900

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6379-7166>

ResearcherID: L-8851-2013

Scopus Author ID: 6603604965

Поступила 22.05.2025

После рецензирования 01.07.2025

Принята 06.08.2025

Received 22.05.2025

Revised 01.07.2025

Accepted 06.08.2025

Экология, почвоведение и природопользование / Ecology, Soil Science and Nature Management

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1401](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1401)EDN: [ENSOVP](https://www.edn.ru/ENSOVP)

УДК 579.64:632.9



Изучение микробиома почвы на территории ядохомогильника в Джизакской области Узбекистана

З.Р. Ахмедова, Т.Э. Шонахунов, А.А. Ибрагимов,
З.Т. Хамраева, М.А. Яхяева

*Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан,
Ташкент, Узбекистан*

Аннотация

Обоснование. Полигон захоронения ядохимикатов в Джизакской области Республики Узбекистан, занимающий 12,7 гектаров площади, оказывает длительное техногенное воздействие на почвы, что приводит к нарушению их микробиологической и агрохимической структуры. Микроорганизмы и почвенные ферменты чувствительно реагируют на эти загрязнения, следовательно, их численность и активность служат надёжными биоиндикаторами экологического состояния почвенных ресурсов. Экспериментально было показано резкое снижение микробной численности, ферментативной активности и плодородия почв на исследованных загрязнённых участках, что подчёркивает необходимость биологической ремедиации и агрохимической коррекции для восстановления почвенного биоценоза и повышения устойчивости экосистем в целом.

Изучение микробиоты загрязнённых почв пестицидами позволяют оценить и, направлено на оценку влияния этих химикатов на состав и функции почвенных микроорганизмов, что критически важно для поддержания здоровья почвы и экосистемы в целом. Такие исследования проводятся с использованием микробиологических, молекулярных методов, позволяющих выявить качественные и количественные показатели, метаболической активности бактерий, грибов и других почвенных организмов, а также оценить их роль в разложении пестицидов и влиянии на плодородие почвы.

Цель. Оценка микробиологического, ферментативного и агрохимического состояния почв различных участков полигона ядохимикатов для выявления степени техногенного воздействия и необходимости проведения мероприятий по биологической ремедиации.

Материалы и методы. В ходе исследования были проанализированы 5 почвенных образцов, отобранных в различных участках полигона и прилегающей террито-

рии. Для микробиологического анализа из образцов готовили водные суспензии (10 г/100 мл), которые инкубировали при 30 °С в течение 24 часов. Микроорганизмы (бактерии, грибы, актиномицеты) культивировали на элективных питательных средах (нутриент агар (NA) и среда Сабуро (Hi Media), среда Чапека) при разведениях почвенной суспензии 10^1 – 10^7 . Рост колоний каждого класса микроорганизмов фиксировали каждые 12 часов с определением их численности и морфологии.

Физические свойства почв (сыпучесть, осаждаемость, однородность, цвет) оценивались визуально. Контрольным образцом служила почва из дендропарковой зоны Института микробиологии АН РУз (Ташкент).

Ферментативную активность почвенных образцов (каталазы, пероксидазы, полифенолоксидазы, инвертазы) определяли газометрическим и колориметрическим методами по стандартным протоколам (1, с 41; 14).

Агрохимические показатели (рН, гумус, доступные формы фосфора, калия, обменные катионы, степень засоления) определялись по ГОСТам и методическим указаниям (Ташкент, 2005), с использованием потенциометрии, колориметрии, фотометрии и гравиметрического анализа.

Результаты. Микробиологический анализ показал значительное снижение общей численности бактерий, грибов и актиномицетов в почвах полигона по сравнению с контрольной пробой (4905×10^5 КОЕ/г). Минимальные значения зафиксированы в центральной части полигона (25×10^5 КОЕ/г), что связано с неблагоприятными физико-химическими свойствами почв. Почва восточной части показала большую численность (118×10^5 КОЕ/г), среди всех загрязнённых участков, из которых количество бактерий – 113×10^5 , грибов – 2×10^5 , актиномицетов – 3×10^5), однако, физическое состояние этой почвы свидетельствует о нарушении почвенной структуры. Почвы западной и северной части содержали низкую численность бактерий (36×10^5 и 43×10^5 КОЕ/г соответственно), на расстоянии 2 км от полигона число бактерий составила (40×10^5 КОЕ/г), актиномицетов -1, грибы вовсе не были обнаружены, что указывает на длительное влияние загрязнений за пределами полигона.

Ферментативная активность почвы (каталаза, полифенолоксидаза, пероксидаза, инвертаза) также была значительно снижена во всех загрязнённых участках полигона, что свидетельствует о нарушении метаболических процессов в микробном сообществе. Пероксидазная активность больше обнаружена в центре полигона и северной части, полифенолоксидаза демонстрирует аналогичное угнетение – от 2,4 до $4,3 \text{ мг}_{\text{бензох}} / 20 \text{ г} \cdot 4 \text{ ч}$ по сравнению с контрольным вариантом $6,8 \text{ ПФО} - 6,8 \text{ мг}_{\text{бензох}} / 20 \text{ г}_{\text{почвы}} / 4 \text{ ч}$. Особенно низкие значения отмечены в центре полигона ($2,4 \text{ мг}_{\text{бензох}} / 20 \text{ г}_{\text{почвы}} / 4 \text{ ч}$) и на севере ($3,0 \text{ ПФО} - 6,8 \text{ мг}_{\text{бензох}} / 20 \text{ г}_{\text{почвы}} / 4 \text{ ч}$), что может свидетельствовать о нарушении метаболизма ароматических соединений фенольной природы почвенной микробиоты. Также, инвертазная активность оказалась существенно низкой в северной части полигона, что свидетельствует о резком снижении углеводного обмена в

почве и, вероятно, о дефиците количества активных сапротрофов. В образце 2,0 км от полигона, наблюдается увеличение ферментативной активности.

Агрохимический анализ выявил, что почва южной и западной части содержит больше гумуса, углерода, но испытывают дефицит калия. Восточная, северная части обеднены по всем показателям: N-NO_3 (22,9–69,7 мг/кг), подвижная форма P_2O_5 (18,0–34,0 мг/кг) и калия K_2O (252,8–409,4 мг/кг). Наилучшие показатели выявлены в южной, наихудшие – в восточной и северной частях полигона.

Заключение. Проведённое исследование выявило выраженное техногенное угнетение микробиологической, ферментативной активности и агрохимической структуры почв на территории полигона захоронения ядохимикатов. Наиболее деградированы северная, восточная и центральные зоны. Южная и западная части сохранили частичный потенциал, но требуют коррекции. Полученные данные подтверждают необходимость срочных мер по биоремедиации и агрохимическому восстановлению загрязнённых почв.

Установлено, что число почвенных микроорганизмов и активности ферментов может служить чувствительным биоиндикатором экологического состояния почв могильника ядовитых веществ Форишского района Джизакской области. Выявленные изменения указывают на выраженное техногенное угнетение ферментативной системы микробного сообщества полигона. Это подчёркивает актуальность проведения мероприятий по биологической биоремедиации, включая восстановление численности микробного сообщества и ферментативного потенциала, как важного показателя устойчивости почвенных экосистем.

Ключевые слова: почва; полигон; ядовитые вещества; микробный пейзаж; посевы; бактерии; грибы; осаждаемость; тяжелая почва; физические свойства

Для цитирования. Ахмедова, З. Р., Шонахуннов, Т. Э., Ибрагимов, А. А., Хамраева, З. Т., & Яхяева, М. А. (2026). Изучение микробиома почвы на территории ядохимикатов в Джизакской области Узбекистана. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 141–169. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1401>

Study of soil microbiome in the territory of a toxic waste burial site in Jizzakh Region, Uzbekistan

Z.R. Akhmedova, T.E. Shonakhunov, A.A. Ibragimov,
Z.T. Khamraeva, M.A. Yakhyayeva

*Institute of Microbiology Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Uzbekistan*

Abstract

Background. The pesticide burial site in the Jizzakh region of the Republic of Uzbekistan, covering an area of 12.7 hectares, has been exerting long-term anthropogenic

pressure on the soil, leading to significant disruptions in its microbiological and agrochemical structure. Soil microorganisms and enzymes are highly sensitive to such contamination, and thus their abundance and activity serve as reliable bioindicators of the ecological condition of soil resources. Experimental findings have demonstrated a sharp decline in microbial populations, enzymatic activity, and soil fertility in contaminated areas, underscoring the urgent need for biological remediation and agrochemical correction to restore soil biocenosis and enhance the resilience of the ecosystem as a whole.

Studying the mycobiota of soils contaminated with pesticides allows us to evaluate and assess the impact of these chemicals on the composition and functions of soil microorganisms, which is critical for maintaining the health of the soil and the ecosystem as a whole.

Such studies are conducted using microbiological and molecular methods, which allow us to identify qualitative and quantitative indicators of the metabolic activity of bacteria, fungi, and other soil organisms, as well as to assess their role in the decomposition of pesticides and their impact on soil fertility

Purpose. To assess the microbiological, enzymatic, and agrochemical status of soils from various sections of the pesticide burial site in order to determine the extent of anthropogenic impact and the necessity for implementing biological remediation measures.

Materials and methods. In this study, five soil samples were analyzed, collected from various sections of the pesticide burial site and adjacent territories. For microbiological analysis, aqueous suspensions were prepared from the samples (10 g per 100 mL) and incubated at 30 °C for 24 hours. Microorganisms—including bacteria, fungi, and actinomycetes—were cultivated on selective nutrient media (nutrient agar (NA), Sabouraud agar (HiMedia), and Czapek medium) using serial dilutions of the soil suspension ranging from 10^1 to 10^7 . Colony growth for each microbial group was recorded every 12 hours, with quantification and morphological assessment.

The physical properties of the soils (friability, sedimentation, homogeneity, and color) were evaluated visually. The control sample was collected from the dendropark zone of the Institute of Microbiology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Tashkent).

Enzymatic activity in soil samples (catalase, peroxidase, polyphenol oxidase, and invertase) was determined using gasometric and colorimetric methods according to standard protocols (Galstyan, Khaziev et al.).

Agrochemical parameters—including pH, humus content, available forms of phosphorus and potassium, exchangeable cations, and degree of salinization—were determined according to GOST standards and methodological guidelines (Tashkent, 2005), using potentiometry, colorimetry, photometry, and gravimetric analysis.

Results. Microbiological analysis revealed a significant decrease in the total number of bacteria, fungi, and actinomycetes in soils from the pesticide burial site compared to

the control sample ($4,905 \times 10^5$ CFU/g). The lowest values were recorded in the central part of the site (25×10^5 CFU/g), which is attributed to unfavorable physicochemical soil conditions. The eastern section exhibited the highest microbial counts among contaminated areas (118×10^5 CFU/g), including bacteria— 113×10^5 , fungi— 2×10^5 , and actinomycetes— 3×10^5 CFU/g. However, the physical structure of this soil showed signs of degradation. Soils from the western and northern parts had lower bacterial counts (36×10^5 and 43×10^5 CFU/g, respectively). Even at a distance of 2 km from the site, bacterial counts were 40×10^5 CFU/g, actinomycetes were present in minimal numbers (1×10^5 CFU/g), and fungi were entirely absent, indicating prolonged contamination effects beyond the site's boundaries.

Enzymatic activity (catalase, polyphenol oxidase, peroxidase, and invertase) was also significantly reduced across all contaminated areas, reflecting disrupted metabolic processes in the soil microbial community. Peroxidase activity was relatively higher in the central and northern parts, while polyphenol oxidase activity was consistently suppressed—ranging from 2.4 to 4.3 mg benzoquinone/20 g·4 h—compared to the control value of 6.8 mg benzoquinone/20 g·4 h. Particularly low values were recorded in the center (2.4 mg/20 g·4 h) and northern areas (3.0 mg/20 g·4 h), suggesting impaired metabolism of phenolic aromatic compounds by the soil microbiota. Invertase activity was also notably reduced in the northern section, indicating a sharp decline in carbohydrate metabolism, likely due to a deficiency of active saprotrophs. A sample collected 2 km from the site showed increased enzymatic activity, indicating partial recovery.

Agrochemical analysis revealed that soils in the southern and western sections had higher levels of humus and carbon but suffered from potassium deficiency. In contrast, the eastern and northern sections were depleted in all major indicators: nitrate nitrogen (N-NO_3) ranged from 22.9 to 69.7 mg/kg, available phosphorus (P_2O_5) from 18.0 to 34.0 mg/kg, and potassium (K_2O) from 252.8 to 409.4 mg/kg. The best agrochemical parameters were observed in the southern section, while the poorest were found in the eastern and northern parts of the site.

Conclusion. The conducted study revealed pronounced anthropogenic suppression of the microbiological, enzymatic activity, and agrochemical structure of soils within the pesticide burial site. The northern, eastern, and central zones were found to be the most degraded. Although the southern and western areas retained partial biological potential, they still require corrective interventions. The obtained data underscore the urgent need for biological remediation and agrochemical restoration of contaminated soils.

It was established that the abundance of soil microorganisms and enzyme activity can serve as sensitive bioindicators of the ecological condition of soils at the toxic waste burial site in the Forish district of the Jizzakh region. The observed changes indicate a significant anthropogenic disruption of the enzymatic system of the microbial commu-

nity within the site. These findings highlight the relevance of implementing biological remediation measures aimed at restoring both microbial populations and enzymatic potential—key indicators of the sustainability of soil ecosystems.

Keywords: soil; polygon; toxic substances; microbial landscape; crops; bacteria; fungi; sedimentation; heavy soil; physical properties

For citation. Akhmedova, Z. R., Shonakhunov, T. E., Ibragimov, A. A., Khamraeva, Z. T., & Yakhyayeva, M. A. (2026). Study of soil microbiome in the territory of a toxic waste burial site in Jizzakh Region, Uzbekistan. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 141–169. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1401>

Введение

В связи с негативными последствиями в окружающей среде и запретом использования множества пестицидов и других ядохимикатов в Узбекистане на сегодняшний день закрываются 167 полигонов, занимающих 1 109 гектаров, которые нуждаются в рекультивации. Взамен планируется создание 56 новых полигонов на общей площади 773 гектара для захоронения и уничтожения остаточных количеств пестицидов, ядохимикатов и др. веществ, являющиеся опасными агентами для почвы, микробного сообщества и элементов почвы, обеспечивающих биологическую активность почвы.

Несмотря на эмбарго множественных видов пестицидов, последние все же активно и широко применяются практике. Изучение динамика применения пестицидов в Российской Федерации показывают, о разнообразии и их количественного объема. Сравнительная динамика применения средств защиты растений различных классов опасности за 39 лет указывает на то, что применение токсичных веществ значительно сократилось. Применение пестицидов 1-го класса опасности в 1990 г. составило 10.93 тыс. т (8.8%), а с 2016 по 2021 гг. остался на уровне 20.0 т (0.03%). Препараты 1-го класса опасности использовали только в группе фумигантов и родентицидов (Дакфосал, Магтоксин, Фоском, Фосфин, Фумифос), инсектицид Хинуфур применяли от амбарных вредителей и болезней и для обработки семян. Вместе с этим увеличилось применение инсектицидов и фунгицидов 2-го класса опасности, их показатели возросли в 2 раза против 1990 г. и составили 24.06 тыс. тонн или 34.6% [13, с. 37].

Следует отметить, что загрязнение почв остаточными количествами пестицидов всё ещё остается я одной из злободневных проблем современной науки, решения которых напрямую зависит от микробиологического разложения пестицидов в засоренных почвах, особенно, изучением микробиоты, выделением деструктивно активных культур, далее, используя

отобранные микроорганизмы, способные быстро и полно утилизировать данные соединения.

Почвы являются одним из крупнейших резервуаров биоразнообразия на Земле, поскольку вмещают мириады микроорганизмов, вносящих фундаментальный вклад в функционирование и плодородие экосистем [25, с. 440; 16]. Особенно важны бактерии и грибы, которые функционируют совместно как микробиом и, например, в значительной степени регулируют круговорот азота в почве - одного из важнейших питательных элементов для роста растений [3; 20, с. 263] связи с этим важно понимать, как загрязнение сельскохозяйственных почв остатками пестицидов влияет на их микробиом и плодородие.

Поллютанты, в частности хлорорганические пестициды, способны загрязнять почвы и оказывать токсическое воздействие на микробное сообщество. Сельскохозяйственные почвы особенно уязвимы, поскольку от 30 до 50 % применяемых пестицидов могут не достигать своей цели и оседать в почве [24].

Недавние исследования показали, что почвы часто загрязнены множеством остатков пестицидов, особенно в поверхностных слоях [22, с. 361; 26, с. 1532; 23, с. 2919;]. Эти остатки встречаются даже в почвах, где синтетические пестициды не применяются. Так, после 20 лет органического земледелия было обнаружено до 16 различных остатков пестицидов [23, с. 2919]. Это свидетельствует о длительном загрязнении почв и потенциальной угрозе для почвенной экосистемы и окружающей среды.

Оказалось, что микробиомные спектры почвы непосредственно связаны с остатками пестицидов на пахотных, орошаемых почвах, оказывающие негативное влияние прежде всего на микробное сообщества почвы [11, с. 43]. Авторами был проведен анализ остатков более 48 широко используемых пестицидов пестицидов и их влияние на микробиому почвы в 60 образцах почвы, содержание которых зависела численностью 113 бактерий 130 грибов, которые относились к таксонам известных деструкторов пестицидов. Разнообразие и численность грибов были напрямую связаны с остатками пестицидов, разнообразием бактерий и численности гена *nifH*, необходимого для биологической фиксации азота, что были отрицательно связаны с концентрацией отдельных остатков пестицидов. Остатки пестицидов изменяли почвенный микробиом, оказывая пролонгированное действия на здоровье и экологии почвенных сообществ [19].

В работе L.A. Belovezhets и др. были исследованы два гербицида, относящиеся к различным классам химических соединений – имазамокс и

хлорсульфурон. Скрининг перспективных микроорганизмов проводился среди различных штаммов бактерий и грибов в жидкой минеральной среде, содержащей пестицид в качестве единственного источника углерода. Установлено, что наиболее активные микроорганизмы способны утилизировать до 90% действующего вещества за короткий промежуток времени. Динамика деградации пестицидов показала, что максимальное разрушение исследуемых соединений происходило в течение первых двух недель культивирования. В дальнейшем скорость разложения резко снижалась или полностью прекращалась. Повышение концентрации пестицидов в питательной среде почти полностью подавляло их деградацию. Примечательно, что бактерии проявили большую эффективность в разложении имазамокса, тогда как грибы обеспечивали более активное разрушение хлорсульфурона [17, с. 15]

Пестициды, особенно широко используемые на практике инсектициды и фунгициды, помимо почвы, являются основными загрязнителями сточных вод из интенсивно используемых сельскохозяйственных земель, также и теплицы. Из-за их регулярного использования и стойкости некоторые пестициды могут накапливаться в почве и/или стекать в соседние водоемы, сточные воды будут выпущены в окружающую среду. Был проведен скрининг пестицидов с несколькими анализами вместе с дробовым метагеномным секвенированием для оценки таксономических профилей микробных сообществ и реакций метаболических путей. В образцах почвы были идентифицированы два инсектицида (имидаклоприд и фипронил) и девять фунгицидов, с общим снижением большинства пестицидов по мере увеличения расстояния от теплиц [18].

В исследованиях М. Swaine и др. пестициды, несмотря на их ключевую роль в области защиты растений, характеризуются как «Краеугольный камень», оказывающий значительное нецелевое воздействие не только на здоровье почвы, но и целый ряд живых организмов, что ещё важнее, на почвенную микробиоту, играющий ключевую роль в функционировании экосистемы в целом. Авторы рассматривают влияние пестицидов на параметры здоровья почвы с выявлением ключевых биоиндикаторов для анализа оценки экологического риска. Показано, что обилие гена *amo-A* у архей, окисляющих аммиак и бактерий является стабильным индикатором воздействия пестицидов, при этом ингибирование обусловлено гербицидами и фунгицидами. Присутствие аммиакоокисляющих микроорганизмов (АОМ) в качестве индикаторов токсичности пестицидов для почвенной микробиоты могут стать движущей силой химических инноваций в рам-

ках «безопасного и устойчивого по своей сути» подхода, что новые пестициды соединения должны служить для устойчивого развития сельского хозяйства и обеспечивать сохранение здоровья почвы [21].

Согласно, современной тенденцией развития сельского хозяйства является его экологизация за счёт использования микроорганизмов, особенно бактерий, обладающих комплексом полезных свойств (деградирующей, антагонистической активностями, ферментопродукцией и др.). Важным критерием отбора микроорганизмов для включения в состав биопрепаратов является их безопасность. Для исследования безопасности природных штаммов *Bacillus* spp., обладающих ценными биотехнологическими свойствами использованы 10 штаммов бацилл. Изучена способность штаммов продуцировать ферменты микробиологическими методами (гемолитическая, фосфатазная, лецитиназная и рибонуклеазная активность). Оказалось, что все исследованные штаммы *Bacillus* spp. проявили как минимум одну ферментативную активность (РНКазу). Для видов *B. pumilus*, *B. toyonensis* и штамма *B. licheniformis* 6 были выявлены 3 из 4 положительных ферментативных тестов (за исключением лецитиназы) [8, с. 188].

В связи с вышеизложенным нами было проведено исследование микробиома почвы на территории полигона по захоронению ядохимикатов в Джизакской области. Следует отметить, что «Специальный полигон для захоронения ядохимикатов и других токсичных веществ», принадлежащий АО «Джизакская агрохимическая защита», расположен в 5 км от жилого массива «Эгизбулок» Форишского района Джизакской области и переданный во владения ООО «Jizzax Cemical Grave» Форишского района.

На сегодняшний день площадь полигона с координатами 40°20'41.411" N, 67°32'56.411" E составляет 12,7 га (рис. 1). Образцы почвы были взяты весной (апрель) 2025 г в соответствии с методиками общей микробиологии и почвоведения.

Изначально, полигон был введён в эксплуатацию в 1987 году на площади 5 га по решению Кабинета Министров Республики Узбекистан. Впоследствии, его территория была расширена. Особую экологическую опасность представляет количество захороненных химикатов различного класса, так как по состоянию на 2013 год было захоронено 22 975 151 тонны ядохимикатов. К сожалению, захоронение продолжается и в настоящее время, поскольку сюда свозят отходы со всех регионов Республики. Следовательно, пестициды, тары, реагенты особо опасного класса, а также захороненные ямы представляют серьёзную угрозу для окружающей среды и здоровья населения ближайших территорий.



Место сбора образцов	Географические координаты
Южная часть	40°20'35.3" N, 67°32'50.0" E
Восточная часть	40°20'36.7" N, 67°32'59.7" E
Северная часть	40°20'46.6" N, 67°33'02.7" E
Западная часть	40°20'44.5" N, 67°32'52.4" E
Центр полигона	40°20'37.8" N, 67°32'54.8" E
2 км от села «Эгизбулок»	40°19'53.3" N, 67°31'35.5" E

Рис. 1. Геолокация и общий вид полигона захоронения ядовитых веществ.

Fig. 1. Geolocation and general view of the toxic waste disposal site.

В связи с этим нами был проведён мониторинг состояния почвы как на территории полигона, так и в его окрестностях, включая близлежащие участки в направлении села Эгизбулок. Были отобраны почвенные образцы в районе центрального бункера полигона, а также по периметру (на расстоянии 50 м с южной, восточной, северной и западной сторон) и на расстоянии 2 км от населенного пункта Эгизбулок. Отбор проводился в соответствии с утверждёнными параметрами и методиками микробиологического и почвенного анализа.

Материалы и методы

В лабораторных условиях из всех 5-ти образцов почвы были приготовлены болтушки, в соотношениях: 10 г/100 мл стерильной водой и оставили на 24 часа при комнатной температуре (30°C). Исследовали физические свойства почвы: сыпучесть, однородность, растворимость, скорость осаж-

дения, цвет (табл.1). Контролем служила почва под садовыми деревьями на территории Института Микробиологии (Ташкент).

Посев образцов почвенной взвеси производили на элективные питательные среды для выявления каждого класса микроорганизмов с разведением в 10 раз (10^1) и с разведением 10^7 в питательные среды «Нутриент агар, (NA - 10^7 и а Чапека (CZ) при разведении 10^4 и среды Сабуро и поместили в термостат (30°C). Через каждые 12 часов наблюдали за появлением роста колоний микроорганизмов с определением их количества, морфологии и цвета (табл. 1).

Определение активности ферментов. В работе определяли активность каталазы, пероксидазы, полифенолоксидазы и инвертазы. При этом учитывали, что каталаза участвует при разложении пероксида водорода до молекулярного кислорода и воды, а также при обезвреживании токсичной для организмов перекиси водорода. Пероксидаза (ПО) участвует в окислении органических веществ почвы за счет кислорода перекиси водорода и в процессах гумификации. Полифенолоксидаза (ПФО) катализирует окисление фенолов (моно-, ди-, три-) до хинонов в присутствии кислорода воздуха. Хиноны в соответствующих условиях при конденсации с аминокислотами и пептидами образуют первичные молекулы гуминовой кислоты [10]. Каталазная активность определялась газометрическим методом [1, с. 41], инвертазная, полифенолоксидазная, пероксидазная – колориметрическим методом [9, с. 40; 14; 15].

Методы агрохимических анализов почв. Агрохимические анализы почв проводили по общепринятым в агрохимии методам [12].

Определение pH почвы. Значение pH измеряли в водной суспензии с соотношением почва: вода 1:5 [6].

Содержание гумуса. Содержание гумуса в почве определяли по методу И.В. Тюрина [4].

Обменный кальций и магний. Количество обменного кальция и магния в почвах определяли по ГОСТ 26487-85.

Доступный фосфор. Доступный для питания растений фосфор определяли методом колориметрирования 1%-ой углеаммонийной вытяжки. В карбонатных почвах региона фосфор в основном находится в виде соединений кальция и магния, которые легко извлекаются слабой кислотой [3].

Калий. Количество доступных форм калия определяли в той же вытяжке с использованием пламенного фотометра [3].

Засоление почвы. Степень засоления почвы определяли в лабораторных условиях, используя метод анализа водной вытяжки. Метод основан

на содержании водно-экстрагируемых солей в почве (TSS). Катионы и анионы определялись с помощью гравиметрического метода [7].

Результаты и обсуждение

Микробиологический анализ почвенных образцов, проведённый на различных элективных питательных средах при степени разведения 10^5 и 72-часовой инкубации, позволил количественно охарактеризовать основные группы микроорганизмов – бактерии, грибы и актиномицеты – в зависимости от зоны отбора и физического состояния почвы (рис. 2).

Результаты показали, что максимальные значения численности микробных сообществ зарегистрированы в контрольной пробе, отобранной на территории Института микробиологии АН РУз. Общая численность составила 4905×10^5 КОЕ/г, включая бактерии (3039×10^5), грибы (987×10^5) и актиномицеты (879×10^5), что свидетельствует о высокой биологической активности и сбалансированном состоянии почвенной экосистемы. Этот образец отличался благоприятными физическими свойствами: рыхлая структура, хорошая осаждаемость, отсутствие мутности (табл.-1).

На фоне контрольного образца все исследованные почвы полигона характеризуются резким снижением микробной численности и разнообразия, что свидетельствует о значительном техногенном воздействии. В частности, в центральной части полигона была зафиксирована минимальная суммарная численность микроорганизмов – 25×10^5 КОЕ/г, что коррелирует с крайне неблагоприятными физико-химическими параметрами: плотная, мутная, плохо осаждающаяся почва.

Почва восточной части полигона демонстрировала наивысшие значения микробиологической численности (118×10^5 КОЕ/г), среди всех загрязнённых участков. При этом были обнаружены все три таксономические группы микроорганизмов в различных количествах (бактерии – 113×10^5 , грибы – 2×10^5 , актиномицеты – 3×10^5). Однако, физическое состояние этой почвы (тяжёлая, мутная, плотная) также свидетельствует о нарушении почвенной структуры.

Почвы западной и северной части характеризовались сравнительно низкой численностью бактерий (36×10^5 и 43×10^5 КОЕ/г соответственно), при этом в западном участке наблюдалось явление осмотического дисбаланса, сопровождающееся плотной и плохо осаждающейся консистенцией.

Почвенный образец, отобранный на расстоянии 2 км от ближайшего населённого пункта к полигону, продемонстрировал несколько лучшие физические характеристики (быстрое осаждение, дисперсная масса), одна-

ко микробиологические показатели также были низкими, а именно число бактерий составила (40×10^5 КОЕ/г), актиномицетов -1, а грибы вовсе не были обнаружены в периодах времени наблюдения, что указывает на возможное длительное влияние загрязнений за пределами самого полигона.

Таблица 1.

Численность микроорганизмов ($\times 10^5$ КОЕ/г почвы) и физико-химические свойства почвенных образцов, отобранных с различных участков полигона хранения токсичных веществ (Джизакская область)

Table 1. Microorganism counts ($\times 10^5$ CFU/g of soil) and physicochemical properties of soil samples collected from various sites at a toxic waste disposal site (Jizzakh Region)

Место отбора образцов почвы	72 –часов роста, $\times 10^5$				Физическая свойства почвенных образцов
	Бактерии	Грибы	Актиномицеты	Всего	
Северная часть	41	2	2	43	Быстрое оседание, тяжелая
Западная часть	34	2	1	36	Осмотическая явление, тяжело осаждаются, плотная
Южная часть	92	1	2	93	Тяжелая почва, мутная, плотная
Восточная часть	112	2	3	114	Тяжелая почва, мутная, плотная
Центр полигона	23	2	3	25	Тяжелая почва, плотная, плохо осаждаются, мутная
2 км от населённого пункта	40	0	1	40	Быстро осаждаются-дисперсионная масса, тяжелая
Контрольная почва (ИМБ АН РУЗ)	3039	987	879	4905	Хорошая осаждаемость, рыхлая почва, не мутная

Таким образом, было установлена прямая взаимосвязь между численностью почвенной микробиоты и физико-химическим состоянием почвы. Чем хуже осаждаемость, выше плотность и мутность почвы – тем ниже показатели микробиологической активности. Полученные данные однозначно свидетельствуют о значительном техногенном нарушении почвенного биоценоза на территории полигона и подчёркивают необходимость проведения мероприятий по биологической ремедиации, направленных на восстановление как микробного разнообразия, так и физико химических свойств почв.

Ферментативная активность почвенных образцов, представленная по показателям активности каталазы, полифенолоксидазы (ПФО), пероксидазы (ПО) и инвертазы, демонстрирует существенное снижение в образцах, отобранных с загрязнённых участков полигона по сравнению с контрольной почвой (рис. 3).

Контрольный образец, характеризующийся отсутствием антропогенного воздействия, показал высокие значения активности изучаемых почвенных ферментов (каталаза – $8,0 \text{ мл } \text{O}_2/\text{г почв.}/\text{ч}$, ПО – $7,5 \text{ мг хинонд.}/20 \text{ г почв.}/4 \text{ ч}$, ПФО – $6,8 \text{ мг бензох.}/20 \text{ г почв.}/4 \text{ ч}$, инвертаза – $6,9 \text{ мг глюкоз.}/\text{г почв.}/\text{ч}$). Эти показатели отражают высокую биологическую активность и сбалансированное состояние микробной ферментативной системы почвы.

На территории полигона отмечено многократное снижение активности всех исследуемых ферментов:

Каталаза, как индикатор общей метаболической активности и аэробного микробного дыхания, разлагая перекись водорода, образуемой глюкоза оксидазой, демонстрирует наиболее резкое снижение – от 2,2 до 4,0 мл $\text{O}_2/\text{г почв.}$ за час. Минимальные значения зарегистрированы в восточной (2,2 мл $\text{O}_2/\text{г почв.}$) и западной (2,6 мл $\text{O}_2/\text{г почв.}$) частях полигона, что указывает на подавление микробной активности и возможное накопление токсикантов, ингибирующих оксидазные реакции.

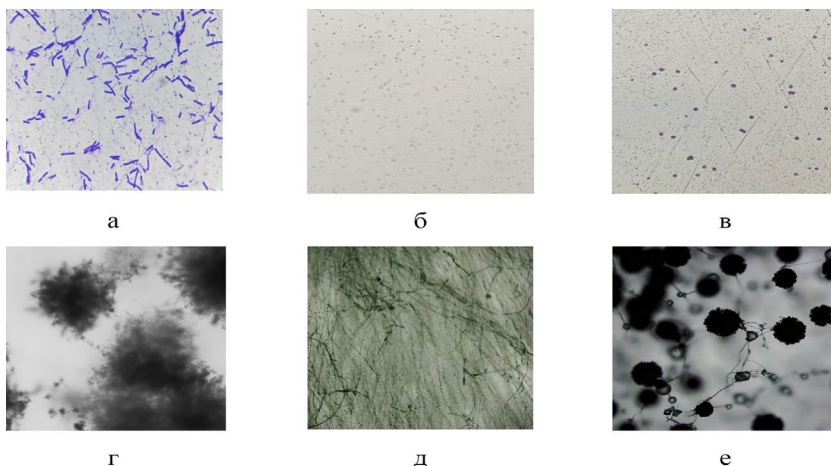


Рис. 2. Микрофотографии выделенных штаммов из исследуемых образцов почвы: а – *Bacillus*; б – кокки; в – дрожжи (*Faex*); г – *Actinomycetota*; д – макромицеты; е – микромицеты (увеличение $100 \times 13,5$)

Fig. 2. Microphotographs of strains isolated from the soil samples under study: а – *Bacillus*; б – cocci; в – yeast (*Faex*); д – *Actinomycetota*; е – macromycetes; ф – micromycetes (magnification 100×13.5)

Пероксидазная активность (ПО), важная в процессе деградации ароматических соединений, также резко снижена: с 7,5 мг/20 г (контроль) до значений 2,8–3,35 мг/20 г. Наибольшее угнетение зафиксировано в центре полигона (2,8) и в северной части (3,1).

Полифенолоксидаза (ПФО), играющая ключевую роль в трансформации фенольных загрязнителей, демонстрирует аналогичное угнетение – от 2,4 до 4,3 мг бензох/20 г почвы/4 ч по сравнению с контрольным вариантом 6,8 ПФО – 6,8 мг бензох/20 г почвы/4ч. Особенно низкие значения отмечены в центре полигона (2,4 ПФО – 6,8 мг бензох/20 г почвы/4ч) и на севере (3,0 ПФО – 6,8 мг бензох/20 г почвы/4ч), что может свидетельствовать о нарушении метаболизма ароматических соединений фенольной природы почвенной микробиоты.

Инвертазная активность, отвечающая за разложение углеводов (сахаров), оказалась также существенно сниженной. В частности, в северной части полигона зафиксировано минимальное значение – 1,8 мг глюкоз/г почвы/ч, в то время как в контроле она составляла 6,9 глюкоз/г почвы/ч. Это свидетельствует о резком снижении углеводного обмена в почве и, вероятно, о дефиците количества активных сапротрофов.

Интересно, что в образце, отобранном в 2,0 км от полигона, наблюдается частичное восстановление ферментативной активности (например, ПФО – 4,3 бензох/20 г почвы/4ч; инвертаза – 4,1 глюкоз/г почвы/ч), однако показатели остаются значительно ниже контрольных, что может свидетельствовать о переносе загрязняющих веществ в прилегающие территории.

Таким образом, полученные данные подтверждают, что активность почвенных микроорганизмов и ферментов может служить чувствительным биоиндикатором экологического состояния почв могильника ядовитых веществ Форишского района Джизакской области. Выявленные изменения указывают на выраженное техногенное угнетение ферментативной системы микробного сообщества полигона. Это подчёркивает актуальность проведения мероприятий по биологической биоремедиации, включая восстановление численности микробного сообщества и ферментативного потенциала, как важного показателя устойчивости почвенных экосистем.

Проведённый агрохимический анализ исследуемых почв, отобранных с различных участков полигона и прилегающих территорий на расстоянии 2,0 км, выявил значительную пространственную неоднородность по содержанию гумуса, валовых форм элементов питания (азот, фосфор, калий) и соотношению углерода к азоту (C/N), отражающему степень минерализации органического вещества и обогащённости почвы азотом.

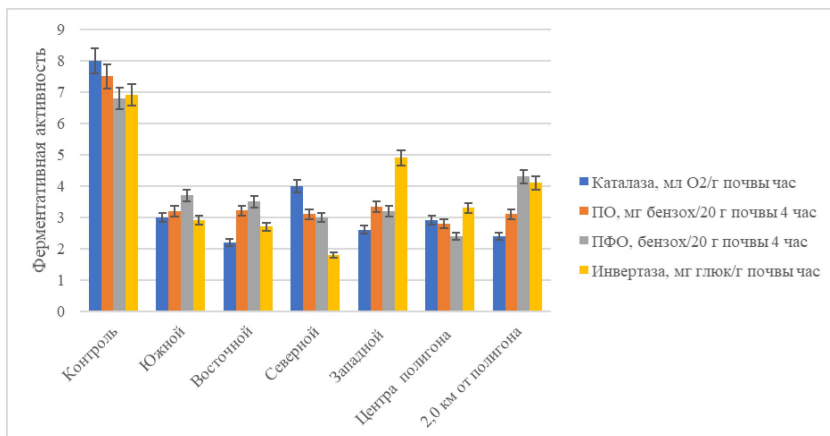


Рис. 3. Ферментативная активность почвенных образцов, отобранных с различных участков полигона хранения токсичных веществ (Джизакская область)

Fig. 3. Enzymatic activity of soil samples collected from various areas of a toxic waste storage site (Jizzakh Region)

Наибольшее содержание гумуса выявлено в **южной** (3,048%) и **западной** (1,977%) частях полигона, что позволяет отнести эти почвы к категории *очень богатых* по органическому веществу. Высокое содержание углерода гумуса (1,772% и 1,149% соответственно) свидетельствует о достаточном накоплении органических остатков, что потенциально может поддерживать их биологическую активность. Тем не менее, **калийное обеспечение в этих участках оценивается как низкое**, особенно в западной части (0,84% – *очень бедная обеспеченность*), что может быть связано с вымыванием калия или его фиксацией в недоступной форме (табл. 2).

Образец почвы из **центра полигона** демонстрирует достаточно высокое содержание гумуса (1,751%) и углерода (1,018%), однако обеспеченность фосфором и калием находится лишь на среднем и низком уровнях, соответственно. Это может свидетельствовать о нарушении круговорота питательных веществ на фоне остаточной органической насыщенности и, возможным влиянием ядовитых веществ.

Наименее плодородные почвы зафиксированы в **восточной** (гумус – 0,844%) и **северной** (гумус – 0,638%) частях полигона. Данные почвы относятся к категории *бедных* по всем ключевым элементам питания – азоту, фосфору и особенно калию. При этом, несмотря на низкие абсолютные показатели, отношение C/N в этих обеих зонах составляет 7,9, что указы-

вает на сравнительно высокую обогащённость азотом в отношении гумусного углерода, возможно за счёт снижения микробной активности и замедления гумусового цикла.

Образец, отобранный в 2 км от полигона, имеет *средний* уровень содержания гумуса (0,949%) и углерода (0,552%), однако оказался бедным по азоту (0,068%) и фосфору (0,138%). При этом калийное содержание остаётся очень низким (1,02%) – несмотря на удалённость от источника загрязнения, это может свидетельствовать о длительном распространении последствий загрязнения на прилегающие территории, а также об истощении почвы.

Таблица 2.

**Агрохимические свойства почвенных образцов полигона ядохимикатов,
Джизакская область**

Table 2. Agrochemical Properties of Soil Samples from the Pesticide Dumping Site, Jizzakh Region

№ п/п	Место отбора образцов почвы, часть*	Гу- мус, %	Оцен- ка обе- спеченно- сти	Угле- род гуму- са, % (Сг, %)	Содержание валовых форм					C/N	Обога- щен- ность азо- том, C/N	
					Азо- та, %	Оцен- ка обе- спеченно- сти	Фос- фора, %	Очень бога- тые	Ка- лия, %			Оценка обеспе- ченно- сти
1	Южной	3,048	Очень богаты	1,772	0,186	Очень богаты	0,271	Очень богаты	1,71	Бедные	9,5	Сред- няя
2	Восточ- ной	0,844	Бед- ные	0,491	0,062	Бед- ные	0,142	Бедные	0,78	Очень бедные	7,9	Высо- кая
3	Север- ной	0,638	Бед- ные	0,371	0,047	Бед- ные	0,194	Сред- ние	0,90	Очень бедные	7,9	Высо- кая
4	Западной	1,977	Очень богаты	1,149	0,122	Сред- ние	0,176	Сред- ние	0,84	Очень бедные	9,4	Сред- няя
5	Центра полигона	1,751	Бога- тые	1,018	0,116	Сред- ние	0,170	Сред- ние	0,72	Очень бедные	8,8	Сред- няя
6	2,0 км от полигона	0,949	Сред- ние	0,552	0,068	Бед- ные	0,138	Бедные	1,02	Очень бедные	8,1	Сред- няя

Отношение C/N в диапазоне 7,9–9,5 по всем участкам соответствует значениям, характерным для минеральных почв с органической составляющей, при этом наиболее отмечены в южной, западной и центральной частях (C/N – около 9,0), что подтверждает их относительное преимущество по биогенному потенциалу.

Таким образом, в совокупности проведенных экспериментов и полученных данных было установлено, что южная и западная части полигона

демонстрируют наилучшие агрохимические параметры, особенно по содержанию гумуса и азота, однако требуют компенсации калийного дефицита. Почва центральной зоны характеризуется сохранённым органическим потенциалом, но оказался ограниченным минеральным питанием. Северная и восточная части полигона подверглись наибольшей деградации, отличающиеся бедностью по всем основным элементам, указывающей на техногенное истощение. Участок за пределами полигона в расстоянии 2,0 км также проявляет признаки снижения плодородия, что может быть связано с миграцией загрязняющих веществ со стороны полигона в течение долгих лет.

В совокупности, можно заключить, что полученные результаты подчёркивают необходимость проведения целенаправленных мероприятий по агрохимической коррекции почв на территории и в окрестностях полигона, в том числе внесения органических удобрений, биопрепаратов микробного происхождения, калийных соединений, особенно в зонах с нарушенным микобиотой и минеральным балансом.

Таблица 3.

**Агрохимические показатели почвенных образцов полигона
ядохимикатов Джизакской области**

Table 3. Agrochemical parameters of soil samples from the toxic chemicals disposal site in the Jizzakh Region

№	Место отбора образцов почвы, часть*	Содержание элементов и степени обеспеченности					
		Нитрат N-NO ₃	Оценка обеспеченности	P ₂ O ₅	Оценка обеспеченности	K ₂ O	Оценка обеспеченности
		мг/кг		мг/кг		мг/кг	
1	Южной	69,7	Высокая	33,0	Средняя	409,4	Очень высокая
2	Восточной	22,9	Низкая	34,0	Средняя	252,8	Средняя
3	Северной	28,8	Низкая	27,0	Низкая	325,1	Высокая
4	Западной	26,3	Низкая	26,0	Низкая	349,2	Высокая
5	Центра полигона	25,1	Низкая	32,0	Средняя	301,0	Высокая
6	2,0 км от полигона	42,0	Нормальная	18,0	Низкая	397,3	Высокая

Результаты агрохимического анализа показали существенные различия в содержании подвижных форм основных макроэлементов – азота, фосфора и калия – между различными участками обследуемой территории, что свидетельствует о разной степени техногенного влияния и агроэкологического состояния почв (табл. 2).

Содержание нитратного азота в почвах варьировало от 22,9 до 69,7 мг/кг, что указывает на значительную дифференциацию азотного режима:

Высокий уровень обеспеченности зафиксирован в южной части полигона (69,7 мг/кг), что может быть связано с повышенной микробной активностью или остаточным влиянием органических загрязнителей, способствующих минерализации азотсодержащих соединений.

Низкая обеспеченность наблюдается в большинстве зон полигона – восточной, северной, западной и центральной, где содержание нитратов не превышает 30 мг/кг. Это свидетельствует о слабой активности почвенной микробиоты и нарушении азотного цикла.

Участок на расстоянии 2 км от полигона демонстрирует нормальный уровень обеспеченности $N-NO_3$ (42,0 мг/кг), что может свидетельствовать о частичном восстановлении азотного баланса вне зоны прямого техногенного воздействия.

Содержание подвижного фосфора (P_2O_5) в образцах почв варьирует от 18,0 до 34,0 мг/кг: средний уровень обеспеченности P_2O_5 наблюдается в южной, восточной и центральной частях полигона (32,0–34,0 мг/кг), что, вероятно, отражает остаточное присутствие доступных фосфорсодержащих соединений.

Низкий уровень фосфора зафиксирован в северной и западной частях, а также на удалённом участке (18,0 мг/кг), что может быть следствием низкой микробиологической активности и слабой фосфатмобилизующей способности почв.

Содержание подвижного калия (K_2O) колеблется в диапазоне 252,8–409,4 мг/кг, что отражает, в целом, благоприятное калийное обеспечение:

Очень высокая обеспеченность K_2O характерна для южной части (409,4 мг/кг), а также участка в 2 км от полигона (397,3 мг/кг), что может быть связано как с природной калийной насыщенностью почвообразующих пород, так и с остаточным техногенным калийным фоном.

В остальных точках (восточная, северная, западная, центральная части) содержание калия также находится на уровне высокой и средней обеспеченности, что даёт определённые основания для сохранения калийного потенциала в этих почвах, несмотря на их общую деградацию.

Агрохимический анализ показывает, что южная часть полигона обладает наилучшим уровнем обеспеченности основными тремя макроэлементами (азот, фосфор, калий), что делает её потенциально пригодной для биорекультивации с минимальными затратами на агрохимическую коррекцию.

Почвы северной, западной и центральной зоны характеризуются недостаточным содержанием азота и фосфора при умеренном и/или высоком содержании калия, что указывает на необходимость внесения азотных и фосфорных удобрений при проведении рекультивационных мероприятий и процессов биоремедиации.

Отдалённый участок (2 км от полигона) демонстрирует тенденцию к восстановлению, однако низкий уровень подвижного фосфора остаётся ограничивающим фактором.

Таким образом, содержание подвижных форм элементов питания чётко отражает степень техногенной трансформации почв и может служить индикатором для разработки зонально-ориентированных стратегий биоремедиации загрязнённых территорий.

Заключение

Микробиологический анализ почвенных образцов, проведённый на различных элективных питательных средах при степени разведения 10^5 и 72-часовой инкубации, позволил количественно охарактеризовать основные таксономические группы микроорганизмов – бактерии, грибы и актиномицеты – в зависимости от зоны отбора и физического состояния почвы (рис. 2).

Результаты показали, что максимальные значения численности микробных сообществ зарегистрированы в контрольной пробе, отобранной на территории Института микробиологии АН РУз (г.Ташкент), в которой общая численность составила 4905×10^5 КОЕ/г, включая бактерии (3039×10^5), грибы (987×10^5) и актиномицеты (879×10^5), что свидетельствует о высокой биологической активности и сбалансированном состоянии почвенной экосистемы. Данный образец отличался также благоприятными физическими свойствами: рыхлая структура, хорошая осаждаемость, отсутствие мутности (табл. 1).

На фоне контрольного образца все исследованные почвы полигона характеризуются резким снижением микробной численности и разнообразия, что свидетельствует о значительном техногенном воздействии окружающей среды. Минимальная суммарная численность микроорганизмов – 25×10^5 КОЕ/г – зафиксирована в центральной части полигона и сопровождается крайне неблагоприятными физико-химическими параметрами почвы.

Анализ ферментативной активности почв показал, что наиболее высокие активности всех изученных ферментов (каталаза, ПФО, ПО, инвертаза) наблюдаются в контрольном образце. В загрязнённых зонах каталаза варьирует от 2,2 до 4,0 мл O_2 /г·ч, инвертаза от 1,8 до 4,9 мг глюкоз/г·ч, что

свидетельствует о подавлении роста микробного сообщества, активности и снижении метаболического потенциала почвенного биоценоза.

Агрохимический анализ выявил пространственную неоднородность, проявляющиеся в содержании гумуса, валовых форм элементов питания (азота, фосфора, калия) и подвижных соединений (N-NO_3 , P_2O_5 , K_2O). Южная и западная части полигона показали наилучшие показатели по содержанию гумуса и углерода, но характеризуются бедным калийным обеспечением. Восточная и северная зоны наиболее обеднены по всем питательным элементам.

Содержание нитратного азота в исследуемых почвах колебалось от 22,9 до 69,7 мг/кг, подвижного фосфора – от 18,0 до 34,0 мг/кг, а калия – от 252,8 до 409,4 мг/кг. Высокая обеспеченность всеми элементами зафиксирована в южной части полигона, тогда как восточная и северная части продемонстрировали низкие уровни, что указывает на техногенную деградацию и ухудшение агрохимических характеристик.

Исходя из вышеуказанных экспериментальных данных, можно заключить: контрольный образец характеризуется высоким уровнем микробиологической и ферментативной активности, а также сбалансированными агрохимическими свойствами, что делает его эталоном ненарушенной почвы.

Южная и западная части полигона демонстрируют наилучшие агрохимические параметры, особенно по содержанию гумуса и азота, однако требуют компенсации калийного дефицита.

Центральная зона обладает сохранённым органическим потенциалом, но ограниченным минеральным питанием и низкой микробной активностью.

Северная и восточная части полигона подверглись наибольшей деградации, характеризуясь бедностью по основным элементам питания, низкой ферментативной активностью и ухудшенными физико-химическими свойствами.

Участок, расположенный на расстоянии 2 км от полигона, проявляет признаки частичного восстановления, однако сохраняет дефицит по ряду показателей, особенно по фосфору.

В совокупности, полученные результаты подчёркивают необходимость проведения целенаправленных мероприятий по биологической ремедиации и агрохимической коррекции, включая внесение прежде всего биологических препаратов микробного происхождения, органических и скорректированных количеств минеральных удобрений, особенно калий-содержащих, а также восстановление ферментативного и микробиологического потенциала почв.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках бюджетной тематике Института микробиологии АН РУз по теме «Создание технологии биоремедиации на основе изучения загрязненных почв, микробиоты водоемов, мониторинга очагов поражения и деструктивно активных аборигенных микроорганизмов» и по контракту FL-7923051836 Узбекистан-Белоруссия.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Государственного комитета экологии и охрана окружающей среды Джизакской области и инженеру экологу ООО «Jizzakh cement plant» Ш.М. Бурханову за оказания помощи и предоставление возможности доступа к территории полигона.

Список литературы

1. Галстян, А. Ш. (1983). Итоги изучения биологической активности почв. В *Итоги научно-исследовательских работ по генезису, биохимии, мелиорации, агрохимии и эрозии почв* (с. 41–59). Ереван.
2. ГОСТ 17.5.4.02-84. *Охрана природы. Рекультивация земель. Метод измерения и расчёта суммы токсичных солей во вскрышных и вмещающих породах.*
3. ГОСТ 26205-91. *Методы определения подвижного фосфора и калия по Чирикову и К. Мачигину.*
4. ГОСТ 26213-91. *Почвы. Методы определения органического вещества.*
5. ГОСТ 26487-85. *Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО.*
6. ГОСТ 27753.3-88. *Грунты тепличные. Метод определения pH водной суспензии.*
7. ГОСТ Р 59540-2021. *Грунты. Методы лабораторного определения степени засоленности.*
8. 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/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1186>. EDN: <https://elibrary.ru/DSUPHE>
9. Карагіна, Л. А., & Михайлоўская, Н. А. (1986). Вызначэнне актыўнасці поліфенолаксідазы і пераксідазы у глебе. *Весці Акадэміі навук БССР. Серыя сельскагаспадарчых навук*, (2), 40–41.
10. Ковриго, В. П., Кауричев, И. С., & Бурлакова, Л. М. (2000). *Почвоведение с основами геологии*. Москва: Колос. 416 с. ISBN: 5-10-003135-2. EDN: <https://elibrary.ru/QYVLSJ>

11. Котенко, М. Е., Сорокин, А. Е., Савич, В. И., Подволоцкая, Г. В., & Мохаммади, Ш. (2020). Изменение засоления почв во времени и в пространстве. *Плодородие*, (1), 43–48. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.112.13>. EDN: <https://elibrary.ru/CYZGPH>
12. Академия наук УзССР. (1999). *Методы агрохимических, агрофизических и микробиологических исследований в поливных хлопковых районах*. Ташкент. Лаборатория массовых анализов. (2005). *Методы химических анализов почвы, применяемые в лаборатории массовых анализов*. Ташкент.
13. Михайликова, В. В., & Стребкова, Н. С. (2023). Динамика применения пестицидов в Российской Федерации. *Агрохимия*, (9), 37–41. <https://doi.org/10.31857/S0002188123090089>. EDN: <https://elibrary.ru/VYIKSQ>
14. Хазиев, Ф. Х. (1990). *Методы почвенной энзимологии*. Москва: Наука. 186 с. ISBN: 5-02-003454-1. EDN: <https://elibrary.ru/VYSCSV>
15. Хазиев, Ф. Х., Агафарова, Я. М., & Гулько, А. Е. (1988). Ускоренный колориметрический метод определения инвертазной активности почв. *Почвоведение*, (11), 119–12.
16. Orgiazzi, A., Bardgett, R. D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M. J. I., Chotte, J. L., De Deyn, G. B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N. C., Jones, A., et al. (2016). *Global Soil Biodiversity Atlas*.
17. Belovezhets, L. A., Levchuk, A. A., & Pristavka, E. O. (2023). Prospects for application of microorganisms in bioremediation of soils contaminated with pesticides. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 59(1), 15–20. <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2281197>. EDN: <https://elibrary.ru/VPFGJJ>
18. Ewere, E. E., White, S., Mauleon, R., & Benkendorff, K. (2024). Soil microbial communities and degradation of pesticides in greenhouse effluent through a woodchip bioreactor. *Environmental Pollution*, 359, 124561. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124561>
19. Walder, F., Schmid, M. W., Riedo, J., Valzano-Held, A. Y., Banerjee, S., Büchi, L., Bucheli, T. D., & van der Heijden, M. G. A. (2022). Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 174, 108830. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108830>
20. Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16(5), 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>. EDN: <https://elibrary.ru/VGWXWK>
21. Swaine, M., Bergna, A., Oyserman, B., Vasileiadis, S., Karas, P. A., Screpanti, C., & Karpouzias, D. G. (2025). Impact of pesticides on soil health: Identification of key soil microbial indicators for ecotoxicological assessment strategies through meta-analysis. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(6), fiaf052. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaf052>

22. Hvězdová, M., Kosubová, P., Košíková, M., Scherr, K. E., Šimek, Z., Brodský, L., Šudoma, M., Škulcová, L., Sářka, M., Svobodová, M., Krkošková, L., Vašíčková, J., Neuwirthová, N., Bielská, L., & Hofman, J. (2018). Currently and recently used pesticides in Central European arable soils. *Science of the Total Environment*, 613–614, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.049>
23. Riedo, J., Wettstein, F. E., Rösch, A., Herzog, C., Banerjee, S., Büchi, L., Charles, R., Wächter, D., Martin-Laurent, F., Bucheli, T. D., Walder, F., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Widespread occurrence of pesticides in organically managed agricultural soils – the ghost of a conventional agricultural past? *Environmental Science & Technology*, 55(5), 2919–2928. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405>. EDN: <https://elibrary.ru/POZEMG>
24. Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). *Soil Pollution: A Hidden Reality*. Rome: FAO. 142 p.
25. Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
26. Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils – a hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*, 653, 1532–1545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>. EDN: <https://elibrary.ru/TLGKDA>

References

1. Galstyan, A. Sh. (1983). Results of studying the biological activity of soils. In *Results of research works on the genesis, biochemistry, reclamation, agrochemistry and erosion of soils* (pp. 41–59). Yerevan.
2. GOST 17.5.4.02-84. *Nature protection. Land reclamation. Method for measuring and calculating the amount of toxic salts in overburden and enclosing rocks.*
3. GOST 26205-91. *Methods for determining mobile phosphorus and potassium according to Chirikov and K. Machigin.*
4. GOST 26213-91. *Soils. Methods for determining organic matter.*
5. GOST 26487-85. *Soils. Determination of exchangeable calcium and exchangeable (mobile) magnesium by TsINAO methods.*
6. GOST 27753.3-88. *Greenhouse soils. Method for determining the pH of an aqueous suspension.*
7. GOST R 59540-2021. *Soils. Methods for laboratory determination of the degree of salinity.*
8. Irkitova, A. N., Dudnik, D. E., Malkova, A. V., & Khlopova, K. V. (2025). Assessment of the biosafety of natural *Bacillus* spp. strains with valuable biotechnologi-

- cal properties. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(3), 188–207. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-3-1186>. EDN: <https://elibrary.ru/DSUPHE>
9. Karahina, L. A., & Mikhailouskaya, N. A. (1986). Determination of polyphenol oxidase and peroxidase activity in soil. *Vestsi Akademii navuk BSSR. Seryya sel'skagaspadarchykh navuk*, (2), 40–41.
 10. Kovrigo, V. P., Kaurichev, I. S., & Burlakova, L. M. (2000). *Soil science with the basics of geology*. Moscow: Kolos. 416 p. ISBN: 5-10-003135-2. EDN: <https://elibrary.ru/QYVLSJ>
 11. Kotenko, M. E., Sorokin, A. E., Savich, V. I., Podvolotskaya, G. V., & Mohammadi, Sh. (2020). Changes in soil salinity over time and space. *Plodorodie*, (1), 43–48. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.112.13>. EDN: <https://elibrary.ru/CYZGPH>
 12. Academy of Sciences of the UzSSR. (1999). *Methods of agrochemical, agrophysical and microbiological research in irrigated cotton areas*. Tashkent. Laboratory of Mass Analyses. (2005). *Methods of chemical soil analyses used in the Laboratory of Mass Analyses*. Tashkent.
 13. Mikhailikova, V. V., & Strebkova, N. S. (2023). Dynamics of pesticide use in the Russian Federation. *Agrokhimiya*, (9), 37–41. <https://doi.org/10.31857/S0002188123090089>. EDN: <https://elibrary.ru/VYIKSQ>
 14. Khaziev, F. Kh. (1990). *Methods of soil enzymology*. Moscow: Nauka. 186 p. ISBN: 5-02-003454-1. EDN: <https://elibrary.ru/VYSCSV>
 15. Khaziev, F. Kh., Agafarova, Ya. M., & Gulko, A. E. (1988). Accelerated colorimetric method for determining invertase activity in soils. *Pochvovedenie*, (11), 119–12.
 16. Orgiazzi, A., Bardgett, R. D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M. J. I., Chotte, J. L., De Deyn, G. B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N. C., Jones, A., et al. (2016). *Global Soil Biodiversity Atlas*.
 17. Belovezhets, L. A., Levchuk, A. A., & Pristavka, E. O. (2023). Prospects for application of microorganisms in bioremediation of soils contaminated with pesticides. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 59(1), 15–20. <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2281197>. EDN: <https://elibrary.ru/VPFGJJ>
 18. Ewere, E. E., White, S., Mauleon, R., & Benkendorff, K. (2024). Soil microbial communities and degradation of pesticides in greenhouse effluent through a wood-chip bioreactor. *Environmental Pollution*, 359, 124561. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124561>
 19. Walder, F., Schmid, M. W., Riedo, J., Valzano-Held, A. Y., Banerjee, S., Büchi, L., Bucheli, T. D., & van der Heijden, M. G. A. (2022). Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 174, 108830. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108830>

20. Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16(5), 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>. EDN: <https://elibrary.ru/VGWXWK>
21. Swaine, M., Bergna, A., Oyserman, B., Vasileiadis, S., Karas, P. A., Screpanti, C., & Karpouzas, D. G. (2025). Impact of pesticides on soil health: Identification of key soil microbial indicators for ecotoxicological assessment strategies through meta-analysis. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(6), fiaf052. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaf052>
22. Hvězdová, M., Kosubová, P., Košíková, M., Scherr, K. E., Šimek, Z., Brodský, L., Šudoma, M., Škulcová, L., Sářka, M., Svobodová, M., Krkošková, L., Vašíčková, J., Neuwirthová, N., Bielská, L., & Hofman, J. (2018). Currently and recently used pesticides in Central European arable soils. *Science of the Total Environment*, 613–614, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.049>
23. Riedo, J., Wettstein, F. E., Rösch, A., Herzog, C., Banerjee, S., Büchi, L., Charles, R., Wächter, D., Martin Laurent, F., Bucheli, T. D., Walder, F., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Widespread occurrence of pesticides in organically managed agricultural soils – the ghost of a conventional agricultural past? *Environmental Science & Technology*, 55(5), 2919–2928. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405>. EDN: <https://elibrary.ru/POZEMG>
24. Rodríguez Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). *Soil pollution: A hidden reality*. Rome: FAO. 142 p.
25. Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
26. Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils – a hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*, 653, 1532–1545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>. EDN: <https://elibrary.ru/TLGKDA>

ВКЛАД АВТОРОВ

Ахмедова З.Р.: планирование всех экспериментов, основная идея, обеспечение исходными материалами, реактивами, отбор почвенных образцов, контроль, обсуждение и участия в экспериментах, написание, окончательное редактирование статьи.

Шонахунов Т.Э.: изучение микробиологического состава почв полигона, взятые различных участков, выделение изолятов культур, определение активностей ферментов, статистический анализ результатов, написание раздела статьи результаты,

Ибрагимов А.А.: изучение микробиологического состава почв полигона, интерпретация, агрохимический анализ, статистическая обработка, анализ результатов, оформления раздела статьи обсуждение

Хамраева З.Т.: выделение чистых культур почвенных микроорганизмов, локализованных в участках полигона, участие в проведении агрохимических анализов почв полигона, содержание солей, микропирование, статистический анализ результатов, написание раздела статьи результаты

Яхяева М.А.: изучение ферментативной активности почв полигона, подвижные формы элементов почвы, содержание гумуса, статистический анализ результатов, написание раздела статьи методы исследований.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Zakhro R. Akhmedova: planning of all experiments, main idea, provision of source materials, reagents, collection of soil samples, control, discussion and participation in experiments, writing, final editing of the article.

Tulkin E. Shonakhunov: study of the microbiological composition of the soils of the landfill, taken from different areas, isolation of culture isolates, determination of enzyme activities, statistical analysis of the results, writing the results section of the article,

Abdulaziz A. Ibragimov: study of the microbiological composition of the landfill soils, interpretation, agrochemical analysis, statistical processing, analysis of the results, design of the discussion section of the article

Ziyoda T. Khamraeva: isolation of pure cultures of soil microorganisms localized in the areas of the landfill, participation in conducting agrochemical analyses of the landfill soils, salt content, microcopying, statistical analysis of the results, writing the results section of the article

Munavvar A. Yakhyayeva: study of the enzymatic activity of the landfill soils, mobile forms of soil elements, humus content, statistical analysis of the results, writing the section of the article on research methods.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ахмедова Захро Рахматовна, д.б.н., профессор, академик АН Турон, заведующая лабораторией «Природоохранных биотехнологий»

Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан

ул. А. Кадыри, 7Б, г. Ташкент, Узбекистан

akhmedovazr@mail.ru

Шонахунов Тулкин Эркинович, PhD, старший научный сотрудник лаборатории «Природоохранных биотехнологий»

Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан

ул. А. Кадыри, 7Б, г. Ташкент, Узбекистан
brus_li89@mail.ru

Ибрагимов Абдулазиз Адхамович, базовый докторант

Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан
ул. А. Кадыри, 7Б, г. Ташкент, Узбекистан
a.adkhamovich@gmail.com

Хамраева Зиёда Таштемировна, младший научный сотрудник лаборатории
«Природоохранных биотехнологий»

Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан
ул. А. Кадыри, 7Б, г. Ташкент, Узбекистан
ziyoda.khamraeva@mail.ru

Яхяева Мунаввар Абдукаххаровна, младший научный сотрудник лаборатории
«Природоохранных биотехнологий»

Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан
ул. А. Кадыри, 7Б, г. Ташкент, Узбекистан
yakhyayeva_munavvar@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Zakhro R. Akhmedova, Head of the Laboratory Environmental Biotechnology

Institute of Microbiology Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
7B, A. Kadyri Str., Tashkent, Uzbekistan
akhmedovazr@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7749-2507>

ResearcherID: EJD-2266-2022

Scopus AuthorID: 57222581782

Researcher EJD-2266-2022

Tulkin E. Shonakhunov, Senior Research Fellow of the Laboratory Environmental
Biotechnology

Institute of Microbiology Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
7B, A. Kadyri Str., Tashkent, Uzbekistan
brus_li89@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6527-5316>

ResearcherID: GWJ-1603-2022

Scopus AuthorID: 57836402100

Abdulaziz A. Ibragimov, PhD Student of the Laboratory Environmental Biotechnology
Institute of Microbiology Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
7B, A. Kadyri Str., Tashkent, Uzbekistan
a.adkhamovich@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-3858>

Ziyoda T. Khamraeva, Junior Researcher of the Laboratory Environmental Biotechnology
Institute of Microbiology Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
7B, A. Kadyri Str., Tashkent, Uzbekistan
ziyoda.khamraeva@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0911-6155>
Scopus AuthorID: 57835925300

Munavvar A. Yakhyayeva, Junior Researcher of the Laboratory Environmental Biotechnology
Institute of Microbiology Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
7B, A. Kadyri Str., Tashkent, Uzbekistan
yakhyayeva_munavvar@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2708-7286>

Поступила 08.07.2025

После рецензирования 02.10.2025

Принята 23.10.2025

Received 08.07.2025

Revised 02.10.2025

Accepted 23.10.2025

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

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1441](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1441)EDN: [ALDAXS](#)

UDC 575.174:612.118.221



Determination of ABO group alleles in the Iraqi population

M.K. Almyah¹, A.A. Chmagh¹, A.I.E. Al-laeiby², S.T. Yassen³¹*Southern Technical University, Basrah, Iraq*²*College of Science, Basrah University, Basrah, Iraq*³*AL-Zahra Medical College, University of Basrah, Basrah, Iraq*

Abstract

Background. The classification of blood types is considered one of the most significant pioneers. Four different phenotypes, i.e., A, B, AB, and O, were specified based on whether antigen A and/or B were present on the surface of the erythrocytes.

Purpose. To investigate the frequency of blood groups among healthy individuals using a sequencing method and to compare the findings with the corresponding traditional serological method.

Materials and methods. Thirty blood samples were collected from healthy volunteers who attended Southern Technical University between October 2023 and February 2024. Blood groups were investigated using both serology and genetic testing.

Results. The majority of volunteers carry blood group A, while the minority with group AB is 6.7%. Blood group A has four genotypes, including A¹A¹, A¹O¹, A²O¹, and A¹O², while the BO¹, O¹O¹ and A¹B genotypes represent B, O and AB, respectively. Genetic analysis of sequences showed that the O¹O¹ allele spotted the homozygous deletion of n261 in exon 6, corresponding to the O+ phenotype. Additionally, five SNPs, nt703, 796, 803, 1061, and 1096, of exon 7 sequences were analysed to identify single-nucleotide polymorphisms (SNPs) of ABO alleles.

Conclusion. Investigating blood group using a sequence is clinically important for improving patient safety. It supplies supportive information regarding antigen differences.

Keywords: ABO gene; blood group system; gene polymorphisms

For citation. Almyah, M. K., Chmagh, A. A., Al-laeiby, A. I. E., & Yassen, S. T. (2026). Determination of ABO group alleles in the Iraqi population. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 170–183. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1441>

Introduction

Karl Landsteiner developed a method in 1901 that allows grouping of blood according to its agglutination patterns. Based on the presence or absence of antigen A and/or B on the surface of erythrocytes, four phenotypes were identified: A, B, AB, and O [1]. Consequently, according to the inherited pattern of the antigen on the erythrocyte surface and interaction with specific antibodies, blood groups were defined. Blood groups were exploited as markers in transfusions and transplantations. Improper blood group transfer not only resulted in the development of blood agglutination but also death. Moreover, it was demonstrated that the impact of blood groups is associated with miscarriage, failure in transplantation, and death. Later, studies investigated the blood group in terms of carbohydrate structure and biosynthesis. In this sense, molecular biology and gene analysis methods were implemented to find out the association of gene polymorphisms with blood group alloantigenicity [1-3].

The term *blood group genotype* denotes the prediction of blood group phenotypes based on the analysis of specific nucleotide sequences in DNA. Red blood cell surface carbohydrate antigens A and B are produced by the enzyme transferase, which is encoded by the ABO gene. The *ABO* was identified on chromosome 9, which contains seven exons. The majority of proteins (77%) are encoded from exons 6 and 7. Two alleles, A and B, were characterized, and they showed variation in four amino acids. The identification of new *ABO* alleles, such as *A1*, *A2*, *A3*, *Ael*, *Aint*, *Am*, *Aw*, *Ax*, *cis-AB*, *B(A)*, *B*, *B3*, *Bel*, *Bw*, *Bx*, and *O*, was facilitated [3]. Blood groups have been shown to be associated with disease susceptibility, such that individuals with the O⁻ blood group show higher susceptibility to diseases than individuals with blood group O [4]. On the other hand, a previous study suggested an association between the hypertension condition and ABO¹ (G>T)(rs495828) genetic polymorphism [5].

The current study aims to investigate the ABO genotype among young people in the Basrah population. Moreover, our genotype data has been registered in the public database. Many previous studies were carried out using different methods, such as PCR-RFLP analysis, multiplex-PCR, two-dimensional PCR, and sequencing analysis [6-9].

Materials and methods

Samples collection

Thirty peripheral blood samples were collected from healthy student volunteers who attended Southern Technical University between October 2023 and February 2024. After an explanation of the aims of the study, consents were obtained from all

volunteers. All formal agreements were obtained from the scientific committee of the Department of Medical Laboratory Techniques, Southern Technical University. Blood samples were stored in the Department of Medical Laboratory Techniques at Southern Technical University at 4 C° for further analysis.

Molecular genetic analysis

Genomic DNA (GDNA) was isolated following the instructions provided by the kit manufacturer, obtained from Geneaid/Taiwan. GDNA products were separated onto 0.8% agarose gels stained with ethidium bromide, and their quantity and quality were measured using a nanodrop spectrophotometer. Targeted DNA (exon 6 and 7) was amplified following the protocol described by Martin and Detzel [10]. The successful PCR was detected after separation on a 1% agarose gel stained with ethidium bromide. The successful PCR products were then sent for sequencing, and the resulting sequences were analysed using Codon Code Aligner v. 7.1.2 software to identify the position of SNPs.

Results

The participants' age ranged from 19 to 39 y.o., with a mean age of 23 y.o. All the donors were healthy individuals with no medical issues, except for two participants, one with insulin resistance and the other with iron deficiency anaemia (IDA). All the participants were interrogated to obtain previous information and all the agreements were obtained from the donors after explaining the aim of the study. Additionally, formal agreements were secured from the University to achieve the current work.



Fig. 1. Agarose gel electrophoresis of the ABO gene. The PCR products were separated on a 0.8% agarose gel stained with ethidium bromide. Amplified PCR sizes were 837 bp and 696 bp for exon 7 and exon 6, respectively. Lane 1,3 are PCR products of exon 7, while Lane 6 and 7 show PCR products of exon 6. Lane 2 represents the control; Lane M is the ladder.

Exons 6 and 7 of the *ABO* gene were amplified using oligonucleotide primer pairs. The PCR products were separated on a 1% agarose gel stained with ethidium bromide and then sent for sequencing. The size of the PCR product was 837 bp and 696 bp for exon 7 and exon 6, respectively (Fig. 1). Table 1 shows the frequency of blood groups among participants. The majority of individuals carry the A+ blood group phenotype with different genotypes, including 2 (6.66%) A¹A¹, 5 (16.7%) A¹O¹, and 1 (3.3%) A¹O². Also, 2 (6.66%) of the individuals with A- carry the A¹O¹ allele. Data showed that the maximum frequency of the allele was 10 (33.33%) among individuals with the O⁺ phenotype. The frequency of BO¹ allele was 7 (23%) in the individuals who showed B⁺ and B⁻ phenotypes 2 (6.7%).

Table 1.

Frequency of genotype and phenotype of blood group in the participants

Blood group	Genotype	Frequency (%)	Phenotype	Total (%)
A+	A ¹ A ¹	2(6.66)	10(90.9)	11(36.7)
	A ¹ O ¹	5(16.66)		
	A ² O ¹	2(6.66)		
	A ¹ O ²	1(3.33)		
A-	A ¹ O ¹	1(3.33)	1(9.1)	7(23.33)
B+	BO ¹	6(20)	6(85.7)	
B-	BO ¹	1(3.33)	1(14.3)	
O+	O ¹ O ¹	10(33.33)	10(33.33)	
AB+	A ¹ B	2(6.66)	2(6.67)	
Total		30(100)		

The serological analysis method was used to identify blood groups. As shown in Table 1, the majority of the participants were in the A group; among them, 90.9% were A⁺, and one individual was A⁻. In the B group, similarly, 85.7% were B⁺, and 14.3% were B⁻. Then, 10 out of 30 samples were O⁺, and only 2 samples were AB⁺.

The amplified PCR products were sequenced, and homology was compared with the counterpart sequences deposited in the public database at the Gene Bank. Sequencing was deposited in the NCBI public database, as shown in Table 2.

Table 2.

List of genotypes identified in this study and their accession numbers in the NCBI

Locus	Genotype	Accession number
Exon 7	A ¹ A ¹	LC800609
Exon 7	A ¹ B	LC800610

Exon 7	BO ¹	LC800611
Exon 7	A ¹ O ¹	LC800612
Exon 7	A ² O ¹	LC800613
Exon 7	A ¹ O ²	LC800614
Exon 7	O ¹ O ¹	LC800615
Exon 7	O ¹ O ¹	LC800616

Exon 6 was amplified using oligonucleotide primer pairs, sequenced, and compared with the public database at the Gene Bank. The sequence of the O phenotype was compared with the consensus O¹O¹ allele at nucleotide 261 in exon 6, as shown in Fig. 2. Homozygous deletion of G-G (-/-) at position nt261 produces an inactive protein (null genotype), as shown in Fig. 3A. Meanwhile, homozygous insertion of G-G (+/+) nucleotides refers to the identification of blood group alleles as A¹A¹, A¹B, or A¹O² (Figure 3B). The O¹O¹ allele highlighted the homozygous deletion of n261 in exon 6, corresponding to the O+ phenotype.

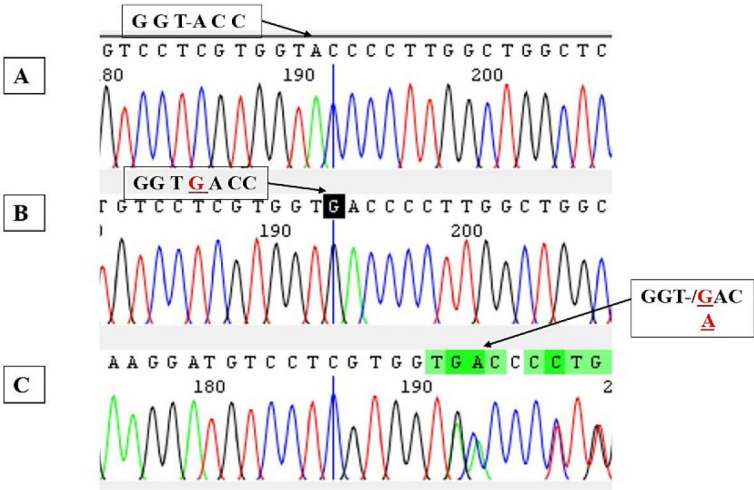


Fig. 2. Sequence of exon 6 at nt 375-1155. A. Homozygous allele refers to the null genotype G-G deletion (-/-) GGT-ACC (O¹O¹). B. Homozygous insertion of the G-G (+/+) GGTGACC genotype, referring to A¹A¹, A¹B, or A¹O² alleles. C. Heterozygous genotype G-G (+/-) GGT-/GAC represents A¹O¹, BO¹, or A²O¹ alleles. Black arrows point to the SNP (at position 621 in the reference sequence)

Five SNPs, nt703, 796, 803, 1061, and 1096, of exon 7 sequences were analyzed to identify single-nucleotide polymorphisms (SNPs) of ABO alleles.

In Fig. 3, the position nt703 was analyzed to differentiate among ABO alleles. Our results indicate that heterozygous AG genotypes are carried by individuals with BO¹ or A¹B genotypes. Accordingly, it was observed that the A¹A¹, A¹O¹, A²O¹, and A¹O² genotypes carry homozygous (G-G) individuals.

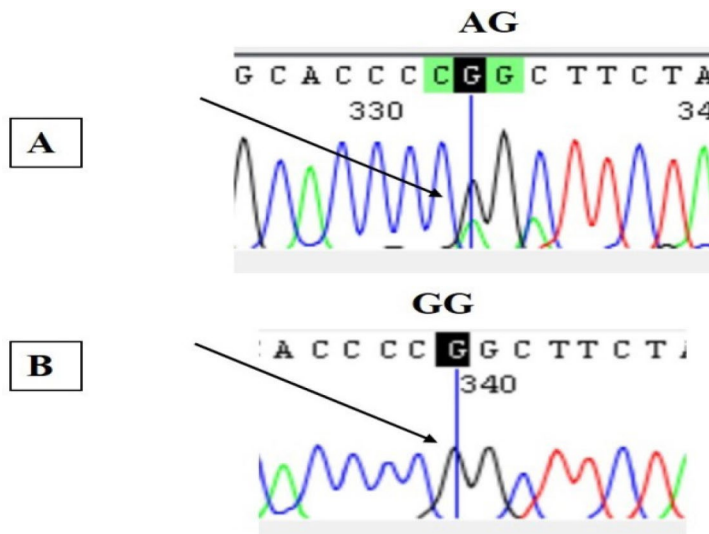


Fig. 3. Sequence of exon 7 at nucleotide position 703. A. An individual carries the heterozygous allele AG/GA representing the BO¹ or A¹B of ABO genotypes. B. Homozygous G-G in the same position produces A¹A¹, A¹O¹, A²O¹, or A¹O² genotypes. Arrows point nt703 SNP

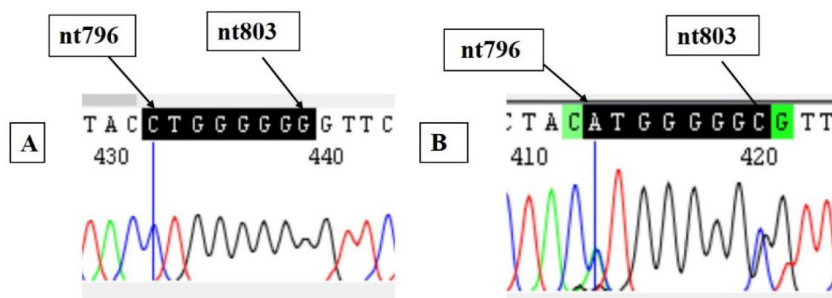


Fig. 4. The two closely related SNPs at exon 7, nt796 and nt803. A. An individual with the C-C allele (C=Leu) at nt796 and the G-G allele (G=Gly) at nt803 carries the A¹O¹ genotype. B. Individual identified as having the A¹B genotype when possessing the A-A allele at nt796 and the GC allele at nt803

At exon 7, two closely related SNPs were included: nt796 and nt803. It was demonstrated that by examining these two positions, it could be predicted that individuals carry the C-C allele (C=Leu) at nt796 and the G-G allele (G=Gly) at nt803, and identify them as the A¹O¹ genotype. Meanwhile, the two alleles, the A-A allele at nt796, and the GC allele at nt803, were identified as the individual A¹B genotype (Fig. 4).

Further analysis of exon 7 at nt11061 (Fig. 5) could identify individuals with the A²O¹ genotype when C/G is deleted at nt11061.

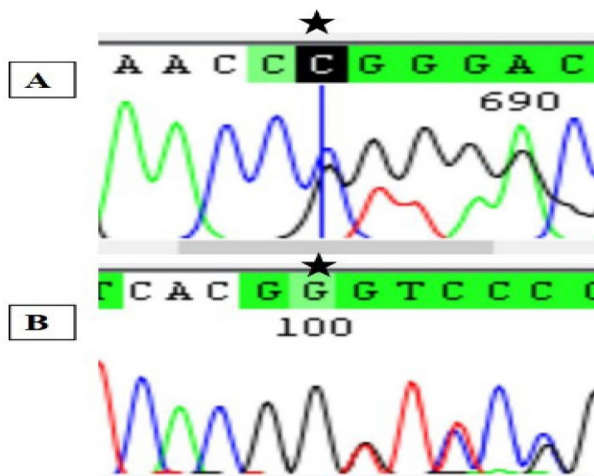


Fig. 5. Deletion in the nt1061 exon 7. A. Sequences with a forward oligonucleotide primer pair; B. Reverse primer pair. A star indicates the deletion position

Another position at exon 7 was analyzed in the nt1096; the presence of G-G in the nt1096 represents the wild type, while the alternation of nucleotides in the same locus to G-A indicates heterozygous A¹B and A¹O² genotypes (Fig. 6).

Individuals with homozygous deletion in the nt261 at exon 6 carry the O¹O¹ allele and have the O blood group. Many loci were scrutinized in exon 7 to identify genotypes and blood groups. Individuals with the BO¹ genotype, which produces the B blood group, have a heterozygous allele in exon 6, nt261 and three positions in exon 7, including nt703, nt796 and nt1096. No SNPs were identified in the examined loci, neither exon 6 nor exon 7, referring to the A¹A¹ genotype, while the A¹O¹ genotype has a single SNP at exon 6 represented by a heterozygote (+/-) at exon 6. Also, a single SNP was identified at exon 7 in the nt1096 producing A¹O² heterozygote (G-A). The A²O¹ genotype has two SNPs,

one showing a heterozygous allele at exon 6 (+/-), as well as, heterozygous deletion in nt1061 at exon 7. The A¹B genotype has four SNPs in nt703, nt796, nt803 and nt1096 at exon 7.

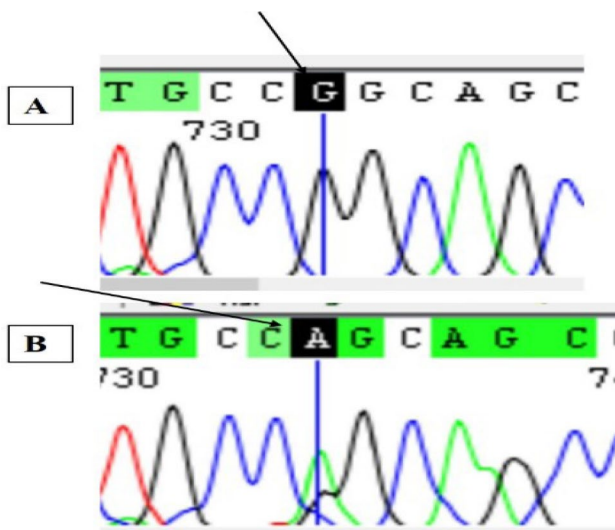


Fig. 6. Nucleotide polymorphism in nt1096 at exon 7. A. Sequences of individuals with wild-type genotype (G-G). B. Heterozygous G-A allele representing the A¹B, and A¹O² genotypes. Arrows point nt1096

Table 3.

Single-nucleotide polymorphisms in different loci of the ABO gene at Exons 6 and 7

ABO genotype	Exon 6	Exon 7				
	G 261	nt703	nt796	nt803	nt1061	nt1096 exon 7
BO ¹	-/+	AG	AC	CG	CC	AG
O ¹ O ¹	-/-	GG	CC	GG	CC	GG
A ¹ A ¹	+/+	GG	CC	GG	CC	GG
A ¹ B	+/+	GA	CA	GC	CC	GA
A ¹ O ¹	-/+	GG	CC	GG	CC	GG
A ² O ¹	-/+	GG	CC	GG	- C	GG
A ¹ O ²	+/+	GG	CC	GG	CC	GA

nt = nucleotide, + = nucleotide present, - = nucleotide deletion

The variation in the SNPs among blood groups produced different genotypes that can be used to differentiate among blood groups properly.

Discussion

This study was designed to investigate the genetic diversity of the ABO genotype among the Basrah city population using the sequencing method. Blood samples were collected from thirty young, healthy individuals. Two exon regions, including exons 6 and 7, were selected to identify the genetic variation among populations.

Although previous studies in Iraq were mostly done using PCR-RFLP analysis to investigate ABO genotypes, our current study uses a specialized sequencing method for examining a precise set of SNP loci, which makes our results deeper and more accurate [6]. Rare mutations may occur in a particular population [3, 11]. Another advantage of genotypic characterization over phenotypic characterization for clinical purposes is its ability to detect weak antigen expression [8]. The determination of ABO blood group system genotypes in the population is crucial owing to their clinical, evolutionary and forensic importance [2]. No database has been found for genotypes of blood groups concerning the Iraqi population, except for the single allele [8]. All these reasons encourage us to conduct this study.

The sequencing method has been shown to provide accurate analysis for genetic variation and can store data for future analysis using more advanced tools. Our results found that it could predict blood groups by sequencing analysis compared with the genotype results of the phenotypic serological methods. These results are consistent with previous work, which indicated the accuracy of SNP analysis, resulting in the identification of a blood group [3].

According to the phenotypes, 36.7% of the subjects belong to the A blood group, being the highest percentage among other groups. The O group, on the other hand, accounts for more than half of the total percentage of 33.33%; and the B group has an approximate percentage of 23.33; and lastly, the AB group, which constitutes 6.67%. Our result is consistent with previous findings that found the majority of samples were from group A, while Saleh *et al.* and Eissa found that the prevalence of the O group was higher than other blood groups [12,13]. Similarly to our results, in Saudi Arabia, the A group is more prevalent than other groups [7]. In addition, an early study conducted in Iraq found that the predominant blood group was the A, followed by B, AB, and O, respectively [6]. In accordance with our results, the frequency of blood groups in the Jordanian population was 38.36% in the A group, 36.62% in the B group, followed by 18.04% in the B group and 6.9% in the AB group [14].

Amplification of exons 6 and 7 and sequence analysis were utilized to identify approximately 80% of the coding sequence of the *ABO* gene. This method was utilized to identify the blood group genotypes.

In our results, the prevalence of individuals with the A¹ allele is higher than that of A². 6.7% of the individuals have the A²O genotype; the A² part refers to the fact that an individual inherited an A allele from one parent and an O allele from the other. The main difference between the A¹ and A² parts of the genotype is the expression of antigen A. It was found that A¹ is expressed more pronouncedly than A². Lehner et al. suggested that the differentiation between A¹ and A² reduces incompatible platelet transfusions owing to variation in A-antigen expression [15]. This result draws attention to the importance of genotype examination in clinical institutes.

The sequence analysis shows no difference between A¹O¹ and A²O¹ at exon 6; both are heterozygous (+/-), while A¹O² is homozygous (+/+). Previous work found that the difference between the A¹O¹ and A¹O² alleles is related to the mutation at nt467 within exon 7, leading to an alternate amino acid residue at codon 156 from proline to leucine (Pro156Leu) [16]. In Saudi Arabia, the prevalence of A¹O¹ and A¹O² alleles was 3.27% and 17.76%, respectively [7]. It is currently differentiated between the A¹O¹ and A¹O² alleles through exon 6. It was demonstrated that two specific alleles 467C>T and 1061delC at exon 7 were recorded in the A allele associated with A²O¹ [17].

23.3% of the samples had the BO¹ genotype, compared with previous results that were registered in Saudi Arabia when they found that the frequency of the B¹O¹ genotype was 11.2%. On the other hand, in the northeast Algerian population, the frequency of the B blood group was slightly higher than in Saudi Arabia at 15.93% [18].

Similarly to our findings, the BO¹ genotype shows an alteration in the position nt703 G<A and nt803 G<C [16]. In agreement with our results, it was demonstrated that the BO¹ genotype has polymorphisms at positions 796 (C>A) and 803 (G>C) in exon 7 [19].

The O¹O¹ genotype was characterized by a deletion in exon 6 at position G261, this mutation was previously highlighted by Nakamura and his co-workers [20]. A minority of samples (6.7%) have the A¹B genotype, marking a slight deviation, lower than previous results recorded in Saudi Arabia (7.5%) and Algeria (4.3%). In our results, the A¹B genotype is characterized by a single polymorphism at nt1096 in exon 7. A previous study found that in the Iraqi man sample, genetic variations influenced the expression of antigens A and B, involving the incompatibility of blood groups [8]. A small number of samples included in our study is one of the limitations of this study. A limitation of this study is that it was self-funded by the authors; therefore, the limitation of sample numbers is attributed to the high cost of sequencing and materials, as earning

financial support is difficult in Iraq. Because of the lack of financial support, this work was limited to a single geographic area (Basrah city). The diversity of group ethnicities across Iraq is broad, and scanning a vast population with different ethnicities, e.g., Arabic, Kurdish, Turkman, etc., may help to discover novel genotypes. The present study encourages further research by our team to investigate the association between blood group genotypes and chronic inherited diseases.

Conclusion

The investigation in the current study represents a novel contribution involving determining ABO genotypes in Iraq through the sequencing method. With respect to the selection of Basrah city, our findings reflect a preliminary overview of genotype distributions in the region. It was revealed that a higher frequency was observed in one blood group among four, whereas the minority was represented by the AB group. The appearance of the A¹O² genotype reflects the importance of applying genetic analyses to reduce incompatibility among blood groups. In addition, our comparisons to earlier studies show deviations in genotypes and blood group frequencies of diverse populations in the Arab region, probably a reflection of different ethnical backgrounds. These emphasize the need for more studies to uncover the complex relationship between genetics and race in the determination of the distribution of different blood groups.

Ethics Committee Conclusion. This study was approved by the ethical committee of the Department of Medical Laboratory Techniques, Southern Technical University, approval number: 386 in date 15.12.2024.

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

Acknowledgements. We would like to express our gratitude to Southern Technical University and the students Fatima and Ali Al-Muhammad, who helped with the sample collection.

References

1. Daniels, G. (2005). The molecular genetics of blood group polymorphism. *Transplant Immunology*, 14(3–4), 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.trim.2005.03.003>
2. Yamamoto, F. (2021). Molecular genetics and genomics of the ABO blood group system. *Annals of Blood*, 6, 25–44. <https://doi.org/10.21037/aob-20-71>. EDN: <https://elibrary.ru/OJLZGP>
3. Daniels, G. (2023). An overview of blood group genotyping. *Annals of Blood*, 8(3), 21–37. <https://doi.org/10.21037/aob-21-37>. EDN: <https://elibrary.ru/RSFEBW>

4. Abegaz, S. B. (2021). Human ABO blood groups and their associations with different diseases. *BioMed Research International*, 2021(1), 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/6629060>. EDN: <https://elibrary.ru/RFKCRX>
5. Farhan, D. M., Ouda, M. H., & Al-Shehristani, R. M. M. (2022). Association of ABO genotype and phenotype with angiotensin converting enzyme (ACE) and angiotensin II levels in hypertensive patients on candesartan treatment. *Bulletin of National Institute of Health Sciences*, 140(1), 1385–1396.
6. Nader, M. I., AL-Thwani, A. N., Mohammed, A. K., & Omar, A. J. (2012). Genotype of the ABO blood group system in Iraq population using PCR-RFLP. *Iraqi Journal of Biotechnology*, 11(2), 464–474.
7. Mohamed, A. B., Hindawi, S. I., Al-Harthi, S., Alam, Q., Alam, M. Z., Haque, A., ... & Damanhour, G. A. (2016). Allelic variance among ABO blood group genotypes in a population from the western region of Saudi Arabia. *Blood Research*, 51(4), 274. <https://doi.org/10.5045/br.2016.51.4.274>
8. Matzhold, E. M., Drexler, C., Staudacher, E., Glock, B., & Wagner, T. (2018). A novel variant B allele at the ABO gene locus characterized by a duplication-based insertion of 27 nucleotides identified in an Iraqi male with a weak B subgroup phenotype. *Transfusion*, 58(5), 1318–1319. <https://doi.org/10.1111/trf.14539>
9. Chen, J., Zhan, Y., Zhang, J., Yu, Y., Yao, S., & Luo, G. (2023). Rapid identification of seven common ABO alleles by two-dimensional polymerase chain reaction technology. *Transfusion Medicine and Hemotherapy*, 50(6), 502–514. <https://doi.org/10.1159/000530013>. EDN: <https://elibrary.ru/QYISNR>
10. Martin, M. P., & Detzel, S. M. (2008). A laboratory exercise to determine human ABO blood type by noninvasive methods. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 36(2), 139–146. <https://doi.org/10.1002/bmb.20165>
11. Irshaid, N. M., Henry, S. M., & Olsson, M. L. (2000). Genomic characterization of the Kidd blood group gene: Different molecular basis of the Jk(a-b-) phenotype in Polynesians and Finns. *Transfusion*, 40(1), 69–74. <https://doi.org/10.1046/j.1537-2995.2000.40010069.x>
12. Eissa, A. (2014). ABO and Rh blood groups polymorphism among the Kurds of Duhok, Iraq. *Dohuk Medical Journal*, 8(1), 1–8.
13. Saleh, S. M., & Abood, A. S. (2016). ABO and Rh(D) blood groups' distribution and gene frequencies in North Baghdad population — Iraq. *International Journal of Engineering Sciences & Research*, 7(8), 581–584.
14. Hassawi, D. (2007). Allele frequency and molecular genotypes of ABO blood group system in a Jordanian population. *Journal of Medical Sciences*, 7(1), 51–58. <https://doi.org/10.3923/jms.2007.51.58>. EDN: <https://elibrary.ru/XTEXCE>
15. Lehner, B., Eichelberger, B., Jungbauer, C., & Panzer, S. (2015). The blood group A genotype determines the level of expression of the blood group A on platelets but not

- the anti-B isoter. *Transfusion Medicine and Hemotherapy*, 42(6), 366–371. <https://doi.org/10.1159/000432414>
16. Yip, S. P. (2002). Sequence variation at the human ABO locus. *Annals of Human Genetics*, 66(1), 1–27. <https://doi.org/10.1017/S0003480001008995>
 17. Hosseini-Maaf, B., Hellberg, E., Rodrigues, M. J., Chester, M. A., & Olsson, M. L. (2003). ABO exon and intron analysis in individuals with the AweakB phenotype reveals a novel O1v-A2 hybrid allele that causes four missense mutations in the A transferase. *BMC Genetics*, 4(1), 4–17. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-4-17>. EDN: <https://elibrary.ru/SPQGBX>
 18. Bouzenda, K., & Ouelaa, H. (2022). Distribution of ABO alleles in the Northeast Algerian population. *Transfusion Clinique et Biologique*, 29(2), 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.tracli.2022.01.005>. EDN: <https://elibrary.ru/SNMIHG>
 19. Bugert, P., Scharberg, E. A., Janetzko, K., Rink, G., Panter, K., Richter, E., & Klüter, H. (2008). A novel variant B allele of the ABO blood group gene associated with lack of B antigen expression. *Transfusion Medicine and Hemotherapy*, 35(4), 319–323. <https://doi.org/10.1159/000141640>
 20. Nakamura, S., Matsushita, H., Nagai, T., Sugie, H., Furukawa, M., & Kurihara, K. (2003). DNA analysis of ABO blood group system detected by single-base nucleotide substitutions in a paternity case. *International Congress Series*, 1239, 925–927. [https://doi.org/10.1016/S0531-5131\(02\)00503-4](https://doi.org/10.1016/S0531-5131(02)00503-4)

DATA ABOUT THE AUTHORS

Maysoon Khudheyer Almyah, PhD, Prof., Department of Medical Laboratory Techniques
Southern Technical University
Basrah, Iraq
husseinalihasan526@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5344-8760>

Aalaa Abdulzahra Chmagh, PhD, Prof., Department of Medical Laboratory Techniques
Southern Technical University
Basrah, Iraq
alihuseeinibsh@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6287-2902>

Ayat Ibrahim Esmaeel Al-laeiby, PhD, Prof., Department of Pathological Analysis
College of Science, Basrah University
Basrah, Iraq

ayatallaaeiby@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-2050>

Safaa Taha Yassen, PhD, Prof.

AL-Zahra Medical College, University of Basrah

Basrah, Iraq

safamohhussein@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9470-7830>

Поступила 09.09.2025

После рецензирования 30.10.2025

Принята 20.11.2025

Received 09.09.2025

Revised 30.10.2025

Accepted 20.11.2025

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

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1247](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1247)

EDN: [CRQBBUB](#)

UDC 612.017.1:616.61-002



Exploring NLRP3, NLRC4, AIM 2 and their inflammatory cytokines in UTI of Basrah province, Iraq

Z.A. Eidan, W.S. Shani, M.A.-I. Almazini

College of Science, University of Basrah, Basrah, Iraq

Abstract

Background. Urinary tract infections (UTIs) are inflammation of the urinary tract epithelium resulting from invasion by microorganisms.

Purpose. This study aimed to determine the role of some innate immune receptors like NLRP3, NLRC4, AIM 2, and some inflammatory cytokines such as IL-1 β , IL-18, and MCP-1 in inflammatory processes in UTI patients.

Materials and methods. A case-control study was conducted at (Al Basrah General Teaching Hospital, Al Mawani General Teaching Hospital, and Al Sadir Teaching Hospital) in Basrah province between October 2023 to March 2024. 35 patients with confirmed UTI by Vitek® 2 system and 16S rDNA and 30 healthy controls without UTI. Sera levels of receptors (NLRP3, NLRC4 and AIM2) and cytokines (IL-1 β , IL-18, and MCP-1) were determined by using an enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) kit.

Results. *E.coli* is the most common species among the bacteria, NLRP3, NLRC4, AIM2, IL-1 β , and IL-18 was highly significant in sera of UTIs but MCP-1 with no significant $p>0.303$ in sera of UTIs.

Conclusions. A positive correlation was recorded between *E.coli* infection and all studied receptors (NLRP3, NLRC4, and AIM2). The same is true in the studied inflammatory cytokines (IL-1 β and IL-18), but *E.coli* infection with MCP-1 is not correlated. Data analysis indicated a positive correlation of NLRP3 and NLRC4 with IL-1 β and IL-18 whereas no correlation with MCP-1. A positive correlation was also shown between AIM2 and IL-18 whereas no correlation between AIM2 with IL-1 β , and MCP-1.

Keywords: urinary tract infections; *E.coli*; epithelium; receptors; immune; cytokines; Basrah province

For citation. Eidan, Z. A., Shani, W. S., & Almazini, M. A.-I. (2026). Exploring NLRP3, NLRC4, AIM 2 and their inflammatory cytokines in UTI of Basrah province, Iraq. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 184–206. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1247>

Introduction

One of the most prevalent bacterial illnesses worldwide, urinary tract infections (UTIs) significantly increase morbidity in otherwise healthy females [1]. This occurs as a result of the urethra acting as both a channel for urine to exit the body and a point of entry for germs to enter the urinary tract [2]. The most frequent cause of urinary tract infections is bacteria, specifically Gram-negative bacilli. UTIs are most often caused by Enterobacteriaceae, and 80–90% of infections are caused by uropathogenic *Escherichia coli* (UPEC) [2; 3]. Through type-1 fimbriae, UPEC binds to host receptors on the superficial bladder epithelial cells. Intracellular bacterial communities are created by UPEC after it invades the cells after attachment [4]. Additionally, UPEC can penetrate the urothelium's deeper layers, develop quiescent intracellular reservoirs, and remain there for months at a time before reoccurring infections [4]. The submucosa of the urinary tract contains a large population of macrophages, and additional cells are attracted to these areas after infection [5]. When activated, macrophages create cytokines and chemokines that affect the activity of nearby immune cells, impacting the timing and strength of inflammatory responses during UTIs [6; 7]. Excessive inflammation may lead to chronic or secondary conditions, which are further involved in tissue damage and illness severity to the host. The host's innate reaction serves as the initial line of defense against UPEC infection and the ensuing tissue damage [8]. The first line of defense against pathogenic microbes is provided by innate immune receptors. These receptors can be classified as either intracellular, including absent in Melanoma 2 (AIM2), Nod-like receptor family pyrin domain containing 3 (NLRP3), Nod-like receptor family CARD domain-containing protein 4 (NLRC4) or extracellular receptors include toll-like receptors (TLRs) [9]. Receptors activate when pathogen-associated molecular patterns (PAMPs) are sensed by pattern recognition receptors (PRRs), such as toll-like receptors (TLRs), or danger-associated molecular patterns (DAMPs) are sensed by nucleotide oligomerization domain (NOD)-like receptors (NLRs) [4]. This study aimed to determine the role of some innate immune receptors like NLRP3, NLRC4, AIM 2 and some inflammatory cytokines such as IL-1 β , IL-18 and MCP-1 in inflammatory processes in UTI patients.

Materials and methods

Samples collection

Urine and blood samples were collected from Al Basrah General Teaching Hospital, Al Mawani General Teaching Hospital, and Al Sadir Teaching Hospital in Basrah province from October 2023 to March 2024. A total of 200 individuals suspected of having a urinary tract infection (UTI) were provided clinical samples. The participants' ages ranged from 20 to 60 years. Each patient's urine and blood samples were classified as +ve *E. coli*. After a general urine examination (GUE) and bacterial culture, the isolates were examined under a microscope. Biochemical tests were used to identify Gram-positive bacteria, while Gram-negative isolates were identified using the Vitek® 2 system. The results of 16S rDNA sequencing also confirmed the identification of *E. coli* in the isolates. The positive patients were included in this study, and additional urine and blood samples were collected from a control group, which consisted of individuals who tested negative in the GUE and culture. For each patient, 10 ml of urine and 5 ml of blood were collected, and the serum was separated from the blood by centrifugation for 20 minutes at $1000 \times g$.

Patients

A case-control study was conducted involving 35 patients with confirmed urinary tract infections (UTIs) and 30 healthy controls who did not have UTIs. Serum levels of receptors (NLRP3, NLRC4, and AIM2) and inflammatory cytokines (IL-1, IL-18, and MCP-1) were measured using enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) technology. The specific kits used in this study included the Human NLRP3 ELISA Kit RDEEH4202, Human NLRC4 ELISA Kit RDEEH1796, Human AIM2 ELISA Kit RDEEH2125, Human IL-1 β ELISA Kit RDEEH0185, Human IL-18 ELISA Kit RDEEH0011, and Human MCP-1 ELISA Kit RDEEH0222, all of which are commercially available from MyBioSource/American. These kits utilize a sandwich enzyme-linked immunosorbent assay format. The experiments were conducted as factorial experiments with two replications, and differences between the averages were analyzed using the least significant difference (LSD) method.

Statistical analysis

Data from the current study were analyzed by using the Chi-square (X²) test to compare between percentages. Numeric data were described by (Mean $\pm$ SD). An independent sample t-test is used to compare two numeric variables, while an F test (ANOVA) is used to compare three numeric variables or more. Pearson correlation (R) accounted to explain the type and strength of the relationship between variables. ROC curve used to measure sensitivity and specificity of diagnostic tests (detection of the best test for diagnosis). A level of significance of $\alpha=0.05$ was applied to the test. (SPSS v.26 and Excel 2013) programs used to analyze current data.

Results

Distribution of Patients with UTI According to gender

The present study included 100 patients with UTIs. The distribution of UTI patients according to gender is shown in (Figure 1). In the present study, the proportion of female patients with UTI was higher than that of male subjects, 78 versus 22, respectively.

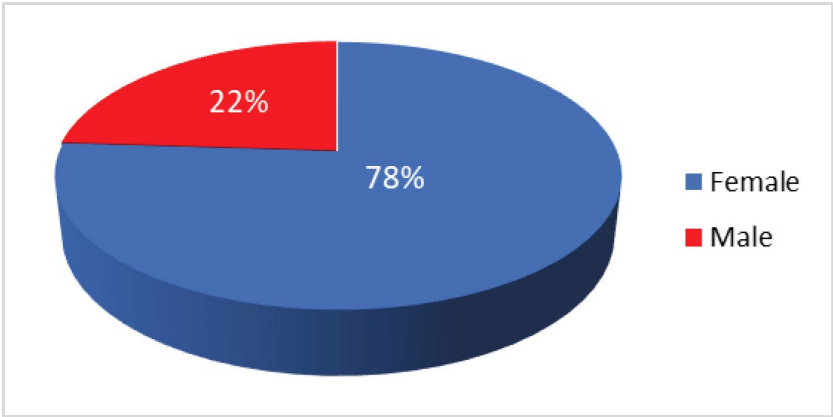


Fig. 1. Distribution of the patients with UTI according to gender

Distribution of patients and control according to age groups:

According to recent data, UTI patients of (20–30) age group had the highest proportion of infection, while those between the ages of (51–60) had the lowest percentage, with significant differences ($p \leq 0.001$). (Figure 2) and (Table 1).

Table 1.

Distribution of patients and control according to age

Age range groups (Years)	Number of patients	Percentage of patients	Number of control	Percentage of control	Total number	Percentage of total	The <i>p</i> -value for each period	<i>p</i> -value for total
20-30	14	40%	14	36.67%	28	43.08 %	0.595	0.001
31-40	8	22.86%	7	26.67%	15	23.08 %	0.964	
41-50	7	20%	5	23.33%	12	18.46 %	0.735	
51-60	6	17.14%	4	13.33%	10	15.38 %	0.677	
Total	35	100%	30	100%	65	100%	0.018	

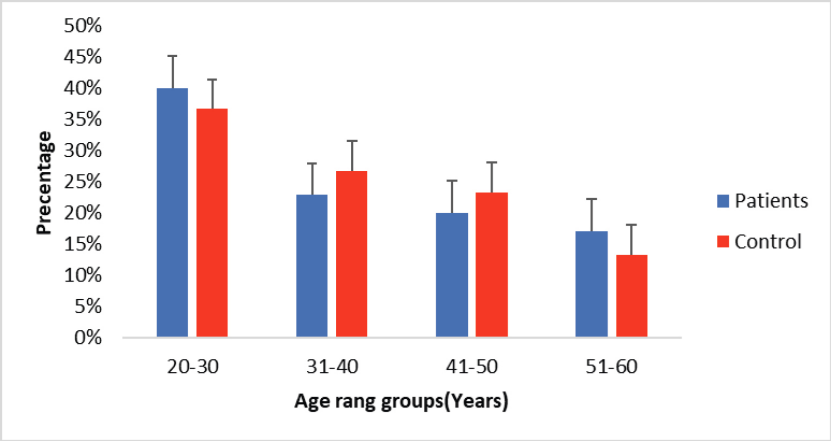


Fig. 2. Distribution of patients and control according

Distribution of patients according to type of bacteria

Present work indicated that the percentages of uropathogen. *E.coli* 35(50%) isolates, *S. aureus* 18(25.71%) isolates, *K. pneumoniae* 5(7.14%) isolates follows by *Staphylococcus spp.* 4(5.71%), *Streptococcus spp.* 3(4.29%) isolates, *Pseudomonas* 3(4.29%) isolates and 2(2.86%) *Proteus mirbalies* isolates as shown in (Figure 3), with significant differences $p \leq 0.005$.

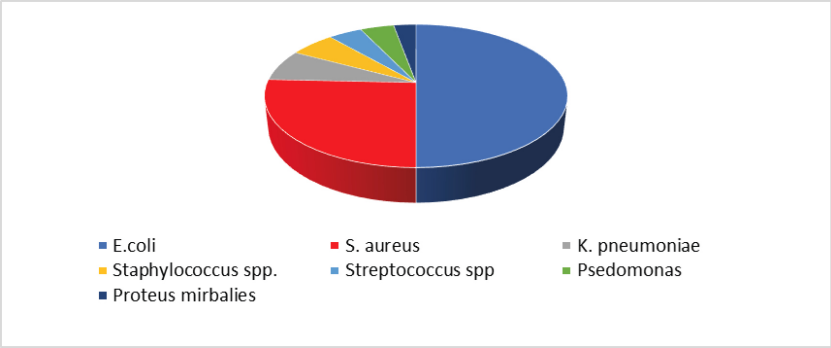


Fig. 3. Frequency of bacterial isolates in the urine of patients

Determination of NLRP3, NLRC4 and AIM2 concentration

Present data recorded highly significant elevation $p \leq 0.001$ of NLRP3 and NLRC4 in sera of UTI patients in comparison with control. While current study

showed that there were significant differences $p \leq 0.003$ of AIM2 in sera of UTI patients in comparison with control groups (Table 2) and (Figures 4,5 and 6).

Table 2.
NLRP3, NLRC4, and AIM2 concentration in sera of patients and control groups.

Groups		N	Mean	SD±	p-value
NLRP3 (ng/ml)	Patients	35	6.447	±2.328	0.001
	Control	30	2.597	±0.645	
NLRC4 (pg/ml)	Patients	35	127.61	±9.74	0.001
	Control	30	107.02	±14.71	
AIM2 (ng/ml)	Patients	35	0.35	±0.181	0.003
	Control	30	0.24	±0.039	

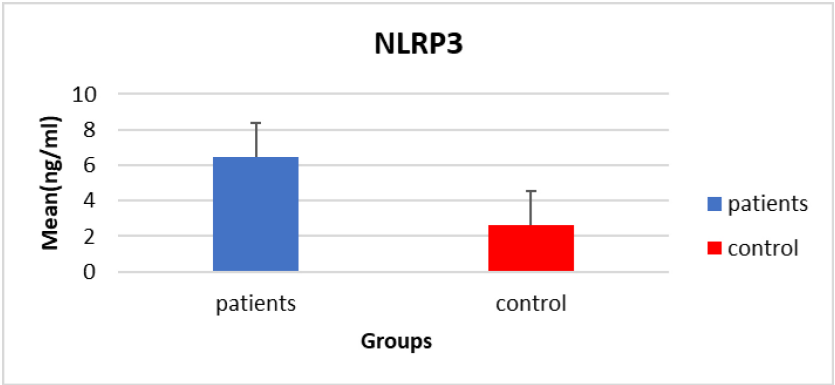


Fig. 4. Mean serum levels of NLRP3 in patients and control groups.

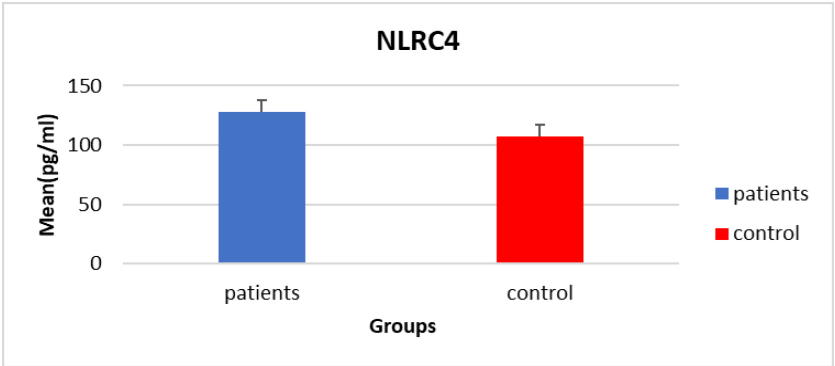


Fig.5 . Mean serum levels of NLRC4 in patients and control groups

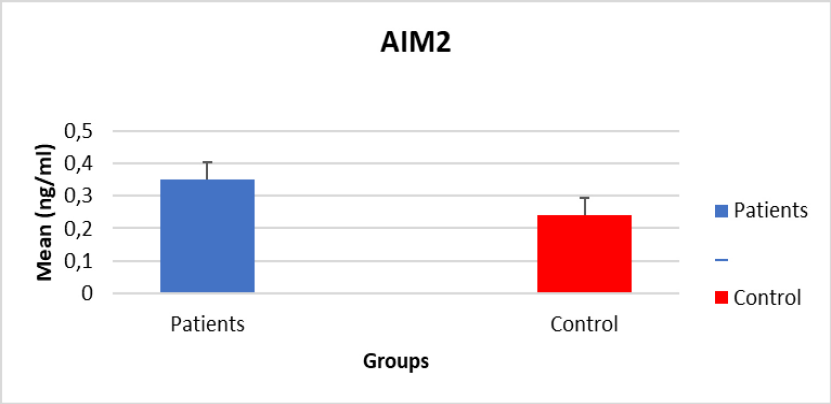


Fig. 6. Mean serum levels of AIM2 in patients and control groups

Concentration of NLRP3, NLRC4, and AIM2 in patients according to age groups

Recent data documented that the mean value of NLRP3 was higher in (the 31-40) age group than in the (20-30) age group with high significant differences ($p \leq 0.001$) among all studied age groups.

The concentration of NLRC4 was higher in (the 41-50) age group than in the (20-30) age group with a significant difference ($p \leq 0.01$) among all studied age groups. In the case of AIM2 current data do not record any statistical difference among studied age groups where the highest concentration was recorded in the (31-40) age group and the lowest in the (20-30) age group (Figure 7) and (Table 3).

Table 3.
Concentration of NLRP3, NLRC4 and AIM2 in patients according to patients age groups

Age range groups	Concentration of receptors								
	NLRP3 (ng/ml)			NLRC4 (pg/ml)			AIM2 (ng/ml)		
	Mean	SD±	p-value	Mean	SD±	p-value	Mean	SD±	p-value
20-30(G1)	5.005	±1.244	0.001	121.85	3.51	0.001	0.2771	±0.0542	0.236
31-40(G2)	9.267	±2.270		124.114	2.407		0.4496	±0.2519	
41-50(G3)	5.832	±1.426		139.65	12.50		0.3591	±0.2198	
51-60(G4)	5.587	±1.455		124.468	2.309		0.3192	±0.0866	

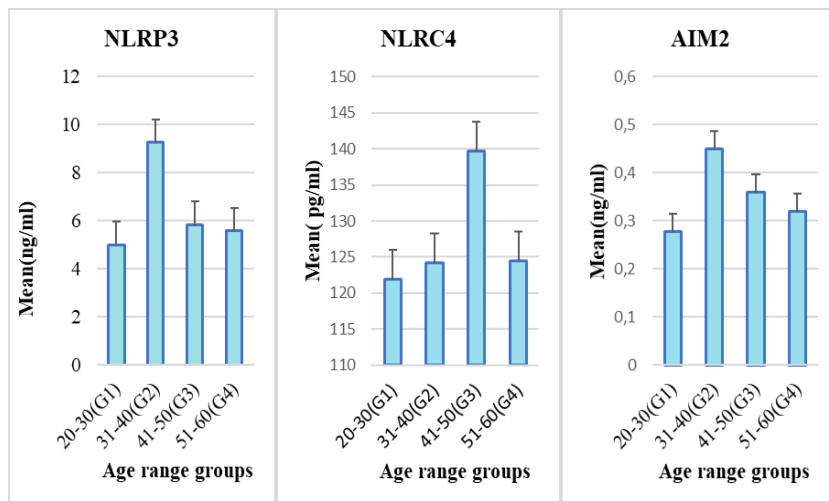


Fig. 7. Concentration of NLRP3, NLRC4, and AIM2 in patients according to age groups

Determination of sera IL-1 β , IL-18 and MCP-1 concentration by ELISA

The results demonstrated that there was an increase in IL-1 β levels in sera of UTI patients than the control group with highly significant differences of $p \leq 0.001$ in (Table 4) and (Figure 8).

In the case of IL-18 recent data documented that there was a highly significant elevation in UTI patients than control, (Table 4) and (Figure 9). MCP-1 concentration not showed any statistical differences between the two studied groups (Table 4) and (Figure 10)

Table 4.

IL-1 β , IL-18 and MCP-1 concentration in sera of patients and control groups

Groups		N	Mean	SD $\pm$	p-value
IL-1 β (pg/ml)	Patients	35	151.48	± 39.702	0.001
	Control	30	62.41	± 12.161	
IL-18 (pg/ml)	Patients	35	299.41	± 11.926	0.001
	Control	30	144.05	± 1.969	
MCP-1 (Pg/ml)	Patients	35	27.10	± 5.636	0.303
	Control	30	25.96	± 2.147	

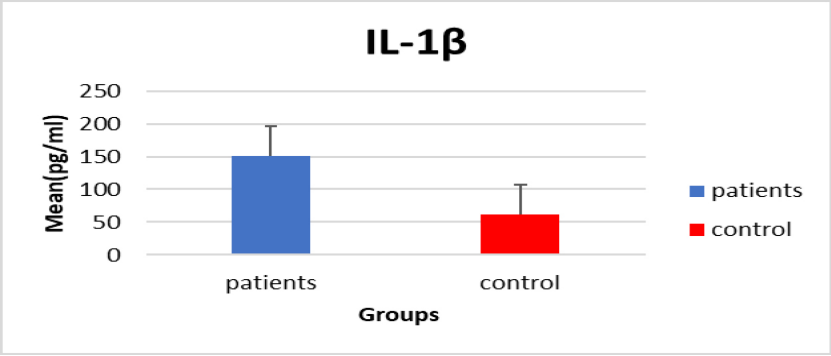


Fig. 8. Mean serum levels of IL- 1β in patients and control groups

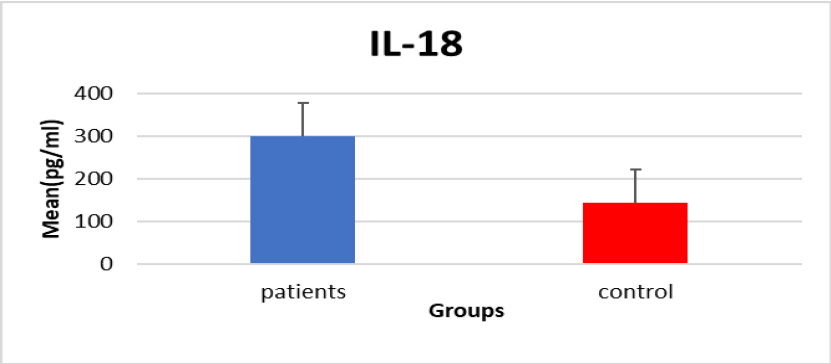


Fig. 9. Mean serum levels of IL-18 in patients and control groups

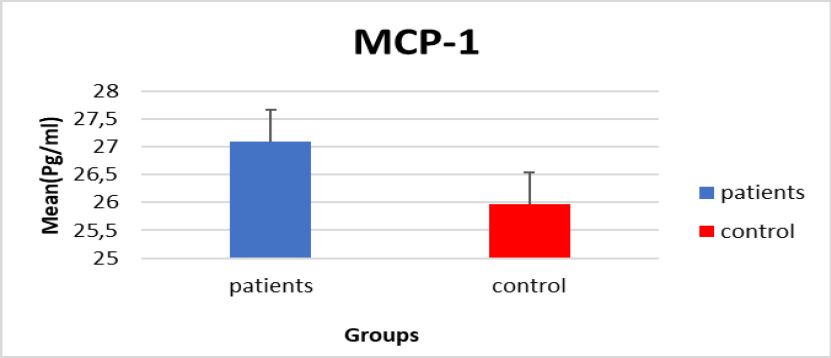


Fig. 10. Mean serum levels of MCP-1 in patients and control groups

Concentration of IL-1 β , IL-18, and MCP-1 in patients according to age groups.

Recent data documented that the mean value of IL-1 β was higher in the (41-50) age group than in (the 20-30) age group with high significant differences ($p \leq 0.01$) among all studied age groups. Current results showed that the concentration of IL-18 was higher in the (51-60) age group than in (the 20-30) age group with significant differences ($p \leq 0.010$) among all studied age groups. In the case of MCP-1 current data did not record any statistical differences among studied age groups where the highest concentration was showed in the (51-60) age group and the lowest in (the 20-30) age group (Figure 11) and (Table 5).

Table 5.
Concentration of IL-1 β , IL-18, and MCP-1 in patients according to age groups

Age range groups	Concentration of cytokines								
	IL-1 β			IL-18			MCP-1		
	Mean	S.D $\pm$	p-value	Mean	S.D $\pm$	p-value	Mean	S.D $\pm$	p-value
20-30(G1)	94.8	± 42.6	0.001	285.55 ± 16.34		0.001	25.64 ± 5.62		0.611
31-40(G2)	159.91	± 7.80		303.23 ± 3.86			25.88 ± 3.80		
41-50(G3)	183.04	± 21.91		305.15 ± 3.94			27.99 ± 6.79		
51-60(G4)	161.86	± 5.74		304.25 ± 3.98			28.70 ± 6.27		

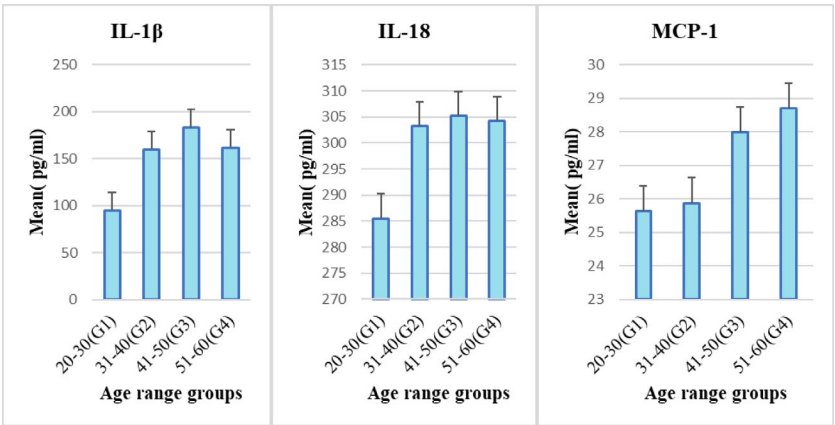


Fig. 11. Concentration of IL-1 β , IL-18 and MCP-1 in patients according to age groups

Correlation of *E.coli* infection with receptors and cytokines

A positive correlation was recorded between *E.coli* infection and all studied receptors (NLRP3, NLRC4, and AIM2), (Table 4) The same is true in the case

of studied inflammatory cytokines (IL-1 β and IL-18), whereas no correlation *E.coli* infection with MCP-1, (Table 6).

Table 6.

Correlation of *E.coli* infection with receptors and cytokines

Receptors	<i>E.coli</i>	
	R-value	<i>p</i> -value
NLRP3	0.741	0.001
NLRC4	0.647	0.001
AIM2	0.363	0.003
cytokines	R-value	P-value
IL-1 β	0.830	0.001
IL-18	0.994	0.001
MCP-1	0.130	0.302

Correlation between receptors and cytokines

Data analysis indicated that there was a positive correlation between NLRP3 and NLRC4 with IL-1 β and IL-18, whereas no correlation with MCP-1 (Table 7). A positive correlation was also showed between AIM2 with IL-18, whereas no correlation between AIM2 with IL-1 β , and MCP-1 (Table 7).

Table 7.

Correlation between receptors and cytokines

Receptors	Cytokines					
	IL-1 β		IL-18		MCP-1	
	R-value	<i>p</i> -value	R-value	<i>p</i> -value	R-value	<i>p</i> -value
NLRP3	0.609	0.001	0.773	0.001	0.142	0.258
NLRC4	0.558	0.001	0.646	0.001	0.082	0.516
AIM2	0.153	0.225	0.359	0.003	-0.175	0.170

Sensitivity, Specificity, and off for comparison parameters of current study ROC curve in serum

As shown in (Table 8) and (Figure 12) of receptors, serum NLRC4 showed a high sensitivity when compared with serum NLRP3 and AIM2 (89.5%% vs.85.7% and 54.2%), respectively, while serum NLRP3, was high Specificity when compared with serum NLRC4 and AIM2 (90%% vs.80% and 89%) respectively. As shown in (Table 8) and (Figure 12) of cytokines, serum IL-18 showed a high sensitivity when compared with serum IL-1 β and MCP-1 (91%% vs. 85.7%% and 34.3%%) respectively, also IL-18, serum was high Specificity

when compared with IL-1 β serum and MCP-1 serum (92% vs.90% and 90%), respectively.

Table 8.

Sensitivity, Specificity, and Cut-off for comparison studied receptors and Cytokines by ROC curve

serum								
parameters	Sensitivity %	Specificity %	Cut off	AUC	C.195		p-value	S.erroe
					Lower	Upper		
NLRP3	85.7%	90%	4.2085	0.979	0.822	0.899	0.000	0.13
NLRC4	89.5%	80%	109.381	0.877	0.775	0.842	0.000	0.52
AIM2	54.2%	89%	0.589	0.542	0.401	0.683	0.563	0.72
serum								
parameters	Sensitivity %	Specificity %	Cut off	AUC	C.195		P value	S.erroe
					Lower	Upper		
IL-1 β	85.7%	90%	119.889	0.953	0.829	0.894	0.001	0.027
IL-18	91%	92%	201.054	0.989	0.893	0.922	0.001	0.024
MCP-1	34.3%	90%	28.648	0.484	0.332	0.636	0.823	0.077

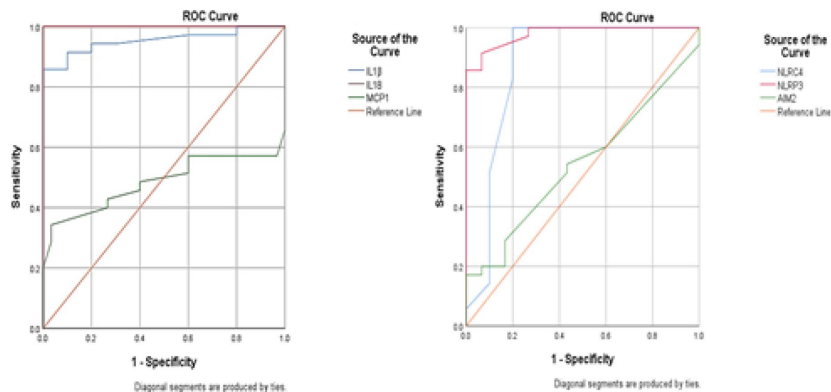


Fig. 12. ROC curve for comparison of studied receptors and cytokines

The ROC curve of studied receptors showed that the Area under the curve (AUC) for serum NLRP3, NLRC4, and AIM2 (AUC= 0.979, 0.877, 0.542) respectively whereas the standard error for serum NLRP3, NLRC4 and AIM2 (0.13, 0.52 and 0.72) respectively. (Figure 12) while the confidence Interval of 95% for serum NLRP3, NLRC4, and AIM2 were 0.822 to 0.899, 0.775 to 0.842, and 0.401 to 0.683 respectively as shown in (Table 8). ROC curve of

studied Cytokines showed that the area under the curve (AUC) for serum IL-1 β , IL-18, and MCP-1 (AUC= 0.953, 0.989, 0.484) respectively whereas standard error for serum IL-1 β , IL-18 and MCP-1 (0.027, 0.024 and 0.077) respectively. (Figure 12) while confidence Interval of 95% for serum IL-1 β , IL-18, and MCP-1 were 0.829 to 0.894, 0.893 to 0.922, and 0.332 to 0.636 respectively as shown in (Table 8).

Discussion

Urinary tract infections (UTIs) are characterized by inflammation of the urinary tract epithelium caused by the invasion of microorganisms. This is a common and significant health issue that affects individuals of all ages [10,11], both men and women. According to the current study, females accounted for 72% of UTI cases, while males comprised 28%. Previous studies support these findings. For instance, a study conducted by Kamel and Ali (2024) found that females represented 77% of UTI cases, with males at 23% [12]. Another study in Iraq reported that females made up 58.3% of UTI cases and males 41.7%. Al-fetlawi and Jasim (2022) indicated that in Al-Diwaniyah, females were the most susceptible to UTIs, with a rate of 79.7% compared to 20.3% for males [13]. These results align with the anatomical differences between males and females, as the urethra in women is shorter, reducing the distance bacteria must travel to reach the bladder. Additionally, hormonal fluctuations in women throughout the menstrual cycle play a significant role in increasing their susceptibility to UTIs [14]. Present data revealed that the distribution of UTI patients was highest percentage with ages between (20-30), which was in agreement with Alfetlawi and Jasim, (2022) who referred the highest percentage with ages between (18-30) [13]. Study done by Assafi *et al.*, (2022) revealed that the highest percentage with ages between of (20-39) [15]. Another study showed that the highest proportion of UTIs was detected among aged (27-35) years with high parity Kamel and Ali (2024) [12]. A study conducted in Iraq found that the predominant age group was (20-29) years, stated that the risk factors for UTI in women include: sexual intercourse could lead to minor urethral damage and also transfer bacteria from the perineum to the urethra and bladder which made them more susceptible to UTI [16].

UTI in the current study is frequently seen with increasing gestational age, which coincides with the findings of (Ahmed,2021) showed that pregnancy can temporarily weaken the immune system and make it more susceptible to infections [17]. In our research, despite changes in the etiology of UTIs over recent years, *E. coli* emerged as the most common urinary pathogen encoun-

tered. These findings correlate strongly with numerous studies conducted both regionally and globally. Specifically, our study found that *E. coli* was the most common bacteria isolated from UTIs, at a rate of 50%, which aligns with Abbood (2024) who reported the same rate in Baghdad, Iraq reported the rate of *E. coli* (50%) [18]. According to (Jalil and Atbee 2022) findings from 82 (68.3%) urine samples revealed *E. Coli* as the most common pathogen, followed by 38 (31.7%) urine samples containing *K. pneumonia* [19]. A study conducted in Lebanon found that the most common organisms causing UTI were *E.coli* (67.1%), *klebsiella pneumonia* (10%), and *Proteus mirabilis* (3.7%) [20]. A study on patients with community-acquired UTI in Libya found that *E.coli* was the most frequently isolated organism and occurred in (66.7%) of patients [21]. Another study was done in Iraq showed that *E.coli* were found to be the most common cause of UTIs [22].

One reason for *E.coli* dominance over other bacterial species that cause UTIs is that it is part of the normal flora in the intestines, where it can enter the urinary tract and cause infection due to its possession of virulence factors such as fimbriae were utilized to bind to mannose-rich receptors on bladder epithelial cells. Which increases their persistence in the urinary tract, P pili facilitated attachment to glycolipid receptors in the kidneys, contributing to the development of pyelonephritis. This strong adhesion capability distinguished *E. coli* from many other bacteria associated with UTIs [17]. Not only did *E. coli* adhere to the cells, but they were able to induce cell lysis and inflammation by secreting toxins such as hemolysin (HlyA) which stretch tissue invasion and immune evasion [23]. The cytotoxicity of hemolysin enabled this bacterium to break through epithelial barriers and infect the underlying tissues. They also contributed to synergistic inhibition of the immune response during bacterial infection by altering host signaling pathways. In addition, *E. coli* also depended on immune evasion strategies to maintain infections such as producing capsules made of K antigens. This capsule protected the bacterium from phagocytosis and complement-mediated killing thereby aiding it in survival within the urinary tract. Biofilms provide physical and chemical barriers that protect the bacteria from the immune system [24].

In order to investigate the hypothesis that NLRP3 is essential for host defense against *E. coli* UTI, the present study investigates the relation among the measuring the soluble form of NLRP3 in sera of UTI patients with positive culture. Present data indicated an increase in the concentration of NLRP3 compared to the control; this result is in agreement with Verma *et al*, (2020) [25], who showed a high significant concentration of NLRP3 in the sera of

UTI patients, which is higher than the level of the healthy group. Demirel *et al*, (2020) referred that, the NLRP3 inflammasome has been linked to the severity of uropathogenic *Escherichia coli* (UPEC)-mediated urinary tract infection [26]. UPEC hemolysin can induce the formation of the NLRP3 inflammasome by initiating deubiquitylation of NLRP3, whereas proHlyA failed to do so.

NLRP3 levels are elevated in UPEC-infected patients, which could be a contributing factor to the development of this disease. Hughes *et al*, (2016) found that the NLRP3 inflammasome plays a key role in the initiation and advancement of inflammation, bladder outlet obstruction, and bladder dysfunction in female mice and found that inhibiting inflammasomal activation (NLRP3) can lower bladder inflammation by directly influencing IL-1 β and IL-18 secretion levels [27]. It could be due to the inhibition of functional changes associated with bladder inflammation (voiding frequency and volume) mediated by the NLRP3 inflammasome.

Present data indicated an increase in the concentration of NLRC4 comparable to the control; this result is in agreement with Verma *et al*, (2020) who showed a high significant concentration of NLRC4 in the serum of UTI patients, which is higher than the level of the healthy group [25]. UPEC carries flagellin and a type 3 secretion system for survival and host invasion, which can effectively activate the NLRC4 inflammasome. NAIP5 and NAIP6 detect the presence of flagellin in the cytosol, whereas NAIP1 and NAIP2 detect bacterial needle and inner rod T3SS proteins, respectively [28]. Rod proteins from the T3SS apparatus have a secondary structure similar to the flagellin D0 domain, which is responsible for ligand binding. This function is important for the co-oligomerization of NAIPs with the NLR family, including NLRC4, and explains the molecular basis for ligand detection and inflammasome complex formation [29].

Upregulated NLRC4 expression could be linked to the presence of flagellin as a virulence factor in UPEC strains, which allows them to progress through the human urinary system [25]. The exact mechanism of the NLRC4 inflammasome expression remains unknown. The involvement of NLRC4 inflammasomes in blood samples of UPEC-infected UTI patients. Increased gene expression, protein expression, and higher levels of pro-inflammatory cytokines in UTI patients may be regarded as risk factors for UTI progression.

Current results revealed that there was a significant increase of AIM2 in sera of UTI patients compared with the control. According to Inouye *et al.*, (2018) showed that the AIM2 inflammasome may be activated by uropathogenic bacterial infections that enter the cytoplasm by type 3 secretion system (

AIM2 is a cytoplasmic sensor that can recognize double-stranded DNA (dsDNA), typically from pathogens or damaged host cells [1]. *E. coli* bacteria incorporate into the urinary tract and expel their DNA out to the environment [31]. AIM2 senses this bacterial DNA and activates the immune system. The inflammatory response might cause increased levels of AIM2 in the bloodstream among people suffering from urinary tract infections. AIM2 levels in the serum of patients suffering from UTI can be affected by this inflammatory response. Several mechanisms might also explain the increase in AIM2 levels in the serum of UTI patients: Released directly from the activated cell(s): When AIM2 is activated when it binds to bacterial DNA it may get released from the cells into the bloodstream, hence increasing the serum levels [32]. Induced production occurs when an inflammatory response is triggered by AIM2. During this time, AIM2 can also be produced or synthesized in increased amounts by other cells in the body [32].

IL-1 β is one of the first cytokines that are released during the inflammatory process directly after some infection occurs. If *E. coli* asserts an infection in the urinary tract, IL-1 β would usually be produced and injected at once to attract phagocytic cells such as neutrophils and monocytes to the focus of infection. This helps in the clearance of the bacteria but also results in a systemic increase in IL-1 β levels, which can be detected in the sera [26].

Present data indicated an increase in the concentration of IL- 1 β compared to the control this result is in agreement with Asker and Ali (2022); Kasid *et al*, (2023); Al-Saowdy and Abbas, (2024) showed a significantly high concentration of IL- 1 β in the sera of UTI patients [34, 35,36]. Kannian *et al.*, (2020) referred that IL-1 β has recently been linked to the severity of uropathogenic *Escherichia coli* (UPEC)-mediated urinary tract infection [37]. Human neutrophils' antimicrobial activity against Uropathogenic *Escherichia coli* (UPEC) is regulated by the release of IL-1 β from them when exposed to UPEC (Demirel *et al*, 2020) [26]. According to Engelsöy *et al*, (2019) UPEC carrying virulence factors such as pyelonephritis-associated pili (pap), type-1 fimbriae (fmH), α -hemolysin (hlyA) and Toll/interleukin-1 receptor domain containing protein C (TcpC), increase the production of IL-1 β from various cell types *E. coli*, especially uropathogenic strains (UPEC), can ignite the NLRP3 inflammasome activation in immune cells like macrophages for example [38]. These inflammasomes are capable of getting

hold of bacterial invaders such as lipopolysaccharide (LPS) components, bacterial toxins, or simply invasive bacteria. Once these are activated, the inflammasomes can provoke the cleavage of pro-IL-1 beta to its active form which is later released into the bloodstream during an inflammatory response [4].

Urinary tract infections (UTIs) have been shown to damage the epithelial tissues of the urinary tract, as well as the bladder's epithelium. This damage can trigger immune cells to produce more interleukin-1 beta (IL-1 β) to assist in tissue repair. Once the tissue is ruptured, it releases danger-associated molecular patterns (DAMPs), which further elevate the levels of inflammasomes and enhance IL-1 β production [34]. Additionally, there is a reduced likelihood of immune cell infiltration at the sites of infection. Recent data demonstrates a significant increase in serum levels of interleukin-18 (IL-18) in patients with UTIs.

Comparably with control and this was also coincident with the result of Asker and Ali (2022) whom showed a high significant concentration of IL-18 in the serum of UTI patients [34]. This result does not contradict the result of the study of (Shaker *et al.*, 2023) which stated that the serum IL-18 level in patients with glomerulonephritis (which is a type of urinary tract infection) is higher compared to healthy controls [39].

UPEC, possess various virulence factors such as fimbriae and toxins that help them adhere to the urothelium and stimulate immune responses [40], these virulence factors trigger the activation of immune cells and pro-inflammatory pathways, leading to elevated IL-18 production.

In UTI, urothelial cells (lining of the urinary tract) are directly exposed to *E. coli*, which can stimulate them to release IL-18 as part of their innate immune response to infection [41]. IL-18 also amplifies the recruitment and activation of neutrophils, key immune cells in UTIs. Neutrophil-mediated responses are important for clearing bacteria but can also contribute to excessive inflammation, raising IL-18 levels further [42].

The current study showed that there were no significant differences ($p>0.05$) in MCP-1 levels between patients and control. This result agreement the result of the study of (Verma *et al.*, 2019) which stated no significant difference was observed in the expression of MCP-1 in UT patients [25]. The body may deliberately reduce MCP-1 levels as a protective mechanism to prevent overwhelming inflammation. MCP-1 is involved in recruiting immune cells to infection sites, and if too many immune cells accumulate, it could result in significant inflammation and damage to the urinary tract tissues [43].

Decrease level of MCP-1 (Monocyte Chemoattractant Protein-1) in the sera of UTI patients caused by Uropathogenic *E. coli* (UPEC) can utilize several

mechanisms to avoid the immune system [44], involving suppressing the production of key cytokines like MCP-1. *E. coli* inhibits the recruitment of immune cells, involving monocytes and macrophages, allowing the bacterium to keep in the urinary tract.

During chronic or recurrent UTIs the immune response may become improperly regulated within the immunological process and down-regulate inflammatory pathways by default. This may result in the downregulation of MCP-1 as part of the mechanism to curb inflammation to avoid extensive tissue destruction due to an excessive immune response [45]. Virulence factors such as α -hemolysin (HlyA) and toxins released by *E. coli* suppress the signaling pathways that mediate MCP-1 production, leading to ineffective inhibition of medullary congestion. In this way, the pathogen escapes the immune response by effectively lowering chemotactic signals that would call for immune cells to migrate to the biological focus of an infection [46]. In active, prolonged, or recurrent infections, the immune system could be less active, resulting in a state called immune exhaustion. This results in lower levels of immune mediators like MCP-1, as the body is less capable of sustaining a robust immune response.

The low level of MCP-1 also may impair the recruitment of important immune cells including macrophages and monocytes [47], which result in an inability of the immune system to effectively clear the *E. coli* infection and may lead to persistent or recurrent UTIs.

Conclusion

E. coli is the most common species among the bacteria UTI patients of Basrah province. Elevated level of innate immune receptors (NLRP3, NLRC4, AIM2) and inflammatory cytokines (IL-1 β and IL-18) in sera of UTI patients as a possible candidate marker for UTI. MCP in sera can't be used as a potential marker in UTI patient's marker. There is a positive correlation between NLRP3, NLRC4, AIM2, IL-1 β , and IL-18 in sera and *E. coli* of UTI patients. Further study on exploring the role of MCP-1 in modulating immune responses in UTIs, especially its interactions with other cytokines and receptors.

References

1. Russell, S., Harrison, J. K., Olson, B., Lee, H. J., O'Brien, V. P., Xing, X., Livny, J., Yu, L., Roberson, E. D. O., Bomjan, R., Fan, C., Sha, M., Estfanous, S., Amer, A. O., Colonna, M., Stappenbeck, T. S., Wang, T., Hannan, T. J., & Hultgren, S. J. (2023). Uropathogenic *Escherichia coli* infection-induced epithelial trained immunity impacts urinary tract disease outcome. *Nature Microbiology*, 8(5), 875–888.

2. Kaur, N., Agarwal, A., Grover, M., & Singh, S. (2022). *Uropathogenic Escherichia coli. Enterobacteria*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102525>
3. Korbel, L., Howell, M., & Spencer, J. D. (2017). The clinical diagnosis and management of urinary tract infections in children and adolescents. *Paediatrics and International Child Health*, 37(4), 273–279. <https://doi.org/10.1080/20469047.2017.1382046>
4. Lindblad, A., Wu, R., Persson, K., & Demirel, I. (2023). The role of NLRP3 in regulation of antimicrobial peptides and estrogen signaling in UPEC-infected bladder epithelial cells. *Cells*, 12(18), 2298. <https://doi.org/10.3390/cells12182298>. EDN: <https://elibrary.ru/GFTUHI>
5. Schwaderer, A. L., Rajadhyaksha, E., Canas, J., Saxena, V., & Hains, D. S. (2024). Intercalated cell function, kidney innate immunity, and urinary tract infections. *Pflügers Archiv □ European Journal of Physiology*, 476(4), 565–578. <https://doi.org/10.1007/s00424-024-02905-4>. EDN: <https://elibrary.ru/RTGFBH>
6. Ching, C., Schwartz, L., Spencer, J. D., & Becknell, B. (2019). Innate immunity and urinary tract infection. *Pediatric Nephrology*, 35(7), 1183–1192. <https://doi.org/10.1007/s00467-019-04269-9>. EDN: <https://elibrary.ru/YKLBIY>
7. Naskar, M., & Choi, H. W. (2024). A dynamic interplay of innate immune responses during urinary tract infection. *Immune Network*, 24(4), 1–16.
8. Cao, S., Gao, S., Ni, C., Xu, Y., Pang, B., Zhang, J., Zhang, Y., Wang, Y., Geng, Z., Li, S., Zhao, R., Han, B., Cui, X., & Bao, Y. (2024). Study on the therapeutic mechanism of HJ granules in a rat model of urinary tract infection caused by *Escherichia coli*. *Journal of Ethnopharmacology*, 328, 118056. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118056>. EDN: <https://elibrary.ru/AULBQY>
9. Dib, P. R. B., Quirino-Teixeira, A. C., Merij, L. B., Pinheiro, M. B. M., Rozini, S. V., Andrade, F. B., & Hottz, E. D. (2020). Innate immune receptors in platelets and platelet-leukocyte interactions. *Journal of Leukocyte Biology*, 108(4), 1157–1182. <https://doi.org/10.1002/JLB.4MR0620-701R>. EDN: <https://elibrary.ru/WWYXZZ>
10. Nicolle, L. E., Gupta, K., Bradley, S. F., Colgan, R., DeMuri, G. P., Drekonja, D., Eckert, L. O., Geerlings, S. E., Köves, B., Hooton, T. M., Juthani-Mehta, M., Knight, S. L., Saint, S., Schaeffer, A. J., Trautner, B., Wullt, B., & Siemieniuk, R. (2019). Clinical practice guideline for the management of asymptomatic bacteriuria: 2019 update by the Infectious Diseases Society of America. *Clinical Infectious Diseases*, 68(10), 83–110. <https://doi.org/10.1093/cid/ciz021>
11. Wagenlehner, F. M. E., Bjerklund Johansen, T. E., Cai, T., Koves, B., Kranz, J., Pilatz, A., & Tandogdu, Z. (2020). Epidemiology, definition and treatment of complicated urinary tract infections. *Nature Reviews Urology*, 17(10), 586–600. <https://doi.org/10.1038/s41585-020-0362-4>. EDN: <https://elibrary.ru/NREEHB>

12. Kamel, H. F., & Ali, G. B. (2024). Possible association between *Trichomonas vaginalis* and recurrent urinary tract infections. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22(1), 2572–2581. <https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.1.00194>. EDN: <https://elibrary.ru/NORUMH>
13. Alfetlawi, B., & Jasim, A. (2023). Determining the prevalence of upper and lower urinary tract infections, pathogens and their antibiotic susceptibility profile for adult patients in Al-Diwaniya, Iraq [Conference paper]. *Iraqi Journal of Pharmaceutical Sciences*, 31(Suppl.), 86–91. <https://doi.org/10.31351/vol31issuppl.pp86-91>. EDN: <https://elibrary.ru/JOJORC>
14. Omwenga, E. O., Wanja, F., Ngugi, C., Maina, J., & Kiiru, J. (2021). Urinary tract infection among adults seeking medicare at Kiambu Level 5 Hospital, Kenya: Prevalence, diversity, antimicrobial susceptibility profiles and possible risk factors. *Advances in Microbiology*, 11, 360–383.
15. Assafi, M., Ali, F., Polis, R., Sabaly, N., & Qarani, S. (2021). An epidemiological and multidrug resistance study for *E. coli* isolated from urinary tract infection (three years of study). *Baghdad Science Journal*, 19(1), 5–17.
16. Alhamedy, A. J., & Shani, W. S. (2020). Determination of cathelicidin in UTI patients of Basrah province. *Deleted Journal*, 23(02), 182–189.
17. Ansaldi, Y., & de Tejada Weber, B. M. (2023). Urinary tract infections in pregnancy. *Clinical Microbiology and Infection*, 29(10), 1249–1253. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2022.08.015>. EDN: <https://elibrary.ru/XZVVQY>
18. Abbood, S. A. (2024). Isolation and molecular identification of multidrug resistance *Escherichia coli* isolated from patients with urinary tract infections. *Ebsco.com*, 22(1), 36–44.
19. Jalil, M. B., & Al Atbee, M. Y. N. (2022). The prevalence of multiple drug resistance *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* isolated from patients with urinary tract infections. *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, 36(9), 1–7. <https://doi.org/10.1002/jcla.24619>. EDN: <https://elibrary.ru/OZAQQY>
20. Sokhn, E. S., Salami, A., El Roz, A., Salloum, L., Bahmad, H. F., & Ghssein, G. (2020). Antimicrobial susceptibilities and laboratory profiles of *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, and *Proteus mirabilis* isolates as agents of urinary tract infection in Lebanon: Paving the way for better diagnostics. *Medical Sciences*, 8(3), 1–11. <https://doi.org/10.3390/medsci8030032>. EDN: <https://elibrary.ru/QXOWYL>
21. Elzouki, E. M., Eljamay, S. M., & Alshilwi, Y. A. (2024). Isolation and identification of *Escherichia coli* in uropathogenesis. *Derna Academy Journal for Applied Sciences*, 2(2), 95–102.
22. Hasan, T. H., Aljanaby, I. A. J., Al-Labban, H. M. Y., & Aljanaby, A. A. J. (2023). Antibiotic susceptibility pattern of *E. coli* causing urinary tract infection in pregnant women in Al-Najaf Province, Iraq. In *AIP Conference Proceedings*, 2977(1), 1–5.

23. Naskar, M., Parekh, V. P., Abraham, M. A., Alibasic, Z., Kim, M. J., Suk, G., Noh, J. H., Ko, K. Y., Lee, J., Kim, C., Yoon, H., Abraham, S. N., & Choi, H. W. (2023). α -Hemolysin promotes uropathogenic *E. coli* persistence in bladder epithelial cells via abrogating bacteria-harboring lysosome acidification. *PLoS Pathogens*, 19(5), e1011388. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1011388>. EDN: <https://elibrary.ru/ZUWAYW>
24. Trubenová, B., Roizman, D., Moter, A., Rolff, J., & Regoes, R. R. (2022). Population genetics, biofilm recalcitrance, and antibiotic resistance evolution. *Trends in Microbiology*, 30(9), 841–852. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2022.02.005>. EDN: <https://elibrary.ru/SWHXHU>
25. Verma, V., Kumar, P., Gupta, S., Yadav, S., Dhanda, R. S., Thorlacius, H., & Yadav, M. (2020). α -Hemolysin of uropathogenic *E. coli* regulates NLRP3 inflammasome activation and mitochondrial dysfunction in THP-1 macrophages. *Scientific Reports*, 10(1), 12653. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69501-1>. EDN: <https://elibrary.ru/HEOLOO>
26. Demirel, I., Persson, A., Brauner, A., Särndahl, E., Kruse, R., & Persson, K. (2020). Activation of NLRP3 by uropathogenic *Escherichia coli* is associated with IL-1 β release and regulation of antimicrobial properties in human neutrophils. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78651-1>. EDN: <https://elibrary.ru/JNTKNZ>
27. Hughes, F. M., Hill, H. M., Wood, C. M., Edmondson, A. T., Dumas, A., Foo, W.-C., Oelsen, J. M., Rac, G., & Purves, J. T. (2016). The NLRP3 inflammasome mediates inflammation produced by bladder outlet obstruction. *Journal of Urology*, 195(5), 1598–1605. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2015.12.068>. EDN: <https://elibrary.ru/WOWDDP>
28. Karki, R., & Kanneganti, T. D. (2018). The NLRC4 inflammasome requires IRF8-dependent production of NAIPs. *Cell Stress*, 2(6), 144.
29. Hamilton, C., Tan, L., Miethke, T., & Anand, P. K. (2017). Immunity to uropathogens: The emerging roles of inflammasomes. *Nature Reviews Urology*, 14(5), 284–295. <https://doi.org/10.1038/nrurol.2017.25>
30. Inouye, B. M., Hughes, F. M., Sexton, S. J., & Purves, J. T. (2018). The emerging role of inflammasomes as central mediators in inflammatory bladder pathology. *Current Urology*, 11(2), 57–72. <https://doi.org/10.1159/000447196>. EDN: <https://elibrary.ru/YHKGSD>
31. Kumari, P., Russo, A. J., Shivcharan, S., & Rathinam, V. A. (2020). AIM2 in health and disease: Inflammasome and beyond. *Immunological Reviews*, 297(1), 83–95. <https://doi.org/10.1111/imr.12903>. EDN: <https://elibrary.ru/CCGQBC>
32. Sharma, B. R., Karki, R., & Kanneganti, T. (2019). Role of AIM2 inflammasome in inflammatory diseases, cancer and infection. *European Journal of Immunology*,

- 49(11), 1998–2011. <https://doi.org/10.1002/eji.201848070>. EDN: <https://elibrary.ru/AXGDUC>
33. Yu, D., Zheng, S., Sui, L., Xi, Y., He, T., & Liu, Z. (2024). The role of AIM2 in inflammation and tumors. *Frontiers in Immunology*, 15, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1466440>. EDN: <https://elibrary.ru/GQOZYK>
34. Asker, B. A., & Ali, C. I. A. (2022). Correlation between IL-1 β , IL-18 and some hematological variable in uropathogenic E. coli infected UTI patients. *Teikyo Medical Journal*, 45(1), 4695–4705.
35. Kasid, M., AlChalabi, R., & Harith, F. (2023). Association between biofilm formation by U.P.E.C. and serum level of several cytokines. *Revista Bionatura*, 8(CSS 3), 1–8. <https://doi.org/10.21931/RB/CSS/2023.08.03.24>
36. Al-Saowdy, A. H. Q., & Abbas, I. S. (2024). Investigation of interleukin-1 beta in urinary tract infection patients. *Journal of Pioneering Medical Science*, 13(3), 46–50.
37. Kannian, P., Ashwini, V., Suchithra, S. B., & Sindu, K. B. (2019). Elevated urinary IL-1 β levels in multidrug resistant Escherichia coli and Klebsiella infections. *Inflammation Research*, 69(1), 11–13.
38. Engelsöy, U., Rangel, I., & Demirel, I. (2019). Impact of proinflammatory cytokines on the virulence of uropathogenic Escherichia coli. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01051>. EDN: <https://elibrary.ru/GRLDXE>
39. Shaker, A. M., Mohamed, M. F., Thabet, K. K., Ramzy, T., & Abdelhamid, Y. M. (2023). Serum interleukin-18, kidney injury molecule-1, and the renal resistive index for predicting acute kidney injury in critically ill patients with sepsis. *Saudi Journal of Kidney Diseases and Transplantation*, 34(1), 153–160. https://doi.org/10.4103/sjkd.sjkd_56_22. EDN: <https://elibrary.ru/LCBOLG>
40. Govindarajan, D. K., & Kandaswamy, K. (2022). Virulence factors of uropathogens and their role in host–pathogen interactions. *The Cell Surface*, 8, 100075.
41. Kulkarni, R., Singh, S., & Jeyaseelan, S. (2015). Inflammasomes are critical for the host protection during bacterial urinary tract infection (INM6P.328). *The Journal of Immunology*, 194(1), 193.2–193.2. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.194.Supp.193.2>
42. Ebrahimzadeh, T., Basu, U., Lutz, K. C., Gadhvi, J., Komarovskiy, J. V., Li, Q., Zimmern, P. E., & De, N. J. (2024). Inflammatory markers for improved recurrent UTI diagnosis in postmenopausal women. *Life Science Alliance*, 7(4), 1–11.
43. Liu, Y., Xu, K., Xiang, Y., Ma, B., Li, H., Li, Y., Shi, Y., Li, S., & Bai, Y. (2023). Role of MCP-1 as an inflammatory biomarker in nephropathy. *Frontiers in Immunology*, 14, 1–13.
44. Zhou, Y., Zhou, Z., Zheng, L., Gong, Z., Li, Y., Jin, Y., Huang, Y., & Chi, M. (2023). Urinary tract infections caused by uropathogenic Escherichia coli: Mech-

- anisms of infection and treatment options. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 1–33. <https://doi.org/10.3390/ijms241310537>. EDN: <https://elibrary.ru/CJKQHP>
45. Oberbach, A., Schlichting, N., Blüher, M., Kovacs, P., Till, H., Stolzenburg, J., & Neuhaus, J. (2010). Palmitate-induced IL-6 and MCP-1 expression in human bladder smooth muscle cells provides a link between diabetes and urinary tract infections. *PLOS ONE*, 5(5), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010882>. EDN: <https://elibrary.ru/NZOQFB>
46. Zhang, Z., Wang, M., Zhang, Y., Zhang, Y., Bartkuhn, M., Markmann, M., Hossain, H., Chakraborty, T., Hake, S. B., Jia, Z., Meinhardt, A., & Bhushan, S. (2021). Uropathogenic Escherichia coli virulence factor α -hemolysin reduces histone acetylation to inhibit expression of proinflammatory cytokine genes. *The Journal of Infectious Diseases*, 223(6), 1040–1051.
47. Jin, L., Ghimire, L., Paudel, S., Cai, S., Rangasamy, T., & Jeyaseelan, S. (2018). MCP-1 plays a critical role in neutrophil function and pyroptosis during carbapenem-resistant Klebsiella pneumoniae. *The Journal of Immunology*, 200(1), 17–46.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Zainab Ali Eidan, PhD, Prof., Department of Biology

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

zainabmoha2025@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7009-0164>

Wafaa S. Shani, PhD, Prof., Department of Biology

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

wafaa.shain@uobasrah.edu.iq

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4688-780X>

Muna Abdul-Imam Almazini, PhD, Prof., Department of Biology

College of Science, University of Basrah

Basrah, Iraq

muna.abdul-ima@uobasrah.edu.iq

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9544-1535>

Поступила 13.12.2024

После рецензирования 01.09.2025

Принята 17.09.2025

Received 13.12.2024

Revised 01.09.2025

Accepted 17.09.2025

Земледелие и защита растений / Soil Fertility and Plant Protection

Научная статья

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1431](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1431)EDN: [DKFNZM](https://www.edn.ru/entry/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1431)

Original article

УДК 632.4.01/08: 632.952: 632.95.025.8



Первое сообщение о патогене *Fusarium Curvatum* L. Lombard & Crous микопатоконплекса корневой гнили яблони в России

И.Л. Астапчук^{1,2}, Г.В. Якуба¹, С.В. Федорович², А.В. Елисютикова²,
Н.А. Кузнецова², А.И. Насонов¹

¹ФГБУН «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия», Краснодар, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина», Краснодар, Российская Федерация

Аннотация

В результате маршрутных обследований садов Краснодарского края, в патоконплексе корневой гнили яблони был выделен редкий вид *Fusarium* spp. Штамм был изучен на предмет морфолого-культуральных и генетических характеристик и был идентифицирован как *Fusarium curvatum* L. Lombard & Crous. Факт паразитирования подтвержден с соблюдением постулатов Коха.

Ключевые слова: яблоня домашняя; корневая гниль; *Fusarium curvatum*; полногеномное секвенирование

Для цитирования. Астапчук, И. Л., Якуба, Г. В., Федорович, С. В., Елисютикова, А. В., Кузнецова, Н. А., & Насонов А. И. (2026). Первое сообщение о патогене *Fusarium Curvatum* L. Lombard & Crous микопатоконплекса корневой гнили яблони в России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 207–223. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1431>

First report on the pathogen *Fusarium Curvatum* L. Lombard & Crous of the apple root grain mycopathos complex in Russia

I.L. Astapchuk^{1,2}, G.V. Yakuba¹, S.V. Fedorovich², A.V. Yelisutikova²,
N.A. Kuznetsova², A.I. Nasonov¹

¹North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking, Krasnodar, Russian Federation

²I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

Abstract

As a result of route surveys of the gardens of the Krasnodar Territory, a rare species of *Fusarium* spp. was isolated in the root rot complex of apple trees. After assessing the

morphological, cultural, and genetic characteristics of the monospore culture of the fungus, using the method of whole-genome sequencing, it was identified as *Fusarium curvatum* L. Lombard & Crous. The fact of parasitism was confirmed in accordance with Koch's postulates.

Keywords: domestic apple tree; root rot; *Fusarium curvatum*; whole-genome sequencing

For citation. Astapchuk, I. L., Yakuba, G. V., Fedorovich, S. V., Yelisyutikova, A. V., Kuznetsova, N. A., & Nasonov, A. I. (2026). First report on the pathogen *Fusarium Curvatum* L. Lombard & Crous of the apple root grain mycopathos complex in Russia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 207–223. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1431>

Промышленное садоводство в России играет важную роль в обеспечении страны плодами и ягодами, а также способствует укреплению продовольственной безопасности. С каждым годом возрастает темп закладки новых многолетних насаждений. Так, общая площадь промышленных насаждений в России составляет около 200 тыс. га, при этом ежегодно закладывается от 10 до 15 тыс. га новых садов [4; 5; 7; 8]. Краснодарский край является одним из лидеров по производству плодов и ягод в России.

Болезни сельскохозяйственных растений ежегодно существенно снижают урожайность во всем мире. Корневая гниль древесных растений – опасное заболевание, ее причинами являются различные микромицеты, которые поражают корневую систему, что приводит к ослаблению и гибели дерева [19; 24; 27; 32].

С каждым годом ученые во всем мире обнаруживают все больше новых и ранее неизвестных микроорганизмов, в том числе возбудителей из рода *Fusarium* Link. Это связано с развитием технологий секвенирования ДНК и микроскопии, а также с тем, что многие микроорганизмы обитают в труднодоступных местах [6; 17; 18; 20; 21; 23; 26; 29-32]. Развитие исследований микробиома (совокупности микроорганизмов, населяющих определенную среду, например, почву) позволяет выявлять ранее неизвестные виды, а также их роль в различных процессах, в том числе в патогенезе древесных растений [1-3; 10-11].

Цель исследования – определить видовую принадлежность микромицета *Fusarium* spp. микопатоксикомплекса корневой гнили яблони, классическим и молекулярно-генетическим методами. В задачи исследований входило подтверждение паразитизма у выявленного вида методом Коха. *Научная новизна* заключается в первом обнаружении микромицета *Fusarium curvatum* в микопатоксикомплексе корневой гнили яблони в России.

В 2023 г. методом маршрутных обследований в промышленных садах Краснодарского края были отобраны растения с визуальными признаками корневой гнили: двухлетние саженцы сорта Эвелина. Поврежденные участки корней, а также корневой шейки нарезали на фрагменты размером 1-2 см², промывали в течение 20 минут под проточной водой, затем 2 %-м раствором NaClO в течение 50 с и ополаскивали стерилизованной водой, после чего закладывали на картофельно-глюкозный агар (КГА) в трехкратной повторности. Через 7 дней инкубации при температуре 25 °С наблюдали колонии с обильным ватообразным воздушным мицелием белого, со временем розового цвета. Моноспоровый изолят с помощью методов микроскопии и определительной литературы [9] был идентифицирован как *Fusarium* spp. Штамму был присвоен номер RR23I/1.1 Морфологические и культуральные признаки штамма были изучены на питательных средах: голодный агар, КГА (картофельно-глюкозный агар), КДА (картофельно-декстрозный агар), ОА (овсяной агар), среда Чапека, среда Ниренберга.

Далее была выделена ДНК колоний штамма сорбентным методом на магнитных частицах (ЗАО «Синтол», Москва). Реакционная смесь для постановки одной реакции объемом 25 мкл содержала 2.5 мкл 10X Encyclo buffer, 0.5 мкл смеси dNTP (10 mM каждого), 0.5 мкл 50X Encyclo polymerase Mix (ООО «Евроген», Москва), 5 пМ каждого праймера ITS1 и ITS4, и 50 нг целевой ДНК. Продукты амплификации анализировали методом гель-электрофореза в 2 %-м агарозном геле и 10x TAE буфере. Полученные последовательности размером 490–560 п. о. выделяли из геля с использованием коммерческого набора Cleanup Standard (ООО «Евроген», Москва).

Геномные библиотеки подготавливали с помощью DNA Preparation (M) Tagmentation Kit («Illumina Inc», США). Образцы секвенировали на приборе MiSeq («Illumina Inc», США). Последовательности адаптеров были удалены с помощью Trimmomatic [<https://github.com/timflutre/trimmomatic>], удаление концевых фрагментов низкого качества проводили с использованием Sickle v1.33 software (Version 1.33) [<https://github.com/najoshi/sickle>]. Сборка ридов *de novo* происходила на основе алгоритмов SPAdes v.4.0.0 с использованием функции «careful». Качество сборки проверяли с использованием Checkm2 [<https://github.com/chklovski/CheckM2>]. Для определения видовой принадлежности исследуемых изолятов использовали UFCG (Universal Fungal Core Genes).

Патогенность штамма была оценена в *in vitro* условиях по методике, описанной ранее [11].

По результатам полногеномного секвенирования и сборки генома, штамм под номером RR231/1.1 был отнесен к виду *Fusarium curvatum*. Геном штамма был депонирован в GenBank под номерами: BioProject – PRJNA1254940 и BioSample (NGS) SAMN48128699. Филогенетическое дерево построено с использованием метода максимального правдоподобия на основе объединения набора данных последовательностей, загруженных из GenBank: ITS, USS, TEF, RPB2, TUB2, Actin, McM референсных штаммов [22], с использованием алгоритма FastTree 2.2 [28], с значением бутстрапа 1000. В качестве внешней группы использовался штамм *Fusarium queenslandicum* (рис. 1).

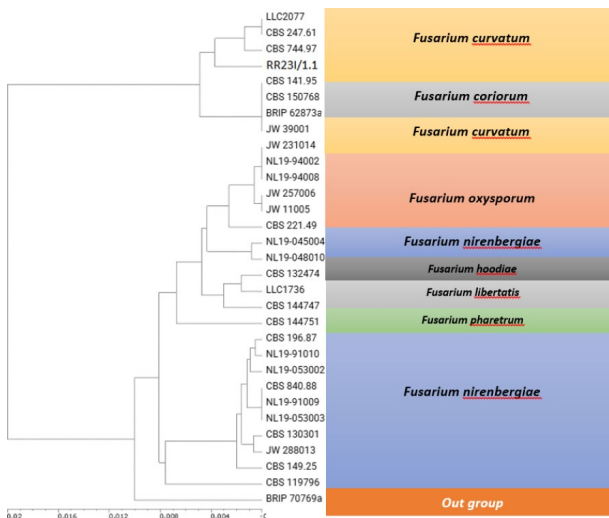


Рис. 1. Филогенетический анализ штамма RR231/1.1 *Fusarium curvatum*

Fig. 1. Phylogenetic analysis of *Fusarium curvatum* strain RR231/1.1

Исследуемый изолят располагается на ветви с высокой степенью поддержки, сформированной штаммами вида *Fusarium curvatum*, с минимальными генетическими расстояниями, что позволяет отнести данный изолят к виду *F. curvatum*.

Геном размером 55.4 Mb, исследуемого изолята *F. curvatum* содержал 6 803 скэффолдов, при общем числе контигов 6,837. Геном был аннотирован по коргенам с помощью инструмента Busco [<http://arxiv.org/abs/2106.11799>]. Контаминация генома отсутствовала. Статистические данные по сборке генома приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики сборки генома *Fusarium curvatum*
Table 1. Characteristics of the *Fusarium curvatum* genome assembly

Genome size	55.4 Mb
Total ungapped length	55.4 Mb
Number of scaffolds	6,803
Scaffold N50	347.9 kb
Scaffold L50	44
Number of contigs	6,837
Contig N50	331.9 kb
Contig L50	47
GC percent	47.5
Genome coverage	33x
Assembly level	Scaffold

Чистая культура гриба депонирована во всероссийской коллекции эубиотических и эпифитных микроорганизмов-КЭЭМ г. Краснодар, Россия под номером KubGAU F-282.

Морфолого-культуральные признаки микромицета соответствовали литературе [22]. Поверхность колоний от бледно-розовой на КГА до бело-серой на других средах, воздушный мицелий – обильный, хлопьевидный; края колоний неправильные, нитевидные (рис. 2). На всех питательных средах гифы – гиалиновые, гладкостенные, без хламидоспор. Обратная сторона бледно-розовая, без диффузионного пигмента.

Средняя радиальная скорость роста колонии штамма при 24 °С была 3,1–4,5 мм/сут. Диаметр мицелия штамма на 7-е сутки составлял, в зависимости от питательной среды, от 5,3 см (КГА) до 8,2 см (среда Ниренберга, табл. 2).

Таблица 2.

Влияние питательных сред на линейный рост колоний *Fusarium curvatum*

Table 2. Effect of culture media on the linear growth of *Fusarium curvatum* colonies

Линейный рост колоний	Питательные среды					
	ГА	КГА	КДА	ОА	Среда Чапека	Среда Ниренберга
Диаметр, см	7,2±1,4	5,3±0,1	9,6±0,7	6,0±0,3	9,7±0,0	8,2±0,5
Высота, см	0,0±0,0	0,3±0,2	0,4±0,2	0,4±0,1	0,8±0,0	0,3±0,2

Спорулирующая способность у штамма *F. curvatum* средняя – $2,8 \times 10^2$ в мл суспензии. Макроконидии наблюдали серповидной формы, размером от 37,9 до 51,5 мкм, большинство из которых имели 2 перегородки. Окра-

ска в массе – светлая. Выраженность ножки: не выражена. Микроконидии были эллипсоидной формы, размером от 20,1 до 25,3 мкм.

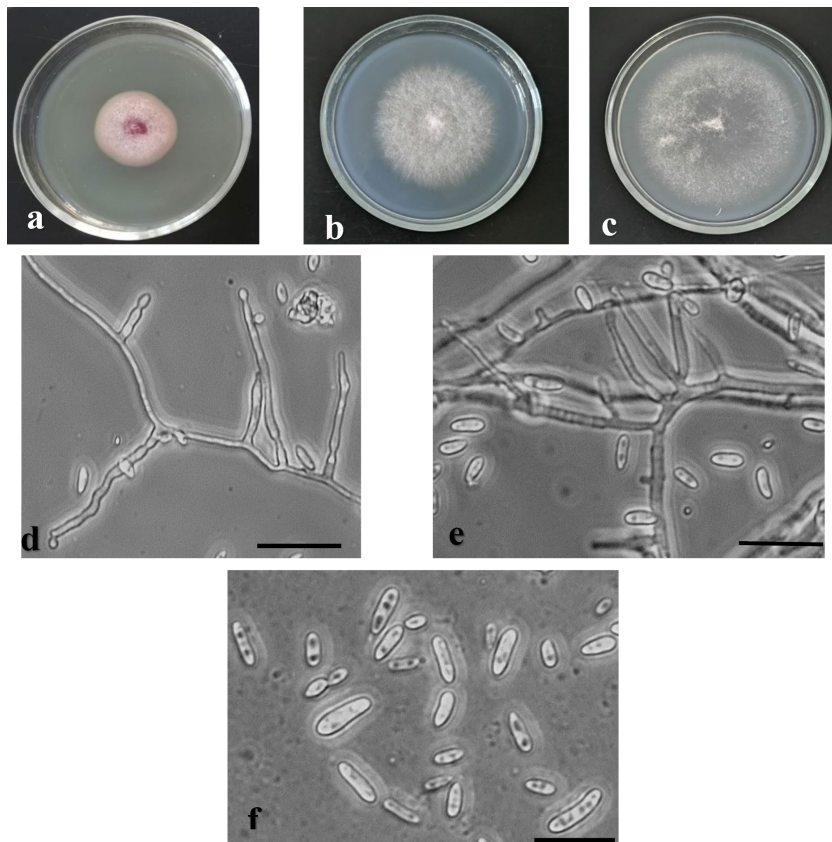


Рис. 2. *Fusarium curvatum* (RR23I/1.1) Внешний вид колонии на питательных средах через 7 дней инкубации при 24°C и непрерывном освещении, а также её микроструктуры. а – КГА, b – среда Чапека; с – КДА; d-e – полифиалиды с цепочками микроконидий; f – микро и макроконидии (КГА) (Bar = 20 мкм)

Fig. 2. *Fusarium curvatum* (RR23I/1.1). Appearance of the colony on culture media after 7 days of incubation at 24°C under continuous illumination, as well as its microstructure.
a – KGA, b – Čapek medium; c – KDA; d-e – polyphialides with chains of microconidia;
f – micro- and macroconidia (KGA) (Bar = 20 µm)

Патогенность штамма была оценена в *in vitro* условиях, через 2 месяца после инокуляции данным штаммом наблюдали полную гибель зара-

женных подвоев, в результате отмирания корневой системы: потемнение и сильное поражение корней, и базальной части стебля, перетяжки на корнях, и отсутствие боковых корней. Подвои в контрольном варианте оставались бессимптомными. Возбудитель был повторно выделен из пораженных корней на КГА и таким образом, была доказана патогенность штамма *F. curvatum*, выделенного из корней яблони с симптомами корневой гнили.

Патоген был подробно описан в 2019 году в работе «Эпитипизация *Fusarium oxysporum* – устранение таксономического хаоса» группой ученых центра биоразнообразия Naturalis и института биоразнообразия грибов Й. Вестердейкав [22]. В 2021 году в рамках Нидерландского проекта «Citizen science» были обнаружены в городских почвах новые фузариоидные грибы (*Nectriaceae*, *Sordariomycetes*), в том числе и штамм *F. curvatum* [14]. О вирулентности описанного вида мало сведений для различных культур. Однако, по последним данным известно, что он вызывает рак древесины, корневую и базальную гниль виноградной лозы в питомниках Турции [13], гибель *Dendrobium officinale* (эпифитная орхидея) в Китае [25], пятнистость листьев вишни [34]. Также он входит в комплекс видов, вызывающих сосудистое увядание салата-латука [15; 33] и увядание ямса (*Dioscorea*) в южно-центральной части Китая [16]. В России штамм *F. curvatum* был выделен из корней пораженного фузариозным увяданием куста томата [12].

Имеются сведения, что данный вид может вызывать грибковый кератит, который, представляет собой серьёзную проблему для здравоохранения во всём мире. Ежегодно в тропических и субтропических регионах от данного заболевания страдают более миллиона человек [26].

Результаты данного исследования показывают значимость как фитосанитарного мониторинга, так и поиска защитных мероприятий против новых возбудителей патоконплекса заболеваний яблони. Насколько нам известно, это первое сообщение о фузариозной корневой гнили яблони, вызванной *F. curvatum*, в России.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-26-20114. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-20114, <https://rscf.ru/project/24-26-20114/>

Список литературы

1. Агафонова, В. А., & Попова, В. П. (2021). Перспективы применения методов почвенной метагеномики для определения качества почв садовых ценозов. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, 67, 203–225. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2021-1-67-203-225>. EDN: <https://elibrary.ru/KRAQLM>
2. Альсаед, Н., & Селицкая, О. В. (2022). Особенности микологической компоненты микробиома почв при монокультуре и в севообороте. *Естественные и технические науки*, 7, 59–68. <https://doi.org/10.25633/ETN.2022.07.02>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJCHGM>
3. Нур, А., Селицкая, О. В., Поздняков, Л. А., Заверткин, И. А., & Шубина, Е. А. (2024). Оценка длительного воздействия бессменного выращивания различных сельскохозяйственных культур на микробные сообщества почвы. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, 2, 5–24. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-2-5-24>. EDN: <https://elibrary.ru/DXVZVP>
4. Велибекова, Л. А. (2023). Пути усиления позиций России в мировом производстве свежей и переработанной плодово-ягодной продукции. В *Современные тренды и приоритеты устойчивого развития регионов: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук* (с. 217–223). Махачкала: Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН.
5. Зайнутдинов, З. З., & Аминова, Е. В. (2024). Взаимосвязь величины и качества урожая плодов яблони и приёмы их повышения в условиях Юга европейской России. *Субтропическое и декоративное садоводство*, 90, 46–54. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2024-90-46-54>. EDN: <https://elibrary.ru/VLEXMV>
6. Литовка, Ю. А., Чен, Х., Ли, В., & Павлов, И. Н. (2023). Грибы рода *Fusarium*, ассоциированные с древесными растениями на территории России. *Сибирский экологический журнал*, 4, 547–563. <https://doi.org/10.15372/SEJ20230411>. EDN: <https://elibrary.ru/PCLRDN>
7. Мережко, О. Е., & Аминова, Е. В. (2023). Анализ современного сортимента и динамики выращивания яблони (*Malus domestica* Borkh.) в садоводстве России. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 16(3), 78. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_94. EDN: <https://elibrary.ru/RJQVII>
8. Остапчук, Т. В., Хежев, А. М., Свиридова, Л. А., Джанчаров, Т. М., & Снегирев, Д. В. (2023). Изменение объёмов глобального производства и международной торговли яблоками. *International Agricultural Journal*, 66(1), 33. https://doi.org/10.55186/25876740_2023_7_1_33. EDN: <https://elibrary.ru/DHZUQU>
9. Саттон, Д., Фотергил, А., & Ринальди, М. (2001). *Определитель патогенных и условно-патогенных грибов*. Москва: Мир.

10. Черников, Е. А., Астапчук, И. Л., Федорович, С. В., Попова, В. П., & Худокормов, А. А. (2023). Влияние длительной монокультуры сада на агрохимические и микробиологические показатели чернозёмов выщелоченных. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, 82(4), 201–218. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2023-4-82-201-218>. EDN: <https://elibrary.ru/TOZKUI>
11. Федорович, С. В., Астапчук, И. Л., Якуба, Г. В., & Насонов, А. И. (2024). Идентификация *Fusarium sporotrichioides*, возбудителя корневой гнили яблони домашней, и оценка его токсиногенности и патогенности. *Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*, 38, 59–64. <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2024-38-59-64>. EDN: <https://elibrary.ru/RJEGSL>
12. Ярмеева, М. М., Чудинова, Е. М., Еланская, А. С., Кокаева, Л. Ю., & Еланский, С. Н. (2025). Грибы рода *Fusarium* на растениях томата в России. *Микология и фитопатология*, 59(2), 169–180. <https://doi.org/10.31857/S0026364825020058>. EDN: <https://elibrary.ru/SQOXY>
13. Akgül, D. S., Önder, S., Savaş, N. G., Yıldız, M., Bülbül, İ., & Özarslandan, M. (2024). Molecular identification and pathogenicity of *Fusarium* species associated with wood canker, root and basal rot in Turkish grapevine nurseries. *Journal of Fungi*, 10(7), 444. <https://doi.org/10.3390/jof10070444>. EDN: <https://elibrary.ru/NLMTZL>
14. Crous, P. W., Hernández-Restrepo, M., Van Iperen, A. L., Starink-Willemse, M., Sandoval-Denis, M., & Groenewald, J. Z. (2021). Citizen science project reveals novel fusarioid fungi (Nectriaceae, Sordariomycetes) from urban soils. *Fungal Systematics and Evolution*, 8(1), 101–127. <https://doi.org/10.3114/fuse.2021.08.09>. EDN: <https://elibrary.ru/XKSGQU>
15. Claerbout, J., Van Poucke, K., Mestdag, H., Delaere, I., Vandeveld, I., Venneman, S., & Höfte, M. (2023). *Fusarium* isolates from Belgium causing wilt in lettuce show genetic and pathogenic diversity. *Plant Pathology*, 72(3), 593–609. <https://doi.org/10.1111/ppa.13668>. EDN: <https://elibrary.ru/AGVDFU>
16. Dongzhen, F., Xilin, L., Xiaorong, C., Wenwu, Y., Yunlu, H., Yi, C., & Chunsheng, G. (1964). *Fusarium* species and *Fusarium oxysporum* species complex genotypes associated with yam wilt in South-Central China. *Front Microbiol*, 11, 1964. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01964>. EDN: <https://elibrary.ru/NYKNWI>
17. Jang, Y., Yi, H., Maharjan, R., Jeong, M., & Yoon, Y. (2022). First report of root rot caused by *Fusarium armeniacum* on soybean in Korea. *Plant Disease*, 106(4), 1306. <https://doi.org/10.1094/pdis-11-20-2319-pdn>. EDN: <https://elibrary.ru/VDZXUU>
18. Jasarevic, M., Catalani, A., Morales-Rodríguez, C., Tati, M., & Chilosi, G. (2022). First report of *Fusarium brachygibbosum* causing rots on potato tubers in Italy.

- Journal of Plant Pathology*, 104(4), 1591–1591. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01221-z>. EDN: <https://elibrary.ru/MHQOUA>
19. Joshi, N. A., & Fass, J. N. (2011). *Sickle: A sliding-window, adaptive, quality-based trimming tool for FastQ files* (Version 1.33).
 20. Lee, S. H., Shin, H., Lee, H. I., & Lee, S. (2022). The control efficacy of sodium hypochlorite against violet root rot caused by *Helicobasidium mompa* in apple. *The Plant Pathology Journal*, 38(5), 513–521. <https://doi.org/10.5423/ppj.oa.04.2022.0057>. EDN: <https://elibrary.ru/KBKSHS>
 21. Litovka, Y. A., Chen, H., Li, W., & Pavlov, I. N. (2023). Fusarioid fungi associated with woody plants in Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 16(4), 528–540. <https://doi.org/10.1134/s1995425523040066>. EDN: <https://elibrary.ru/HZVYPW>
 22. Lombard, L., Sandoval-Denis, M., Lamprecht, S. C., & Crous, P. W. (2019). Epi-typification of *Fusarium oxysporum*—clearing the taxonomic chaos. *Persoonia—Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 43(1), 1–47. <https://doi.org/10.3767/persoonia.2019.43.01>. EDN: <https://elibrary.ru/FIXTEX>
 23. Ma, K., Wang, Y., Wang, J., Zhang, Y., & Gao, J. (2023). First report of ginseng root rot caused by *Fusarium subglutinans*. *Journal of General Plant Pathology*, 89(5), 296–303. <https://doi.org/10.1007/s10327-023-01136-2>. EDN: <https://elibrary.ru/JRPHOQ>
 24. Mannai, S., Benfradj, N., & Boughalleb-M’Hamdi, N. (2024). Occurrence of *Globisporangium* and *Phytophthora* species associated with apple and peach seedlings decline in Tunisian nurseries. *Journal of Plant Pathology*, 106(2), 643–655. <https://doi.org/10.1007/s42161-024-01600-8>. EDN: <https://elibrary.ru/KGEOIA>
 25. Mirghasempour, S. A., Michailides, T., Chen, W., & Mao, B. (2022). *Fusarium* spp. associated with *Dendrobium officinale* dieback disease in China. *Journal of Fungi*, 8(9), 919. <https://doi.org/10.3390/jof8090919>. EDN: <https://elibrary.ru/FWPRJD>
 26. Monteiro, R. C., Yu, M. C. Z., Dolatabadi, S., Hagen, F., Sandoval-Denis, M., Francisco, E. C., & Rodrigues, A. M. (2025). Molecular tracking of emerging *Fusarium* species in keratitis: *F. veterinarium*, *F. contaminatum*, and *F. curvatum*. *Mycopathologia*, 190(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s11046-025-00929-7>. EDN: <https://elibrary.ru/JKMYYA>
 27. Nyoni, M., Mazzola, M., Wessels, J. P. B., & McLeod, A. (2021). Phosphonate treatment effects on *Phytophthora* root rot control, phosphite residues and *Phytophthora cactorum* inoculum in young apple orchards. *Plant Disease*, 105(12), 3835–3847. <https://doi.org/10.1094/pdis-01-21-0067-re>. EDN: <https://elibrary.ru/FZUMIF>
 28. Price, M. N., Dehal, P. S., & Arkin, A. P. (2010). FastTree 2—approximately maximum-likelihood trees for large alignments. *PloS One*, 5(3), e9490. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009490>. EDN: <https://elibrary.ru/NYZTML>
 29. Romero-Arenas, O., Martínez-Salgado, S. J., Rivera, A., Huerta-Lara, M.,

- Laug-García, B., & Villa-Ruano, N. (2022). First report of basal rot caused by *Fusarium equiseti* in onion crops from Puebla, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4210>. EDN: <https://elibrary.ru/KRPOVJ>
30. Sano, T., Mizuki, M., Matsui, K., Takahashi-Ando, N., Kimura, M., & Nakajima, Y. (2022). First report of *Fusarium armeniacum* isolated from rice in Aichi Prefecture. *JSM Mycotoxins*, 72(1), 1–3. <https://doi.org/10.2520/myco.72-1-1>. EDN: <https://elibrary.ru/QMRESG>
31. Sun, X., Jiang, S., Hong, H., Zhang, M., Xin, Z., Wu, B., & Xin, X. (2024). First report of fruit rot caused by *Fusarium luffae* in cherry tomato in China. *Plant Disease*, 108(3), 788. <https://doi.org/10.1094/pdis-05-23-1019-pdn>. EDN: <https://elibrary.ru/KAKUED>
32. Villanueva, O., & Ellouze, W. (2023). First report of a Canadian isolate of *Phytophthora vexans* causing root rot disease on apple and peach under laboratory conditions. *New Disease Reports*, 48(1). <https://doi.org/10.1002/ndr2.12195>. EDN: <https://elibrary.ru/DQHxDA>
33. Waqas, M., Gilardi, G., Guarnaccia, V., & Spadaro, D. (2025). Host range and molecular characterization of the four races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*. *Plant Disease*. <https://doi.org/10.1094/pdis-07-24-1505-re>. EDN: <https://elibrary.ru/KUUXPP>
34. Zhou, Y., Zhang, W., Li, X., Ji, S., Chethana, K. W. T., Hyde, K. D., & Yan, J. (2022). *Fusarium* species associated with cherry leaf spot in China. *Plants*, 11(20), 2760. <https://doi.org/10.3390/plants11202760>. EDN: <https://elibrary.ru/OLRAMV>

References

1. Agafonova, V. A., & Popova, V. P. (2021). Prospects for the application of soil metagenomics methods to assess the quality of soils in garden cenoses. *Fruit Growing and Viticulture of the South of Russia*, 67, 203–225. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2021-1-67-203-225>. EDN: <https://elibrary.ru/KRAQLM>
2. Alsaed, N., & Selitskaya, O. V. (2022). Features of the mycological component of the soil microbiome under monoculture and crop rotation. *Natural and Technical Sciences*, 7, 59–68. <https://doi.org/10.25633/ETN.2022.07.02>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJCHGM>
3. Nur, A., Selitskaya, O. V., Pozdnyakov, L. A., Zavertkin, I. A., & Shubina, E. A. (2024). Assessment of the long-term impact of continuous cultivation of various agricultural crops on soil microbial communities. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2, 5–24. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-2-5-24>. EDN: <https://elibrary.ru/DXVZVP>

4. Velibekova, L. A. (2023). Ways to strengthen Russia's position in global production of fresh and processed fruit and berry products. In *Modern trends and priorities for sustainable development of regions: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences* (pp. 217–223). Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences.
5. Zaynutdinov, Z. Z., & Aminova, E. V. (2024). The relationship between the quantity and quality of apple fruit yield and methods to improve them in the conditions of the South of European Russia. *Subtropical and Ornamental Horticulture*, 90, 46–54. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2024-90-46-54>. EDN: <https://elibrary.ru/VLEXMV>
6. Litovka, Y. A., Chen, H., Li, W., & Pavlov, I. N. (2023). Fungi of the genus *Fusarium* associated with woody plants in Russia. *Siberian Ecological Journal*, 4, 547–563. <https://doi.org/10.15372/SEJ20230411>. EDN: <https://elibrary.ru/PCLRDN>
7. Merezhko, O. E., & Aminova, E. V. (2023). Analysis of the modern assortment and dynamics of apple (*Malus domestica* Borkh.) cultivation in Russian horticulture. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*, 16(3), 78. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_94. EDN: <https://elibrary.ru/RJQVII>
8. Ostapchuk, T. V., Khezhev, A. M., Sviridova, L. A., Dzhancharov, T. M., & Snegirev, D. V. (2023). Changes in the volumes of global apple production and international trade. *International Agricultural Journal*, 66(1), 33. https://doi.org/10.55186/25876740_2023_7_1_33. EDN: <https://elibrary.ru/DHZUQU>
9. Sutton, D., Fothergill, A., & Rinaldi, M. (2001). *Identification of pathogenic and opportunistic fungi*. Mir.
10. Chernikov, E. A., Astapchuk, I. L., Fedorovich, S. V., Popova, V. P., & Khudokormov, A. A. (2023). The effect of long-term orchard monoculture on the agrochemical and microbiological parameters of leached chernozems. *Fruit Growing and Viticulture of the South of Russia*, 82(4), 201–218. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2023-4-82-201-218>. EDN: <https://elibrary.ru/TOZKUI>
11. Fedorovich, S. V., Astapchuk, I. L., Yakuba, G. V., & Nasonov, A. I. (2024). Identification of *Fusarium sporotrichioides*, the causative agent of root rot in domestic apple trees, and assessment of its toxigenicity and pathogenicity. *Scientific Works of the North Caucasus Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, and Winemaking*, 38, 59–64. <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2024-38-59-64>. EDN: <https://elibrary.ru/RJEGSL>
12. Yarmeeva, M. M., Chudinova, E. M., Elanskaya, A. S., Kokaeva, L. Y., & Elansky, S. N. (2025). Fungi of the genus *Fusarium* on tomato plants in Russia. *Mycology and Phytopathology*, 59(2), 169–180. <https://doi.org/10.31857/S0026364825020058>. EDN: <https://elibrary.ru/SQOXKY>

13. Akgül, D. S., Önder, S., Savaş, N. G., Yıldız, M., Bülbül, İ., & Özarslandan, M. (2024). Molecular identification and pathogenicity of *Fusarium* species associated with wood canker, root and basal rot in Turkish grapevine nurseries. *Journal of Fungi*, 10(7), 444. <https://doi.org/10.3390/jof10070444>. EDN: <https://elibrary.ru/NLMTZL>
14. Crous, P. W., Hernández-Restrepo, M., Van Iperen, A. L., Starink-Willemse, M., Sandoval-Denis, M., & Groenewald, J. Z. (2021). Citizen science project reveals novel fusarioid fungi (Nectriaceae, Sordariomycetes) from urban soils. *Fungal Systematics and Evolution*, 8(1), 101–127. <https://doi.org/10.3114/fuse.2021.08.09>. EDN: <https://elibrary.ru/XKSGQU>
15. Claerbout, J., Van Poucke, K., Mestdag, H., Delaere, I., Vandeveld, I., Venneman, S., & Höfte, M. (2023). *Fusarium* isolates from Belgium causing wilt in lettuce show genetic and pathogenic diversity. *Plant Pathology*, 72(3), 593–609. <https://doi.org/10.1111/ppa.13668>. EDN: <https://elibrary.ru/AGVDFU>
16. Dongzhen, F., Xilin, L., Xiaorong, C., Wenwu, Y., Yunlu, H., Yi, C., & Chunsheng, G. (1964). *Fusarium* species and *Fusarium oxysporum* species complex genotypes associated with yam wilt in South-Central China. *Front Microbiol*, 11, 1964. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01964>. EDN: <https://elibrary.ru/NYKNWI>
17. Jang, Y., Yi, H., Maharjan, R., Jeong, M., & Yoon, Y. (2022). First report of root rot caused by *Fusarium armeniacum* on soybean in Korea. *Plant Disease*, 106(4), 1306. <https://doi.org/10.1094/pdis-11-20-2319-pdn>. EDN: <https://elibrary.ru/VDZXUU>
18. Jasarevic, M., Catalani, A., Morales-Rodríguez, C., Tati, M., & Chilosi, G. (2022). First report of *Fusarium brachygibbosum* causing rots on potato tubers in Italy. *Journal of Plant Pathology*, 104(4), 1591–1591. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01221-z>. EDN: <https://elibrary.ru/MHQOUA>
19. Joshi, N. A., & Fass, J. N. (2011). *Sickle: A sliding-window, adaptive, quality-based trimming tool for FastQ files* (Version 1.33).
20. Lee, S. H., Shin, H., Lee, H. I., & Lee, S. (2022). The control efficacy of sodium hypochlorite against violet root rot caused by *Helicobasidium mompa* in apple. *The Plant Pathology Journal*, 38(5), 513–521. <https://doi.org/10.5423/ppj.oa.04.2022.0057>. EDN: <https://elibrary.ru/KBKSHS>
21. Litovka, Y. A., Chen, H., Li, W., & Pavlov, I. N. (2023). Fusarioid fungi associated with woody plants in Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 16(4), 528–540. <https://doi.org/10.1134/s1995425523040066>. EDN: <https://elibrary.ru/HZVYPW>
22. Lombard, L., Sandoval-Denis, M., Lamprecht, S. C., & Crous, P. W. (2019). Epitypification of *Fusarium oxysporum*—clearing the taxonomic chaos. *Persoonia—Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 43(1), 1–47. <https://doi.org/10.3767/persoonia.2019.43.01>. EDN: <https://elibrary.ru/FIXTEX>

23. Ma, K., Wang, Y., Wang, J., Zhang, Y., & Gao, J. (2023). First report of ginseng root rot caused by *Fusarium subglutinans*. *Journal of General Plant Pathology*, 89(5), 296–303. <https://doi.org/10.1007/s10327-023-01136-2>. EDN: <https://elibrary.ru/JR-PHOQ>
24. Mannai, S., Benfradj, N., & Boughalleb-M'Hamdi, N. (2024). Occurrence of *Glo-bisporangium* and *Phytophythium* species associated with apple and peach seedlings decline in Tunisian nurseries. *Journal of Plant Pathology*, 106(2), 643–655. <https://doi.org/10.1007/s42161-024-01600-8>. EDN: <https://elibrary.ru/KGEOIA>
25. Mirghasempour, S. A., Michailides, T., Chen, W., & Mao, B. (2022). *Fusarium* spp. associated with *Dendrobium officinale* dieback disease in China. *Journal of Fungi*, 8(9), 919. <https://doi.org/10.3390/jof8090919>. EDN: <https://elibrary.ru/FWPRJD>
26. Monteiro, R. C., Yu, M. C. Z., Dolatabadi, S., Hagen, F., Sandoval-Denis, M., Francisco, E. C., & Rodrigues, A. M. (2025). Molecular tracking of emerging *Fusarium* species in keratitis: *F. veterinarium*, *F. contaminatum*, and *F. curvatum*. *Mycopathologia*, 190(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s11046-025-00929-7>. EDN: <https://elibrary.ru/JKMYYA>
27. Nyoni, M., Mazzola, M., Wessels, J. P. B., & McLeod, A. (2021). Phosphonate treatment effects on *Phytophthora* root rot control, phosphite residues and *Phytophthora cactorum* inoculum in young apple orchards. *Plant Disease*, 105(12), 3835–3847. <https://doi.org/10.1094/pdis-01-21-0067-re>. EDN: <https://elibrary.ru/FZUMIF>
28. Price, M. N., Dehal, P. S., & Arkin, A. P. (2010). FastTree 2—approximately maximum-likelihood trees for large alignments. *PLoS One*, 5(3), e9490. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009490>. EDN: <https://elibrary.ru/NYZTML>
29. Romero-Arenas, O., Martínez-Salgado, S. J., Rivera, A., Huerta-Lara, M., Laug-García, B., & Villa-Ruano, N. (2022). First report of basal rot caused by *Fusarium equiseti* in onion crops from Puebla, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4210>. EDN: <https://elibrary.ru/KRPOVJ>
30. Sano, T., Mizuki, M., Matsui, K., Takahashi-Ando, N., Kimura, M., & Nakajima, Y. (2022). First report of *Fusarium armeniacum* isolated from rice in Aichi Prefecture. *JSM Mycotoxins*, 72(1), 1–3. <https://doi.org/10.2520/myco.72-1-1>. EDN: <https://elibrary.ru/QMRESG>
31. Sun, X., Jiang, S., Hong, H., Zhang, M., Xin, Z., Wu, B., & Xin, X. (2024). First report of fruit rot caused by *Fusarium luffae* in cherry tomato in China. *Plant Disease*, 108(3), 788. <https://doi.org/10.1094/pdis-05-23-1019-pdn>. EDN: <https://elibrary.ru/KAKUED>
32. Villanueva, O., & Ellouze, W. (2023). First report of a Canadian isolate of *Phytophythium vexans* causing root rot disease on apple and peach under laboratory conditions. *New Disease Reports*, 48(1). <https://doi.org/10.1002/ndr2.12195>. EDN: <https://elibrary.ru/DQHXDA>

33. Waqas, M., Gilardi, G., Guarnaccia, V., & Spadaro, D. (2025). Host range and molecular characterization of the four races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*. *Plant Disease*. <https://doi.org/10.1094/pdis-07-24-1505-re>. EDN: <https://elibrary.ru/KUUXPP>
34. Zhou, Y., Zhang, W., Li, X., Ji, S., Chethana, K. W. T., Hyde, K. D., & Yan, J. (2022). *Fusarium* species associated with cherry leaf spot in China. *Plants*, 11(20), 2760. <https://doi.org/10.3390/plants11202760>. EDN: <https://elibrary.ru/OLRAMV>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Астапчук Ирина Леонидовна, канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории биотехнологического контроля фитопатогенов и фитофагов; заведующий лабораторией фитопатологии центра биотехнологий ФГБУН «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия»; ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»
ул. 40 лет Победы, 39, г. Краснодар, Российская Федерация; ул. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Российская Федерация
irina_astapchuk@mail.ru

Якуба Галина Валентиновна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории биотехнологического контроля фитопатогенов и фитофагов ФГБУН «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия»
ул. 40 лет Победы, 39, г. Краснодар, Российская Федерация
galyayaku@gmail.com

Федорович Святослав Валерьевич, научный сотрудник центра молекулярно-генетических исследований ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»
ул. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Российская Федерация
havok11.f@gmail.com

Елисютикова Анастасия Васильевна, лаборант центра молекулярно-генетических исследований

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

ул. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Российская Федерация

nas-elisyutikova@yandex.ru

Кузнецова Надежда Александровна, лаборант лаборатории фитопатологии центра биотехнологий

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

ул. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Российская Федерация

N9181102187n@yandex.ru

Насонов Андрей Иванович, канд. биол. наук, заведующий лабораторией биотехнологического контроля фитопатогенов и фитофагов

ФГБУН «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия»

ул. 40 лет Победы, 39, г. Краснодар, Российская Федерация

nasoon@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Irina L. Astapchuk, Ph.D. in Biology, Research Associate at the Laboratory for Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages; Head of the Phytopathology Laboratory at the Biotechnology Center

North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking; I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University

39, 40 Let Pobedy Str., Krasnodar, Russian Federation; 13, Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

irina_astapchuk@mail.ru

SPIN-code: 8684-6159

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9713-0383>

ResearcherID: K-8646-2018

Scopus Author ID: 57558038700

Galina V. Yakuba, Ph.D. in Biology, Senior Researcher at the Laboratory of Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages

North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking
39, 40 Let Pobedy Str., Krasnodar, Russian Federation

galyayaku@gmail.com

SPIN-code: 3835-6760

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-960X>

ResearcherID: ABA-4739-2021

Scopus Author ID: 57191370976

Svyatoslav V. Fedorovich, Research Associate at the Center for Molecular and Genetic Research

I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University

13, Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

havok11.f@gmail.com

Anastasia V. Yelisyutikova, Laboratory Assistant at the Center for Molecular and Genetic Research

I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University

13, Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

nas-elisyutikova@yandex.ru

SPIN-code: 1971-4994

ResearcherID: ABE-2789-2022

Scopus Author ID: 58311310000

Nadezhda A. Kuznetsova, Laboratory Technician at the Plant Pathology Laboratory of the Biotechnology Center

I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University

13, Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

N9181102187n@yandex.ru

Andrey I. Nasonov, Ph.D. in Biology, Head of the Laboratory for Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages

North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking

39, 40 Let Pobedy Str., Krasnodar, Russian Federation

nasoan@mail.ru

SPIN-code: 5636-6106

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4927-2192>

ResearcherID: K-9142-2017

Scopus Author ID: 56989221000

Поступила 01.09.2025

После рецензирования 21.10.2025

Принята 27.10.2025

Received 01.09.2025

Revised 21.10.2025

Accepted 27.10.2025

Земледелие и защита растений / Soil Fertility and Plant Protection

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1397](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1397)

EDN: [BPESFT](https://www.edn.ru/BPESFT)

UDC 633.73:632.937.3



Investigating arboreal ant communities as predators of coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferr.) in Arabica coffee plantations

J. Jauharlina, Icha Destriany, Nihayatul Afifah Husna,
Muhammad Sayuthi, Tjut Chamzurni

Universitas Syiah Kuala, Darussalam, Banda Aceh, Indonesia

Abstract

This study investigated the arboreal ant community and evaluated its potential role as a predator of the Coffee Berry Borer (CBB) in Gayo coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Sumatra, Indonesia. Four plantations (two organic and two conventional) were studied. Arboreal ants found on coffee trees and CBB-infested berries were also observed. A total of 23 ant species were recorded in conventional plantations and 17 species in organic plantations. Notably, the abundance of ants was three times higher in the organic plantations than in the conventional plantations. The observed ant genera, including *Crematogaster*, *Pheidole*, *Tetramorium*, *Tapinoma*, *Technomyrmex*, and *Monomorium*, exhibited potential as CBB predators in both cultivation systems. Interestingly, seven ant species found inside CBB-infested berries were the same as those on coffee trees, suggesting that they enter through CBB-made holes and prey on pests within the berries. The absence of pesticide use and the diverse shade plants in the agroforestry system likely contributed to the higher ant abundance in organic plantations. These findings highlight the potential of exploiting arboreal ant communities for sustainable CBB management during Gayo coffee cultivation.

Keywords: biological control; natural enemies; organic coffee; conventional coffee; coffee berry borer

For citation. Jauharlina, J., Destriany, I., Husna, N. A., Sayuthi, M., & Chamzurni, T. (2026). Investigating arboreal ant communities as predators of coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferr.) in Arabica coffee plantations. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 224–243. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1397>

Introduction

Coffee is one of the world's most economically significant crops, with Arabica coffee being particularly renowned for its superior taste compared to other varieties, such as Robusta and Liberica. Fadhil et al. [1] highlight that the Gayo region, specifically the Gayo Highlands, includes Bener Meriah, Central Aceh, and Gayo Lues as primary producers of Arabica coffee in Aceh Province. The authors document that these areas play a significant role in Indonesia's coffee production landscape, significantly contributing to regional agricultural practices and economic viability, with a noted productivity range of 700 to 800 kg per hectare across these regencies. However, the coffee berry borer (CBB), *Hypothenemus hampei* Ferr., poses a significant threat to coffee production in these regions [2; 3]. This pest has also been recorded as the most destructive pest in other coffee-producing countries [4-7]. The coffee berry borer is a globally notorious pest, inflicting damages of over \$500 million annually in the coffee industry [8]. These beetles directly attack coffee berries by boring into them, where they lay eggs and complete their life cycle inside the infested berries, thereby causing significant damage [9]. The lifecycle of CBB within berries disrupts the development of coffee beans, leading to substantial yield losses and quality degradation. Given its impact, managing CBB is critical for sustaining coffee production and protecting the livelihoods of coffee farmers in affected regions.

Coffee plantations in the Gayo Highlands are characterized by their implementation of agroforestry systems, which integrate coffee plants with a diverse range of trees that provide shade, thereby creating a forest-like environment [10]. This cultivation method is significant for both ecological sustainability and agricultural productivity in the region. Predatory ants are frequently used as biological control agents in agroforestry systems. Several ant species are known to reduce the prevalence of coffee berry borers, either by preventing the borer from boring in coffee berries or by eliminating them once they are within the berries. Ant predators have plenty of opportunities to capture defenceless borers because it takes the adult borer nearly an hour to effectively enter the coffee berry [11; 12]. It has become more apparent over the past ten years that ants are significant CBB natural enemies on coffee plantations. Several studies have shown that ants consume CBB in laboratory experiments [13-15]. Other studies have provided concrete evidence that ants can lessen CBB infestation in coffee plantations [5; 16; 17].

An earlier study revealed that conventionally and organically managed coffee plantations in the Aceh Tengah Regency contain large populations of ants [2]. A later study showed that the ant community in the same area comprises both ground-nest-

ing ants and arboreal ant species [18]. It has been observed earlier in Brazil that several ground-nesting ant species prey on CBB [14]. Ant species that nest and forage on plants above the ground are arboreal ants. A negative correlation exists between fruit attacked by the borer and the prevalence of *Azteca instabilis*, a prominent canopy ant that frequently forages coffee bushes [12; 17]. Free-roaming CBB adults are prevented from colonizing berries by at least six different ant species that graze on plants in Mexico, according to research by Gonthier et al. [16].

Identification of ant species in Aceh Tengah Regency has only been made from the ground underneath coffee bushes [18], while arboreal ant species, or the group of ants living and soaring above the ground, have not yet been identified. According to Larsen and Philpott [14], arboreal species present in coffee plants can act as effective predators of CBB. Given the size of the present ant population and the frequency with which the ant community is observed on coffee plantations, further identification and research are required to fully understand the potential of arboreal ants as predators and their potential for controlling CBB.

Previous studies have shown that ant populations dominate other arthropod species in both conventional and organic coffee plantations. Identification and observation of ant diversity focused on ant samples found on the ground surface of coffee plantations. The results were promising, and the presence of ants with the potential to be predators of CBB was relatively high in this area [2; 18]. Regarding the trend of organic coffee, the presence of natural enemies in the field is crucial because it can be used to reduce CBB infestation and other pest attacks.

The ant community in coffee plantations is found not only in nesting and foraging on the ground, but also in ant communities that forage on coffee trees (arboreal ants). Their presence in coffee trees can provide ecosystem services in the form of predation against CBBs that attack coffee berries. In the current study, we focused on the ecosystem services provided by arboreal ants as a biological control agent of CBB in the Arabica coffee plantation in Aceh Tengah Regency, Aceh Province. We observed arboreal ant communities, recorded their abundance, and described their predation on CBB in conventionally and organically managed coffee. We also identified ant species communities inside CBB coffee berries in the two types of coffee plantations.

Materials and methods

Study Site

This study was conducted in a coffee plantation grown by the Aceh Tengah Regency community, located approximately 300 km from the city of Banda Aceh, Indonesia. Aceh Tengah is one of the three regencies in the Gayo High-

lands of Aceh Province, Indonesia. This area spans an altitude range of 200–2600 m above sea level, with rainfall varying from 1082 to 2409 mm per year and 113 rainy days annually. The average daily temperature is approximately 20 °C. Two organic and two non-organic (conventional) coffee plantations, each with an area of approximately 1 ha, were used as research locations. Four lands were studied, featuring coffee plantations aged 10-15 years, located at 1200-1300 m above sea level (asl), as presented in Table 1.

Table 1.

**The study site for arboreal ant sampling on Arabica coffee plantations
in Aceh Tengah Regency**

Village	Type	Location Coordinate (Range)	Altitude (m asl)
Atang Jungket	Organic	04°35'34'' - 04°36'33''N 96°47'57'' - 96°48'04''E	1222
Simpang Lukup Badak	Organic	04°35'41'' - 04°36'25''N 96°48'05'' - 96°48'05''N	1200
Simpang Uning Niken	Conventional	04°36'10'' - 04°37'01''N 96°48'26'' - 96°48'33''E	1231
Tebes Lues	Conventional	04°35'59'' - 04°36'38''N 96°47'30'' - 96°48'18''E	1255

Two distinct cultivation systems were studied. In organic plantations, no chemical pesticides or fertilizers were applied. Instead, growers used compost made from coffee berry skins as the primary fertilizer, with no pest control measures implemented. In contrast, conventional plantations utilized chemical inputs including herbicides for weed control during the early growth phase of coffee trees (less than five years old) and chemical fertilizers applied 1-2 times annually.

Both cultivation systems employed polyculture planting arrangements, incorporating shade trees such as Lamtoro (*Leucaena glauca*), avocado, orange, guava, and persimmon. Banana and chilli plants were intercropped between the coffee trees. For this study, coffee trees with heights between 1.5-2.0 meters were randomly selected from each location for observation and sampling. Data collection was conducted over four observation periods, each at four-week intervals, from July to October 2021.

CBB Infestation in Coffee Berries

One hundred coffee berries were randomly collected from each coffee tree sample to determine the percentage of CBB infestations per tree. The total num-

ber of trees used for sampling coffee berries was 20 trees per observation plot. The total number of trees used for sampling coffee berries from the entire plot was 80. All collected coffee berries were placed in plastic bags and taken to the Biological Control Laboratory to count the number of coffee berries attacked by CBB. The percentage of CBB attacks (CBB infestations) was calculated using the formula expressed in Equation 1.

$$I = a/b \times 100\% \quad (1)$$

where I represent the percentage of CBB-infested berries, a is the number of coffee berries infested with CBB, and b is the number of coffee berries observed.

Arboreal Ant Community and Its Abundance

Arboreal ants are a community of ants that nest and forage in trees, specifically in this study, coffee trees. Ant samples were collected from 10 coffee trees from each location. Ants were sampled using the method developed by Larsen and Philpott [14]. The presence of ant communities in the trees was visually observed for two minutes for each sample tree. Visual surveys included shaking branches and observing coffee leaves, stems, and berries. Then, while moving around the coffee tree, the visible ants were collected manually using a small brush for two minutes in each tree sample. The collected ant samples were placed in small plastic bottles containing 70% alcohol and taken to the Biological Control Laboratory of the Faculty of Agriculture, Syiah Kuala University, for identification. Arboreal ant sampling was performed four times at an interval of 3 weeks. The ants were then identified by observing their morphology using a loupe and a microscope. The identification stage was carried out by referring to the results of previous studies [18-20]. The total number of individuals from each ant species was counted and stored in separate collection bottles for each species. The number of ant species per observation plot for the organic and conventional coffee plantations was also calculated.

Community of Ant Species Inside CBB-infested Coffee Berries

All CBB-infested berries were placed separately according to the plant samples at each sampling time. Ants from CBB-infested berries were placed in bottles containing 70% alcohol. The ants were then grouped according to their sampling locations. Ants were identified by examining their morphological characteristics, using the same sources as those for the arboreal ants. The total number of individuals of each identified ant species originating from the infested coffee berries was counted at the Laboratory of Biological Control, Faculty of Agriculture, Universitas Syiah Kuala.

Data Analysis

The identification of arboreal ants is carried out morphologically (morphospecies), at least to the level of their genera. Their role in coffee plantations was determined by referring to the ant species found in previous studies [18] and other studies elsewhere [14, 21]. Infestation of CBB, abundance of each ant species, and species richness between organic and conventional coffee plantations were analyzed using Student's t-test. The same analysis was performed on the ant communities of CBB-infested berries from organic and conventional coffee plantations.

Research Results and Discussion

CBB infestation

The coffee berry borer (*H. hampei*) infested both the organic and conventional coffee plantations. The infestation of CBB on organic coffee plantations ranged between 24.65-27.95% and between 26.47-36.24% on conventional coffee plantations, as demonstrated in Fig. 1. The results of the t-test analysis showed that the average level of CBB infestation in organic and conventional coffee plantations was not significantly different in the first observation (July) ($P = 0.45$, $t = 0.11$, $df = 78$), second observation (August) ($P = 0.20$, $t = 0.84$, $df = 78$), and fourth observation (October) ($P = 0.25$, $t = 0.66$, $df = 78$). In the third observation (September), CBB infestation differed significantly between the two types of coffee plantations ($P = 0.01$, $t = 2.36$, $df = 78$). In general, CBB infestation in conventional coffee plantations tended to be higher than that in organic coffee plantations, despite the non-significant difference in the first, second, and fourth observations. These results are similar to those of previous studies by Husni et al. [3]. They also observed CBB infestation in Aceh Tengah Regency from 2019 to 2021 with four observations: once before the coffee harvest, twice during harvest, and once after harvest. They found no significant difference in CBB infestation between the organic and conventional coffee plantations. CBB infestation was also relatively higher in conventional coffee plantations.

In this study, most of the coffee berries in observations I (July), II (August), and III (October) were still yellowish-green in both organic and conventional coffee plantations. The coffee berries observed in July and August were the newly developing ones after the big harvest in April, while the berries observed in October were the ones after the September harvest. It has been known that coffee berries' colour and maturity level are two factors that can attract CBB to the berries. CBB usually prefer the almost ripe coffee berries, which are reddish [22]. Another study showed that CBB adults prefer red traps because they resemble ripe

coffee berries and are less attracted to yellow devices [23]. The different types of coffee cultivation do not seem to cause significant differences in CBB infestation between organic and conventional coffee plantations, except in observation IV (September). During this time, the CBB infestation showed a preference for conventional coffee compared to organic coffee. The level of CBB infestation is higher on coffee plants with berries that begin to harden and ripen for harvest.

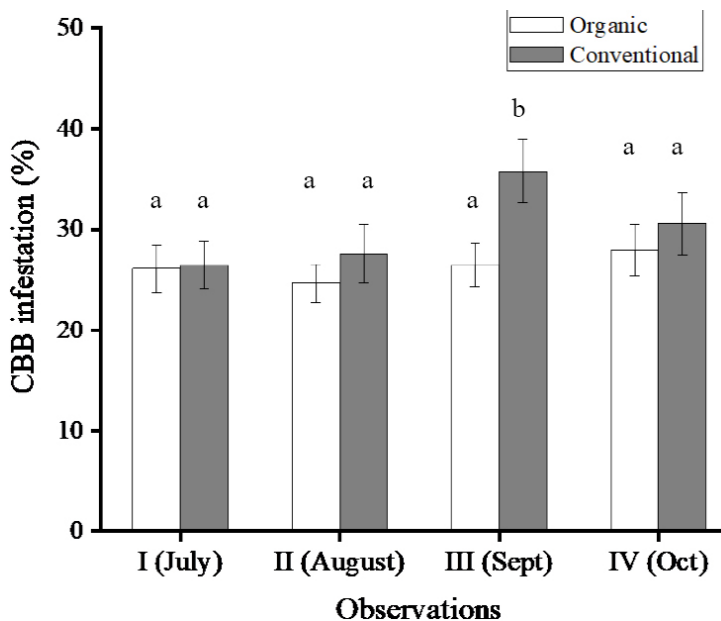


Fig. 1. CBB infestation on organic and conventional coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Aceh Province, Indonesia. The letters above the bars indicate a significant difference based on the T-test at the 0.05 level for each observation.

Community of arboreal ants on coffee trees and their ecological roles

As presented in Table 2, the ants sampled from organic and conventional coffee consisted of 4 subfamilies, 11 genera, and 23 morphospecies during the four samplings. All 23 morphospecies were found in organic coffee, whereas only 17 were found in conventional coffee. A previous study by Jauharlina et al. [18] showed that ants found on the ground also contained more ant species in conventional coffee than in organic coffee. It was suspected that this result was influenced by the composition of the soil layer and leaf litter, which was also a nesting place for ants. Conventional coffee plantations were observed to have a lot of leaf litter, rotting wood,

and fallen CBB-infested berries scattered around coffee trees. This condition invites more ant species to settle in the habitat [18]. The type of food source determines the foraging activity of ants, which affects their composition in a habitat. Differences in food availability and predation could influence ant species in conventional coffee plantations [24]. In the present study, the relatively higher percentage of CBB infestation in conventional coffee is a significant food source (prey) for predatory ants, allowing it to invite more ant species to occupy the area.

Table 2.

Community of arboreal ant species on organic and conventional coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Aceh Province, Indonesia

Subfamily	Genus	Morphospecies	Type of cultivation	
			Organic	Conventional
Dolichoderinae	<i>Dolichoderus</i>	<i>Dolichoderus</i> sp	✓	✓
	<i>Philidris</i>	<i>Philidris</i> sp. 1	✓	✓
		<i>Philidris</i> sp. 2	✓	✓
	<i>Tapinoma</i>	<i>Tapinoma</i> sp. 1	×	✓
		<i>Tapinoma</i> sp. 2	✓	✓
		<i>Tapinoma</i> sp. 3	✓	✓
		<i>Tapinoma</i> sp. 4	✓	✓
	<i>Technomyrmex</i>	<i>Technomyrmex</i> sp. 1	✓	✓
		<i>Technomyrmex</i> sp. 2	✓	✓
		<i>Technomyrmex</i> sp. 3	✓	✓
Formicinae	<i>Camponotus</i>	<i>Camponotus</i> sp. 1	✓	✓
Myrmicinae	<i>Aphaenogaster</i>	<i>Aphaenogaster</i> sp.1	×	✓
		<i>Aphaenogaster</i> sp.1	×	✓
	<i>Crematogaster</i>	<i>Crematogaster</i> sp 1	✓	✓
		<i>Crematogaster</i> sp 2	✓	✓
	<i>Pheidole</i>	<i>Pheidole</i> sp 1	✓	✓
		<i>Pheidole</i> sp 2	✓	✓
	<i>Tetramorium</i>	<i>Tetramorium</i> sp 1	✓	✓
		<i>Tetramorium</i> sp 2	✓	✓
		<i>Tetramorium</i> sp 3	✓	✓
		<i>Tetramorium</i> sp 4	×	✓
	<i>Solenopsis</i>	<i>Solenopsis</i> sp	×	✓
Pseudomyrmicinae	<i>Tetraponera</i>	<i>Tetraponera</i> sp	×	✓
		Number of species	17	23

Note: ✓ = present, × = absent

Table 3 presents the ecological role of arboreal ants found in organic and conventional coffee plantations under study. The arboreal ant species in this study have ecological roles as predators, scavengers, and plant pests. Ant species that act as predators are those that prey on other insects so that they can be used as natural enemies to control pests. Many studies have shown the role of ants of the genus *Dolichoderus* as predators of pests on cocoa plants [25]. Ants from the genera *Solenopsis*, *Pheidole*, and *Crematogaster* have been known as predators of CBB in Colombia [26]. *Pheidole synanthropica* ants that attack CBB carry their prey to the ant nest [5]. The ant species *Crematogaster curvispinosus* is known to prey on the immature stage of CBB on coffee plantations in Brazil [27]. In contrast, *Camponotus* species are predators that hunt live insects and insect carcasses for food [28].

Table 3.

The ecological role of arboreal ants found in organic and conventional coffee plantations in Aceh Tengah Regency based on their genera

Genus	Ecological role
<i>Dolichoderus</i>	Predator
<i>Pholidris</i>	Scavenger
<i>Tapinoma</i>	Scavenger, pest, predator
<i>Technomyrmex</i>	Scavenger, pest, predator
<i>Aphaenogaster</i>	Scavenger
<i>Crematogaster</i>	Predator
<i>Pheidole</i>	Predator
<i>Tetramorium</i>	Scavenger, predator
<i>Solenopsis</i>	Predator
<i>Tetraponera</i>	Predator

Ants of the *Technomyrmex* genus are insects that consume plant nectar or sugar as an energy source. *Technomyrmex albipes* species are generally considered secondary pests in agriculture because they protect honeydew-producing insects, such as aphids and mealybugs, which benefit them [29]. Another study showed that the relationship between *T. yamanei* ants and *Coccus viridis* had a positive effect on coffee plants, as *T. yamanei* also attacked CBB [11]. Thus, the *Technomyrmex* ants found at the study site also potentially become predators of CBB.

Dolichoderinae and Myrmicinae are subfamilies with the dominant number of ant morphospecies compared to subfamilies formicinae and pseudomyrmicinae. *Tapinoma* (Dolichoderinae) and *Tetramorium* (Myrmicinae) were the

genera with the highest number of species found, as shown in Table 3 and illustrated in Fig. 2. Both genera are classified as groups of ants that show predation behaviour. Worker ants of the species *Tetramorium acuelatum* attack their prey with a sting; therefore, they are classified as aggressive predators [30]. One species of *Tapinoma* was reported to be a predator of CBB in Mexico by foraging in coffee fruits and preying on CBB [31].

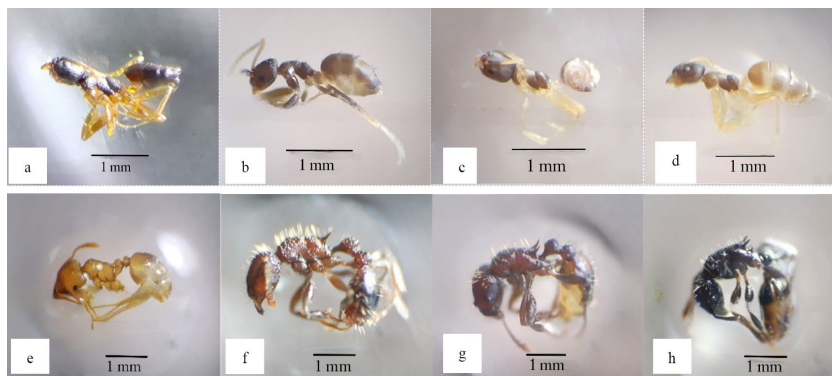


Fig. 2. The genera of *Tapinoma* and *Tetramorium*. The highest number of arboreal ant species recorded in organic and conventional coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Aceh Province, Indonesia: *Tapinoma* sp.1 (a), *Tapinoma* sp. 2 (b), *Tapinoma* sp.3, (c), *Tapinoma* sp. 4 (d) and *Tetramorium* sp.1. (e), *Tetramorium* sp. 2 (f), *Tetramorium* sp. 3 (g), *Tetramorium* sp. 4 (h)

Species richness and abundance of arboreal ants on coffee trees

Fig. 3 shows the species richness and abundance of arboreal ants in organic and conventional Arabica coffee plantations in the study area. Despite the higher number of arboreal ant species in conventional coffee (species richness) in the overall observations, the species richness per plot in each observation did not differ significantly between the two types of cultivation ($P = 0.21$, $t = 0.82$, $df = 14$). During each observation, we found various ant species in the conventional coffee, resulting in a higher number of ant species across the four observations. In contrast, we found 1476 individual ants in organic coffee plantations and 512 individual ants in conventional coffee plantations. The abundance of arboreal ants in the organic coffee plantations was three times greater than that in the conventional coffee plantations. The T-test results showed that the abundance of arboreal ants in each plot was significantly higher in organic coffee plantations than in conventional coffee plantations ($P < 0.0001$, $t = 10.92$, $df = 14$).

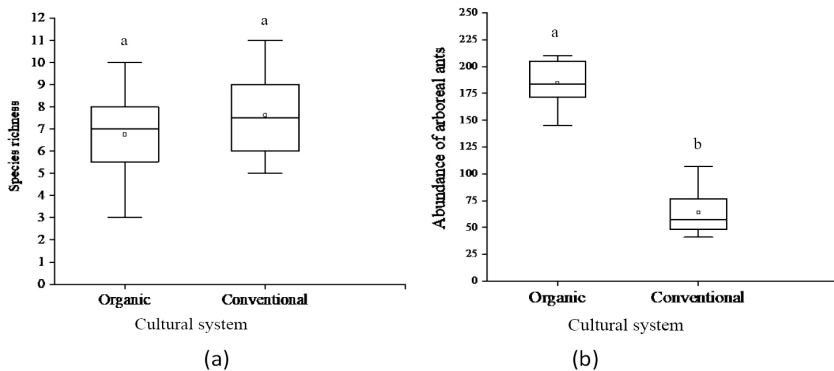


Fig. 3. Species richness (a) and abundance (b) of arboreal ant morphospecies per plot in organic and conventional Arabica coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Aceh Province, Indonesia.

In organic coffee plantations, a higher abundance of ants was found on the genera *Dolichoderus*, *Philidris*, *Camponotus*, and *Crematogaster*. In conventional coffee, as demonstrated in Fig. 4, the dominant ants were the genera *Dolichoderus*, *Tetramorium* sp. 2, and *Technomyrmex* sp. 1. Many studies have shown that particular dominant ant species can control the availability of food sources and plant canopies for nesting. Therefore, the dominant ant species is a determining factor in the structure of the ant community in a habitat [32].

Previous studies have shown similar dominance of arboreal ants in coffee plantations. Ants of the genus *Tapinoma* and *Crematogaster* were the dominant ants in the study conducted in southern Mexico [16]. The genera *Tapinoma* and *Crematogaster* were also the dominant ants found on a coffee plantation in Thailand [12]. Meanwhile, the study conducted in a coffee plantation in Sukabumi, West Java, recorded the dominance of the genus *Dolichoderus* [25]. This study's dominant arboreal ant species belong to the subfamily of ants known to be dominant in various habitats. *Dolichoderus*, *Philidris*, *Technomyrmex*, and *Tapinoma* belong to the Dolichoderinae subfamily, which often achieves ecological dominance in different habitats [33]. The genus *Philidris* exhibits aggressive behaviour that can reduce the richness of other ant species in trees. *Crematogaster* and *Tetramorium* belong to the subfamily Myrmicinae, the second-largest ant subfamily worldwide [34]. The ant genus *Camponotus* comes from the Formicinae subfamily, which is also widely distributed worldwide. *Camponotus* ants are often found in organic coffee plantations because they generally live nesting in the tree canopy and rotting old tree trunks [35].

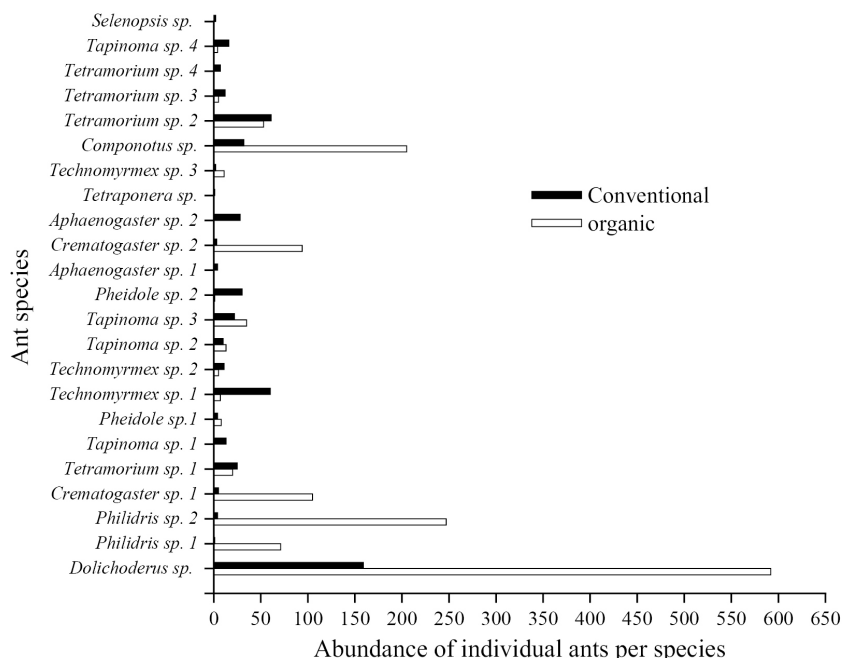


Fig. 4. The abundance of arboreal ants per species in organic and conventional Arabica coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Aceh Province, Indonesia.

Factors affecting the presence of insects in agricultural habitats include cultivation practices and pesticides [25]. The higher abundance of arboreal ants in organic coffee plantations suggests that organic cultivation systems are crucial for sustaining insect populations in coffee plantations. Organic plantations contain more soil organic matter and nutrients, which are essential for the survival of organisms [36]. Ant populations were more abundant in locations where insecticides were not used to control CBB. The application of various synthetic pesticides in conventional coffee plantations has a negative impact on arthropods, which serve as natural enemies of coffee plants. Broad-spectrum pesticides interfere with the presence of various beneficial insects, such as natural enemies, and can even lead to the emergence of secondary pests [37].

Vegetation composition can also influence the presence of ant species and their populations [38]. The composition of vegetation affects the presence of ant species because it affects food availability in a habitat [39]. Vegetation can determine the type of insects found in a habitat. The abundance of arboreal ants

in organic coffee plantations suggests that the diverse vegetation used for shading in these cultivation systems influences the ant population.

Community of arboreal ants and their abundance inside

CBB-infested berries

Observations of CBB-infested berries showed that there were 26 coffee berries in the presence of individual ants from a total of 9613 CBB-infested berries. The ant community consisted of nine species from six genera and two subfamilies, as shown in Table 4. Seven of the nine species found were the same ant species as the arboreal ants in coffee plants. The abundance of ants inside coffee berries was higher in organic coffee than in conventional coffee (Table 5).

Table 4.

Ant community inside CBB-infested berries in organic and conventional coffee plantations in Aceh Tengah Regency (n=26).

Subfamily	Genus	Morphospecies	Type of cultivation	
			Organic	conventional
Dolichoderinae	<i>Tapinoma</i>	<i>Tapinoma</i> sp. 1	✓	-
	<i>Technomyrmex</i>	<i>Technomyrmex</i> sp.1	✓	✓
		<i>Technomyrmex</i> sp. 2	×	✓
Myrmicinae	<i>Crematogaster</i>	<i>Crematogaster</i> sp 1	✓	✓
		<i>Crematogaster</i> sp 2	×	✓
	<i>Pheidole</i>	<i>Pheidole</i> sp 1	✓	✓
	<i>Monomorium</i>	<i>Monomorium</i> sp. 1	✓	✓
		<i>Monomorium</i> sp. 2	✓	-
	<i>Tetramorium</i>	<i>Tetramorium</i> sp 2	×	✓

Note: ✓ = present, × = absent

All ant species observed from CBB-infested berries are potentially CBB predators that enter the berries through the CBB-made tunnel. Ants of the genus *Monomorium*, as shown in Fig. 5, were the most common ants in CBB-infested coffee berries (Table 5). Still, these species were not found in arboreal ant sampling in coffee plantations. Presumably, because the size of *Monomorium* is minimal (less than 2 mm in length) and moves very quickly, therefore they were not collected when sampling using the hand-picking method (manual). According to Gathalkar and Sen [40], ants of the genus *Monomorium* are tiny predatory ants that are often used as biological agents to control various pests in agriculture. *Monomorium* worker ants such as *M. destructor* and *M. minimum* attack the early instar larvae of the insect pest *Antheraea mylita* on *Terminalia*

arjuna by entering the pupa and then eating the pupa. *Monomorium* ants can also attack when prey insects moult on trees [40]. In this study, *Monomorium* ants found inside CBB-infested berries are thought to prey upon the CBB larvae.

Table 5.

The abundance of ants inside CBB-infested berries, organic and conventional coffee plantations in Aceh Tengah Regency (n=26 CBB-infested coffee berries)

Morphospecies	Type of cultivation	
	Organic	conventional
<i>Crematogaster</i> sp 1	3.0	1.0
<i>Crematogaster</i> sp 2	163.0	0.0
<i>Pheidole</i> sp 1	23.0	65.0
<i>Monomorium</i> sp 1	18.0	241.0
<i>Monomorium</i> sp 2	0.0	22.0
<i>Tetramorium</i> sp 2	10.0	0.0
<i>Tapinoma</i> sp 1	0.0	1.0
<i>Technomyrmex</i> sp 1	2.0	26.0
<i>Technomyrmex</i> sp 2	19.0	0.0
Total abundance	238.0	356.0

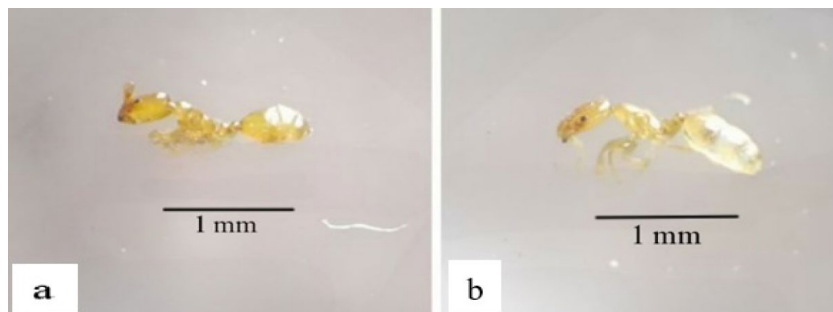


Fig. 5. Ants species of *Monomorium* sp 1 (a) and *Monomorium* sp 2 (b) found in coffee berries attacked by CBB in organic and conventional coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Aceh Province, Indonesia

We observed that the ants emerged from CBB-infested coffee berries through a CBB-made hole 3-7 days after sampling. Ants could prey on CBB by entering CBB-infested berries. Tiny ants enter through the holes made by CBB, attack the larvae and CBB adults, and may bring CBB to their nests [14]. Ants can also prevent the spread of CBB by waiting outside the coffee berries and catching CBB adults as they leave the berries to look for new hosts [15, 41]. The

ants that enter the CBB-infested berries are the species that have a smaller head size compared to the diameter of the CBB-made tunnel on the berries. Therefore, not all arboreal ants with the potential to be predators can be found inside CBB-infested berries [15]. We found that most coffee berries attacked by CBB and containing ants inside contained no CBB individuals. Of the 26 CBB-attacked berries observed, only seven coffee berries contained one or two CBB adults. This finding suggests that arboreal ants that enter CBB-infected coffee berries have significant potential to become predators of CBB. Based on their ecological roles, six genera of arboreal ants have great potential as predators of CBB: *Crematogaster*, *Pheidole*, *Tetramorium*, *Tapinoma*, *Technomyrmex*, and *Monomorium* (Table 4). Ants of the genera *Monomorium*, *Crematogaster*, and *Pheidole* are a genus of ants with the highest abundance (Table 5).

Conclusion

The arboreal ant communities found in coffee plantations are potential predators of CBB in both organic and conventional coffee, particularly the following six genera of arboreal ants: *Crematogaster*, *Pheidole*, *Tetramorium*, *Tapinoma*, *Technomyrmex*, and *Monomorium*. Ants of the genera *Monomorium*, *Crematogaster*, and *Pheidole* had the highest abundance of individuals found in this study. A small portion of CBB-infested berries contained ants, mainly of the same species as those observed on coffee plantations, except for the genus *Monomorium*. These tiny ants were missed during hand-picking sampling of the coffee trees. Despite the small percentage of CBB-infested berries that contained ants, this study has shown that ant communities do enter the CBB-infested berries and presumably attack the CBB inside them. A higher abundance of ant individuals in organic coffee indicates that coffee farm management can influence the arboreal ant population that nests and forages coffee plantations.

Sponsorship information. This research was made possible through financial support from Universitas Syiah Kuala, Ministry of Education, Culture, Research, and Technology, Indonesia, as stated in the Letter of Assignment Agreement contract number 145/UN11/SPK/PNBP/2022 dated February 11, 2022.

References

1. Fadhil, R., Nurba, D., & Sukmawati, E. (2021). Sensory assessment of Gayo Arabica coffee taste based on various varieties and manual brewing devices. *Coffee Science*, 16, 1–9. <https://doi.org/10.25186/v16i.1918>. EDN: <https://elibrary.ru/UONIRN>

2. Husni, H., Jauharlina, J., & Saifullah. (2019). Composition and structure community of arthropods in organic and conventional Arabica coffee plantation. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 260, Article 012158). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012158>
3. Husni, H., Jauharlina, J., Sayuthi, M., Mulyadi, E., Yulianda, P., & Maulidia, N. (2022). Consistency of attack level of coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferr.) on organic and conventional Arabica coffee plantation in Aceh Tengah District, Aceh Province, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 951, Issue 1, Article 012108). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/951/1/012108>. EDN: <https://elibrary.ru/XTEDWE>
4. Jaramillo, J., Muchugu, E., Vega, F. E., Davis, A., Borgemeister, C., & Chabi-Olaye, A. (2011). Some like it hot: The influence and implications of climate change on coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in East Africa. *PLoS One*, 6, e24528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024528>
5. Jiménez-Soto, E., Cruz-Rodríguez, J. A., Vandermeer, J., & Perfecto, I. (2013). *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) and its interactions with *Azteca instabilis* and *Pheidole synanthropica* (Hymenoptera: Formicidae) in a shade coffee agroecosystem. *Environmental Entomology*, 42(5), 915–924. <https://doi.org/10.1603/EN12202>
6. Tribble, W., & Carrol, R. (2014). Manipulating tropical fire ants to reduce the coffee berry borer. *Ecological Entomology*, 39, 603–609. <https://doi.org/10.1111/een.12139>
7. Vega, F. E., Infante, F., Castillo, A., & Jaramillo, J. (2009). The coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae): A short review, with recent findings and future research directions. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 2, 129–147.
8. Vega, F. E., Infante, F., & Johnson, A. J. (2015). The genus *Hypothenemus*, with emphasis on *H. hampei*, the coffee berry borer. In F. E. Vega & R. W. Hofstetter (Eds.), *Bark beetles: Biology and ecology of native and invasive species* (pp. 427–494). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417156-5.00011-3>
9. Damon, A. (2000). A review of the biology and control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). *Bulletin of Entomological Research*, 90(6), 453–465. <https://doi.org/10.1017/s0007485300000584>
10. Abubakar, Y., Alya, M. R., Karim, A., & Fazlina, Y. D. (2024). Effect of variety and farm altitude on chemical content of Arabica coffee (*Coffea arabica*) grown in Gayo highland, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1356, Issue 1, Article 012030). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1356/1/012030>. EDN: <https://elibrary.ru/MDEMYP>
11. Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2006). The effect of an ant-hemipteran mutualism on the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 117, 218–221. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.04.007>

12. Onishi, Y., Jaitrong, W., Suttiprapan, P., Buranapanichpan, S., Chanbang, Y., & Ito, F. (2016). Ant species diversity in coffee plantations in Chiang Mai province, northern Thailand. *The Thailand Natural History Museum Journal*, 10(1), 33–48.
13. Armbrrecht, I., & Gallego, M. C. (2007). Testing ant predation on the coffee berry borer in shaded and sun coffee plantations in Colombia. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 124, 261–267. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2007.00574.x>
14. Larsen, A., & Philpott, S. M. (2010). Twig nesting ants: The hidden predators of the coffee berry borer in Chiapas, Mexico. *Biotropica*, 42(3), 342–347. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00603.x>
15. Philpott, S. M., Pardee, G. L., & Gonthier, D. J. (2012). Cryptic biodiversity effects: Importance of functional redundancy revealed through addition of food web complexity. *Ecology*, 93(5), 992–1001. <https://doi.org/10.1890/11-1431.1>
16. Gonthier, D. J., Ennis, K. K., Philpott, S. M., Vandermeer, J., & Perfecto, I. (2013). Ants defend coffee from berry borer colonization. *Biological Control*, 58, 815–820. <https://doi.org/10.1007/s10526-013-9541-z>. EDN: <https://elibrary.ru/RIHWXP>
17. Morris, J. R., Vandermeer, J., & Perfecto, I. (2015). A keystone ant species provides robust biological control of the coffee berry borer under varying pest densities. *PLoS One*, 10(11), e0142850. <https://doi.org/10.1007/s10526-013-9541-z>
18. Jauharlina, J., Husni, H., Halimursyadah, H., Rizali, A., & Febrian, T. A. (2021, February). Diversity of ants (Hymenoptera: Formicidae) in organic and conventional Arabica coffee plantations in Aceh Tengah Regency, Sumatra, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 667, Issue 1, Article 012036). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/667/1/012036>. EDN: <https://elibrary.ru/MGOOEV>
19. Hashimoto, Y. (2003). Identification guide to the ant genera of Borneo. In Y. Hashimoto & R. Homathevi (Eds.), *Inventory and collection — Total protocol for understanding of biodiversity* (pp. 89–162). UMS Press.
20. Nazaretta, R., Buchori, D., Hashimoto, Y., Hidayat, P., Scheu, S., & Drescher, J. (2021). *A guide to the ants of Jambi (Sumatra, Indonesia): Identification key to ant genera and images of the EFForTS collection*. LIPI Press. <https://doi.org/10.14203/press.273>
21. Morris, J. R., & Perfecto, I. (2016). Testing the potential for ant predation of immature coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) life stages. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.018>
22. Ruiz-Cárdenas, R., & Baker, P. S. (2010). Life table of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) in relation to coffee berry phenology under Colombian field conditions. *Scientia Agricola*, 67(6), 658–668. <https://www.scielo.br/j/sa/a/NNtN9FTNJMxpHW8GP-swn3Fg/?lang=en&format=pdf>

23. Wiryadiputra, S., Cilas, C., & Morin, J-P. (2008). Effectiveness of the brocap trap in controlling the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferr.) in Indonesia [PA589]. In *22nd International Conference on Coffee Science* (pp. 1405–1408). ASIC. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=550189. ISBN: 2-900212-21-9
24. Vicente, R. E., & Izzo, T. J. (2017). Defining habitat use by the parabiocotic ants *Camponotus femoratus* (Fabricius, 1804) and *Crematogaster levior* Longino, 2003. *Sociobiology*, 64(4), 373. <https://periodicos.uefs.br/index.php/sociobiology/article/view/1228>. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v64i4.1228>
25. Susilawati, S., & Indriati, G. (2020). The effect of coffee plantations agroecosystem on diversity and abundance of ants (Formicidae). *Journal of Industrial and Beverage Crops*, 7(1), 981–989. <https://repository.pertanian.go.id/items/d2dfc57b-3460-444e-9f84-da4180571748>
26. Bustillo, A. E., Cárdenas, R., & Posada, F. J. (2002). Natural enemies and competitors of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae) in Colombia. *Neotropical Entomology*, 31(4), 635–639. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2002000400018>
27. Benassi, V. L. R. M. (1995). Levantamento dos inimigos naturais da broca do café *Hypothenemus hampei* (Ferr.) (Coleoptera: Scolytidae) no norte do Espírito Santo. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, 24, 635–638.
28. Dejean, A. (1988). Prey capture by *Camponotus maculatus* (Formicidae — Formicinae). *Biology of Behavior*, 13, 97–115.
29. Sangtaw, W., Suttiprapan, P., Jaitrong, W., & Buranapanichpan, B. (2018). Species of ants and their relationship with green scale insects on Arabica coffee trees in northern Thailand. *Agricultural Journal*, 34(3), 469–480.
30. Djiéto-Lordon, C., Richard, F. J., Owona, C., Gibernau, M., Orivel, J., & Dejean, A. (2001). The predatory behaviour of the dominant arboreal ant species *Tetramorium aculeatum* (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology*, 38(3), 765–776.
31. Infante, F., Mumford, J., & García-Ballinas, A. (2003). Predation by native arthropods on the African parasitoid *Prorops nasuta* (Hymenoptera: Bethyridae) in coffee plantations of Mexico. *Florida Entomologist*, 86(1), 86–88. [https://doi.org/10.1653/0015-4040\(2003\)086](https://doi.org/10.1653/0015-4040(2003)086)
32. Tobin, J. E. (1997). Competition and coexistence of ants in a small patch of rainforest canopy in Peruvian Amazonia. *Journal of the New York Entomological Society*, 105, 105–112.
33. Ward, P. S., Brady, S. G., Fisher, B. L., & Schultz, T. R. (2010). Phylogeny and biogeography of dolichoderine ants: Effects of data partitioning and relict taxa on historical inference. *Systematic Biology*, 59(3), 342–362. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syq012>. EDN: <https://elibrary.ru/NZEFOX>
34. Wielgoss, A., Tschamtkke, T., Buchori, D., Fiala, B., & Clough, Y. (2010). Temperature and a dominant dolichoderine ant species affect ant diversity in Indonesian ca-

- cao plantations. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.003>
35. Ibarra-Isassi, J., Handa, I. T., Arenas-Clavijo, A., Escobar, S., Armbrrecht, I., & Lessard, J. (2021). Shade-growing practices lessen the impact of coffee plantations on multiple dimensions of ant diversity. *Journal of Applied Ecology*, 58(5), 919–930. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13842>. EDN: <https://elibrary.ru/JX-CENM>
 36. Swai, E. (2021). *Ants diversity between organic and conventional farm*. GRIN Verlag.
 37. Hill, M. P., Macfadyen, S., & Nash, M. A. (2017). Broad-spectrum pesticide application alters natural enemy communities and may facilitate secondary pest outbreaks. *PeerJ*, 5, e4179. <https://doi.org/10.7717/peerj.4179>
 38. Hoffmann, B. D., & Andersen, A. N. (2003). Responses of ants to disturbance in Australia, with particular reference to functional groups. *Austral Ecology*, 28(4), 444–464. <https://doi.org/10.1046/j.1442-9993.2003.01301.x>. EDN: <https://elibrary.ru/ETPPNV>
 39. Silva, L. F., Souza, R. M., Solar, R., & Neves, F. S. (2017). Ant diversity in Brazilian tropical dry forests across multiple vegetation domains. *Environmental Research Letters*, 12(3), 035002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5f2a>
 40. Gathalkar, G., & Sen, A. (2018). Foraging and predatory activities of ants. In V. Shields (Ed.), *The complex world of ants* (pp. 51–68). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78011>
 41. Pardee, G. L., & Philpott, S. M. (2011). Cascading indirect effects in a coffee agroecosystem: Effects of parasitic phorid flies on ants and the coffee berry borer in a high-shade and low-shade habitat. *Environmental Entomology*, 40(3), 581–588. <https://doi.org/10.1603/EN11015>

DATA ABOUT THE AUTHORS

J. Jauharlina, Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture
Universitas Syiah Kuala
Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia
ljauharlina@usk.ac.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6166-3831>

Icha Destriany, Undergraduate student, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture
Universitas Syiah Kuala
Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia

Nihayatul Afifah Husna, Undergraduate student, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture
Universitas Syiah Kuala
Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia

Muhammad Sayuthi, Associate Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture
Universitas Syiah Kuala
Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia

Tjut Chamzurni, Associate Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture
Universitas Syiah Kuala
Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia

Поступила 02.07.2025

После рецензирования 10.08.2025

Принята 25.08.2025

Received 02.07.2025

Revised 10.08.2025

Accepted 25.08.2025

Система селекции и семеноводства / Plant Breeding and Seed Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391)EDN: [CETDHA](https://edn.ru/CETDHA)

УДК 633.112.1



Микроморфологические изменения овса посевного (*Avena sativa* L.) в ювенильный период при токсическом воздействии ионов алюминия

А.А. Ахтямова

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН, Московский, Тюменская обл., Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В России на долю кислых почв пахотного фонда приходится около 30% площади, основная часть которой сосредоточена в лесостепной и подтаежной зоне. Кислотность почв является одной из важных абиотических стресс-факторов для полноценного роста и развития растений. В кислых почвах гидроокись алюминия преобразуется в подвижные ионы, которые оказывают негативное влияние на рост и развитие растений на протяжении всей вегетации. При воздействии ионов алюминия на растения овса нарушается деление клеток кортекса, что приводит к деформации корневой системы (уменьшается длина корня, изменяется цвет, увеличивается толщина). Вызванные трансформации приводят к снижению эффективности поглощения питательных веществ корневой системой растений овса и как следствие происходит снижение урожайности и ухудшение качества зерна.

Цель – изучить влияние ионов алюминия на ростовую активность овса посевного на раннем этапе онтогенеза.

Материалы и методы. Исследования проводили в лаборатории геномных исследований в растениеводстве НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН в 2024 году. Объектом исследований влияния ионов алюминия на ростовую активность в первые 7 дней жизни были 20 сортов овса посевного (*Avena sativa* L.). Генотипы овса проращивали рулонным методом по ГОСТу 12038-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». Варианты опыта для проращивания растений овса предусматривали: дистиллированную воду (контроль); растворы

с концентрацией ионов алюминия: 4, 9 и 15 ммоль/л. В качестве источника ионов алюминия была выбрана его сульфатная производная ($Al_2(SO_4)_3$). Изучено воздействие стресса на клетки генотипов овса в корневом чехлике, под действием возрастающей концентрации ионов алюминия. Оценку на наличие крахмальных зерен в корневом чехлике генотипов овса проводили при помощи светового микроскопа Optika B-500Trp1 в 400 кратном увеличении. Для окрашивания крахмальных зерен использовали 1% раствор йода в молочной кислоте. Статистическую обработку данных и дисперсионный анализ проводили с использованием программ AgCStat и Statistica для программного продукта Microsoft Excel.

Результаты. Проращивание генотипов овса в растворах с концентрацией ионов алюминия 4 ммоль/л на 7 сутки оказало негативное влияние на развитие корневой системы – индекс длины корня (ИДК) достиг 27-65 % относительно контроля. Наиболее устойчивыми к воздействию стресс-фактора с концентрацией Al^{3+} 4 ммоль/л были генотипы Гунтер (к-14957), Бербер (к-15689) и Сапсан (к-15444) – ИДК составил 64-65 % относительно контроля.

Среди изученных генотипов овса выявлена группа восприимчивых сортов к воздействию возрастающей концентрации ионов алюминия (4-15 ммоль/л): Фауст (к-14781), 207h12 (к-15809), 325h12 (к-15808) и Червонный (к-2896). Среднее значение ИДК у восприимчивой группы достигло: 4 ммоль/л – 35; 9 ммоль/л – 17%; 15 ммоль/л – 9% относительно контроля. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа установлено влияние ионов алюминия на развитие длины первичных корешков (93%) и соотношение воздушно-сухой массы корней и побегов (65%) генотипов овса ($F_{факт.} > F_{теор.}$). Восприимчивые генотипы овса к стресс-фактору имели признаки деструкции крахмальных зерен в корневом чехлике при концентрации Al^{3+} 9 ммоль/л. Эти изменения связаны со структурным нарушением клеток в корневом чехлике, что в результате приводит к утрате геотропической чувствительности растений.

Заключение. В результате проведенных исследований выявлены толерантные генотипы овса к воздействию возрастающей концентрации ионов алюминия (4-15 ммоль/л) в ювенильный период: Бербер (к-15924), 162h15 (к-15925), Аргамак (к-14648) и Сапсан (к-15444). Среднее значение индекса длины корня, наиболее устойчивых генотипов овса, на вариантах с возрастающей концентрацией ионов алюминия достигло: 4 ммоль/л – 62; 9 ммоль/л – 32%; 15 ммоль/л – 13% относительно контроля. Основной мишенью токсического проявления ионов алюминия на растения овса были первичные корешки. Под действием стресс-фактора индекс соотношения корней и побегов генотипов овса уменьшился в 1,5-3,8 раза относительно контрольных значений. Установлена взаимосвязь устойчивости генотипов овса к ионам алюминия с наличием крахмальных зерен в корневом чехлике.

Ключевые слова: овёс посевной; *Avena sativa* L.; ионы алюминия; стресс-фактор; ростовая активность; алюмоустойчивость; кислотность почв; корневой чехлик; крахмальные зерна

Для цитирования. Ахтямова, А. А. (2026). Микроморфологические изменения овса посевного (*Avena sativa* L.) в ювенильный период при токсическом воздействии ионов алюминия. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 244–261. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391>

Micromorphological changes in oats (*Avena sativa* L.) in the juvenile period under toxic exposure to aluminum ions

A.A. Akhtyamova

Research Agricultural Institute of the Northern Trans-Urals, branch of the Federal Research Center of Tyumen Scientific Center, Siberian branch, Russian Academy of Sciences, Moskovskii, Tyumen Region, Russian Federation

Abstract

Background. In Russia, acidic soils account for about 30% of the arable land area, the bulk of which is concentrated in the forest-steppe and subtaiga zones. Soil acidity is one of the important abiotic stress factors for the full growth and development of plants. In acidic soils, aluminum hydroxide is converted into mobile ions, which have a negative impact on the growth and development of plants throughout the growing season. When oat plants are exposed to aluminum ions, cell division in the cortex is disrupted, which leads to deformation of the root system (the length of the root decreases, the color changes, the thickness increases). The resulting transformations lead to a decrease in the efficiency of nutrient absorption by the root system of oat plants, and as a consequence, there is a decrease in yield and deterioration in grain quality.

The **purpose** to study the effect of aluminum ions on the growth activity of oats at an early stage of ontogenesis.

Materials and methods. The studies were conducted in the laboratory of genomic research in plant growing Research Agricultural Institute of the Northern Trans-Urals, branch of the Federal Research Center of Tyumen Scientific Center, Siberian branch, Russian Academy of Sciences in 2024. The object of research into the effect of aluminum ions on growth activity in the first 7 days of life were 20 varieties of oats (*Avena sativa* L.). Oat genotypes were germinated using the roll method according to GOST 12038-85 “Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination”. The experimental variants for germinating oat plants included: distilled water (control); solutions with aluminum ion concentrations of 4, 9 and 15 mmol/l. The sulfate derivative of aluminum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) was chosen as a source

of aluminum ions. The effect of stress on cells of oat genotypes in the root cap was studied under the influence of increasing concentration of aluminum ions. The presence of starch grains in the root cap of oat genotypes was assessed using an Optika B-500Tpl light microscope at 400x magnification. To stain starch grains, a 1% solution of iodine in lactic acid was used. Statistical data processing and variance analysis were performed using the AgCStat and Statistica programs for the Microsoft Excel software product.

Results. Germination of oat genotypes in solutions with an aluminum ion concentration of 4 mmol/l on the 7th day had a negative impact on the development of the root system - the root length index (RLI) reached 27-65% relative to the control. The most resistant to the impact of the stress factor with an Al^{3+} concentration of 4 mmol/l were the genotypes Gunter (k-14957), Berber (k-15689) and Sapsan (k-15444) – the RLI was 64-65% relative to the control. Among the studied oat genotypes, a group of varieties susceptible to the effects of increasing concentrations of aluminum ions (4-15 mmol/l) was identified: Faust (k-14781), 207h12 (k-15809), 325h12 (k-15808), and Chervonny (k-2896). The average value of the RLI in the susceptible group reached: 4 mmol/l – 35; 9 mmol/l – 17%; 15 mmol/l – 9% relative to the control. According to the results of a two-factor analysis of variance, the influence of aluminum ions on the development of the length of primary roots (93%) and the ratio of air-dry mass of roots and shoots (65%) of oat genotypes was established ($F_{fact.} > F_{theor.}$). Oat genotypes susceptible to the stress factor showed signs of destruction of starch grains in the root cap at an Al^{3+} concentration of 9 mmol/l. These changes are associated with structural disruption of cells in the root cap, which ultimately leads to a loss of geotropic sensitivity in plants.

Conclusion. As a result of the conducted studies, tolerant oat genotypes to the effects of increasing concentrations of aluminum ions (4-15 mmol/l) during the juvenile period were identified: Berber (k-15924), 162h15 (k-15925), Argamak (k-14648) and Sapsan (k-15444). The average value of the root length index of the most resistant oat genotypes in variants with increasing concentration of aluminum ions reached: 4 mmol/l – 62; 9 mmol/l – 32%; 15 mmol/l – 13% relative to the control. The main target of the toxic effects of aluminum ions on oat plants were primary roots. Under the influence of the stress factor, the index of the ratio of roots and shoots of oat genotypes decreased by 1.5-3.8 times relative to the control values. A relationship has been established between the resistance of oat genotypes to aluminum ions and the presence of starch grains in the root cap.

Keywords: oats; *Avena sativa* L.; aluminum ions; stress factor; growth activity; aluminum resistance; soil acidity; root cap; starch grains

For citation. Akhtyamova, A. A. (2026). Micromorphological changes in oats (*Avena sativa* L.) in the juvenile period under toxic exposure to aluminum ions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 244–261. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391>

Введение

Овёс посевной (*Avena sativa* L.) – это злаковое однолетнее травянистое растение, которое широко распространено в кормовой и пищевой сфере сельского хозяйства по всему миру [6; 14; 15]. В 2024 году по данным Росстата посевные площади овса в Российской Федерации составили 1,7 млн. га. В условиях высокой антропогенной нагрузки популяризации овса способствовала генетически заложенная устойчивость на эдафический стресс и неприхотливость к почвенному плодородию.

Одним из важных абиотических стресс-факторов для растений является кислотность почв, которая сопровождается алюмотоксичностью. В кислых почвах гидроокись алюминия преобразуется в подвижные ионы, которые оказывают влияние на рост и развитие растений на протяжении всей вегетации [17]. Наиболее активная подвижность ионов алюминия проявляется на кислых почвах с $\text{pH} < 5,0$ [20–21]. При продолжительном взаимодействии растений с ионами алюминия происходит нарушение клеточного метаболизма, что приводит к деформации корневой системы [16; 22; 23]. Вызванные трансформации приводят к снижению эффективности поглощения питательных веществ корневой системой растений. В результате происходит не только снижение урожайности, но и ухудшение качества зерна.

На долю кислых почв пахотного фонда России приходится около 30% площади, основная часть которой сосредоточена в лесостепной и подтаежной зоне [11]. Это крайне важно для определения стратегии агропромышленного комплекса страны, поскольку получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур ограничивается не только кислотностью почв, но и климатическими особенностями.

С переходом на качественно новый уровень селекции сельскохозяйственных культур, в том числе зерновых, появилась возможность создания новых сортов, обладающих генетической устойчивостью к неблагоприятным абиотическим факторам [9; 10]. В связи с этим приоритетным исследованием становится поиск генетических форм, обладающих устойчивостью к токсическому действию алюминия с целью их вовлечения в селекционный процесс. Как показали исследования многих ученых, первичный скрининг генотипов зерновых культур на выявление чувствительных и устойчивых к высокому содержанию ионов алюминия в почвенном растворе можно проводить на ранних этапах онтогенеза растения [1; 18].

Цель исследования – изучить влияние ионов алюминия на ростовую активность генотипов овса на раннем этапе онтогенеза.

Материалы и методы

Изучение реакции овса на различные концентрации ионов алюминия проводили в лаборатории геномных исследований в растениеводстве НИ-ИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН в 2024 году. Исследования основаны на способности семян овса посевного (*Avena sativa* L.) реагировать на изменение концентрации ионов алюминия в растворе при прорастивании. Ранее А.Г. Баталовой с соавторами было установлено, что овёс обладает эдафической устойчивостью на протяжении всей вегетации и способен прорасти при повышенном содержании ионов алюминия и других солей [3].

Схема опыта была представлена в следующем виде: Контроль (дистиллированная вода); растворы для прорастивания зерна с возрастающей концентрацией ионов алюминия: 4, 9 и 15 ммоль/литр. В качестве источника ионов алюминия была выбрана его сульфатная производная ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Объектом исследований были 20 сортов овса посевного (*Avena sativa* L.): Аватар (к-15443), 25h18 (к-15926), Скороспелый (к-11717), Гунтер (к-14957), 178h13 (к-15924), 94h18 (к-15928), Бербер (к-15689), 162h15 (к-15925), Аргмак (к-14648), Сапсан (к-15444), Эклипс (к-15187), Медведь (к-15494), Кречет (к-14857), Дэнс (к-14782), Фаленец (к-15851), Санур (к-15616), Фауст (к-14781), 207h12 (к-15809), 325h12 (к-15808) и Червонный (к-2896), которые являются селекционным достижением Кировской селекционной станции [4; 7].

Исследования проводили по ГОСТу 12038-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». На лист увлажнённой соответствующим раствором фильтровальной бумаги раскладывали семена овса зародышами вниз по линии, проведённой на расстоянии 3 см от верхнего края листа. Сверху семена накрывали увлажненным листом бумаги, затем неплотно сворачивали в рулон и помещали в вертикальном положении в ёмкость с раствором. Генотипы овса для прорастания размещали в электрическом суховоздушном термостате ТС-1/80 СПУ при температуре 20 °С. По истечении 7-и дней у проростков был произведен замер длины наибольшего корня каждого растения на всех вариантах и контроле. Расчет индекса длины корня проводили по формуле 1.

$$\text{ИДК} = \frac{L_{\text{оп}}}{L_{\text{к}}} \times 100\% \quad (1)$$

где: ИДК – индекс длины корня, %; $L_{\text{оп}}$ – длина корня опытного образца, мм; $L_{\text{к}}$ – длина корня контрольного образца, мм.

Реакцию на окрашивание крахмальных зерен в корневом чехлике опытных образцов проводили при помощи световой микроскопии в 400 кратном увеличении. Для окрашивания крахмальных зерен использовали 1%

раствор йода в молочной кислоте [2]. Срезанные кончики корешков помещали в йодный раствор на 10 мин. По истечении времени корешки просматривали в микроскоп и фотографировали.

Математическую обработку данных и дисперсионный анализ проводили с использованием программ AgCStat и Statistica для программного продукта Microsoft Excel [8].

Результаты

В присутствии ионов алюминия в растворе корни растений изменяются, замедляется их рост, корешки укорачиваются и становятся толще, что в результате отражается на росте и развитии. Поэтому произведя расчёт индекса длины корня (ИДК) относительно контрольных значений 20 генотипов овса, выращенных в растворах с концентрацией ионов алюминия 4, 9 и 15 ммоль/л, позволило реализовать кластерный анализ по методу Варда (рис. 1). В результате кластеризации изучаемые генотипы разделились поровну на две группы с расстоянием 116 единиц. Во второй кластер (К II) вошли 10 генотипов овса значения ИДК на варианте с концентрацией Al^{3+} 4 ммоль/л составили 36-49 % относительно контроля (табл. 1).

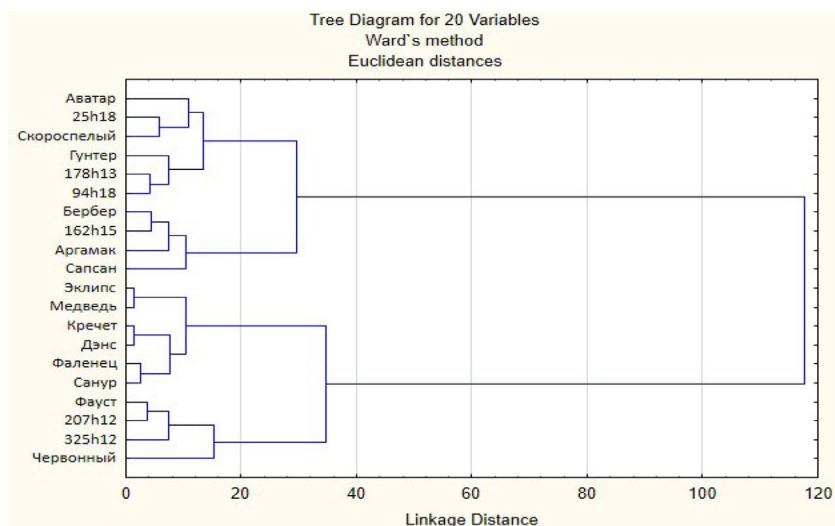


Рис. 1. Результаты кластеризации индекса длины корня генотипов овса при различных концентрациях ионов алюминия в растворе

Fig. 1. Results of clustering the root length index of oat genotypes at various concentrations of aluminum ions in solution

Значения ИДК образцов проросших на растворах с концентрацией Al^{3+} 4 ммоль/л, которые относятся к первому кластеру (К I) были в 1,4 раза выше К II и составили 50...65 % относительно контроля. Наиболее устойчивыми к стресс-фактору в К I и отделившейся на 30 единиц в данной группе были сорта: Бербер (к-15689), 162h15 (к-15925), Аргамак (к-14648) и Сапсан (к-15444). При повышении концентрации ионов алюминия в растворе до 9 ммоль/л сохраняется та же тенденция по алюмоустойчивости у данной группы ($F_{факт.} > F_{теор.}$).

Таблица 1.

Индекс длины корня генотипов овса в зависимости от возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе, % относительно контроля

Table 1. Root length index of oat genotypes as a function of increasing aluminum ion concentration in the solution, % relative to the control

№ п/п	Сорт (номер по каталогу ВИР) (фактор А)	Концентрация Al^{3+} в растворе, ммоль/л (фактор В)		
		4	9	15
1	Аватар (к-15443)	57	16	10
2	25h18 (к-15926)	54	22	14
3	Скороспелый (к-11717)	50	25	11
4	Гунтер (к-14957)	64	23	10
5	178h13 (к-15924)	58	27	11
6	94h18 (к-15928)	58	23	10
7	Бербер (к-15689)	65	29	10
8	162h15 (к-15925)	60	31	10
9	Аргамак (к-14648)	59	31	15
10	Сапсан (к-15444)	65	37	15
11	Эклипс (к-15187)	45	22	12
12	Медведь (к-15494)	46	22	13
13	Кречет (к-14857)	44	19	10
14	Дэнс (к-14782)	44	18	10
15	Фаленец (к-15851)	49	17	10
16	Санур (к-15616)	47	16	11
17	Фауст (к-14781)	36	15	9
18	207h12 (к-15809)	39	17	10
19	325h12 (к-15808)	36	22	10
20	Червонный (к-2896)	27	12	8
Среднее в группе, n=20		50	22	11

HCP_{05} по фактору А=2,2 %; HCP_{05} по фактору В=1,6 %; HCP_{05} по взаимодействию АВ=1,9 %

На варианте с максимальной концентрацией ионов алюминия (15 ммоль/л) значения ИДК опытных образцов снижаются до 8-15 % относительно контроля. Наиболее устойчивые к токсическому проявлению ионов алюминия были сорта Аргамак (к-14648) и Сапсан (к-15444).

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что доля влияния фактора «генотип» овса на значения индекса длины корня относительно контроля составляет 2 % (табл. 2). В то время как доля влияния возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе на ростовую активность корешков овса в ювенильный период достигает 93%.

Таблица 2.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа индекса длины корня генотипов овса при различной концентрации Al^{3+} в растворе

Table 2. Results of a two-way analysis of variance for the root length index of oat genotypes at different concentrations of Al^{3+} in solution

Источник вариации	$F_{\text{факт}}$	$F_{\text{теор}}$	Влияние, %
Сорт	14	1,7	2
Концентрация Al^{3+} в растворе	3727	2,6	93
Взаимодействие	7	1,4	3

Также одним из важных показателей при оценке устойчивости растений к стрессу является соотношение массы корней и побегов [19]. В нормальных условиях масса побегов превышает массу корней – это обусловлено характером перераспределения пластических веществ для формирования и активного роста надземной части. В зависимости от стресс-фактора темпы роста и развития растений изменяются, подстраиваясь к условиям окружающей среды. Соотношение массы корней и побегов (СКП) у семидневных генотипов овса, проросших на контроле (дистиллированная вода), варьировало от 0,3 до 1,5 ед (табл. 3). Такой диапазон обусловлен сортовыми особенностями овса. Прорастивание растений на варианте с концентрацией ионов алюминия 4 ммоль/л привело к увеличению индекса СКП на 0,2-0,3 ед. относительно контроля у сортов: Эклипс, Медведь и Кречет. Это обусловлено тем, что в присутствии ионов алюминия рост длины корней замедляется, но при этом значения массы корней увеличиваются относительно контроля за счет их утолщения. Под действием ионов алюминия у сорта 325h12 (к-15808) индекс СКП уменьшился в 2 раза относительно контроля и составил 0,7 – это обусловлено снижением массы корней, что характеризует данный сорт как неустойчивый. Остальные изучаемые генотипы овса имели незначительные колебания индекса СКП на варианте с концентрацией Al^{3+} в растворе 4 ммоль/л.

Таблица 3.

**Соотношение корней и проростков генотипов овса в зависимости
от возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе**

Table 3. Ratio of roots to shoots in oat genotypes as a function of increasing aluminum ion concentration in the solution

№ п/п	Сорт (номер по каталогу ВИР) (<i>фактор А</i>)	Концентрация Al^{3+} в растворе, ммоль/л (<i>фактор В</i>)			
		Контроль	4	9	15
1	Аватар (к-15443)	0,7	0,6	0,3	0,3
2	25h18 (к-15926)	0,6	0,7	0,5	0,3
3	Скороспелый (к-11717)	0,6	0,7	0,5	0,2
4	Гунтер (к-14957)	0,7	0,7	0,5	0,2
5	178h13 (к-15924)	0,8	0,8	0,6	0,3
6	94h18 (к-15928)	0,6	0,7	0,5	0,3
7	Бербер (к-15689)	0,6	0,7	0,5	0,2
8	162h15 (к-15925)	0,7	0,7	0,5	0,2
9	Армак (к-14648)	0,6	0,7	0,6	0,4
10	Сапсан (к-15444)	0,6	0,7	0,6	0,3
11	Эклипс (к-15187)	0,5	0,7	0,5	0,3
12	Медведь (к-15494)	0,7	0,9	0,5	0,4
13	Кречет (к-14857)	0,3	0,6	0,5	0,3
14	Дэнс (к-14782)	0,6	0,6	0,4	0,2
15	Фаленец (к-15851)	0,6	0,6	0,4	0,2
16	Санур (к-15616)	0,5	0,5	0,3	0,2
17	Фауст (к-14781)	0,7	0,7	0,4	0,2
18	207h12 (к-15809)	0,7	0,7	0,5	0,3
19	325h12 (к-15808)	1,5	0,7	0,6	0,3
20	Червонный (к-2896)	0,7	0,6	0,4	0,2
Среднее в группе, n=20		0,7	0,7	0,5	0,3
<i>HCP₀₅ по фактору А=0,04; HCP₀₅ по фактору В=0,03; HCP₀₅ по взаимодействию АВ=0,03</i>					

Дальнейшее повышение концентрации ионов алюминия в растворе приводило к постепенному снижению индекса СКП за счет уменьшения массы корней и проростков генотипов овса, достигнув 0,2-0,4 ед. В результате двухфакторного дисперсионного анализа, было установлено, что доля влияния изучаемых генотипов овса на индекс соотношения корней и побегов составляет 15 % (табл. 4). Тогда как доля влияния ионов алюминия с концентрацией 4-15 моль/л в растворе на индекс СКП в первые семь дней жизни растений достигает 65 %.

Таблица 4.

**Результаты двухфакторного дисперсионного анализа
соотношения массы корней и проростков генотипов овса при различной
концентрации Al^{3+} в растворе**

Table 4. Results of a two-factor analysis of variance for the ratio of root to shoot mass
in oat genotypes at different concentrations of Al^{3+} in solution

Источник вариации	$F_{\text{факт}}$	$F_{\text{теор}}$	Влияние, %
Сорт	25313	1,7	15
Концентрация Al^{3+} в растворе	663753	2,6	65
Взаимодействие	10541	1,4	20

В связи с визуальным изменением корешков растений овса под действием токсичных ионов алюминия была проведена реакция на наличие крахмальных зерен в корневом чехлике при помощи йодного раствора. В работе Н.В. Кононенко с коллегами при тестировании ячменя к токсическому действию ионов алюминия было установлено, что основной мишенью являются дифференцированные клетки корневого чехлика [12].

В этой части корешков расположена зона роста и деления клеток, а также крахмальные зерна, которые отвечают за гравитропическую направленность роста корней [5, 13]. Проведя тестирование йодным раствором 20 генотипов овса на контроле наблюдали интенсивное окрашивание крахмальных зерен.

Сорта овса, которые по показателю ИДК вошли в первый кластер на высоких концентрациях Al^{3+} (9 ммоль/л) в корневом чехлике наблюдали локализацию крахмальных зерен. На рисунке 2 представлены серии фотографий генотипов овса 162h25 (к-15925) и Сапсан (к-15444), на которых прослеживается динамика интенсивности окрашивания крахмальных зерен в зависимости от увеличения концентрации Al^{3+} в растворе.

Генотипы овса, которые по показателю ИДК входили во второй кластер, имели признаки деструкции крахмальных зерен. Например у сортов Червонный (к-2896) и 207h12 (к-15809) при концентрации ионов алюминия 9 ммоль/л крахмальные зерна не обнаруживаются. Эти изменения связаны со структурным нарушением клеток в корневом чехлике под действием токсичных ионов алюминия, что в результате приводит к утрате геотропической чувствительности и как следствие к угнетению развития корневой системы генотипов овса.

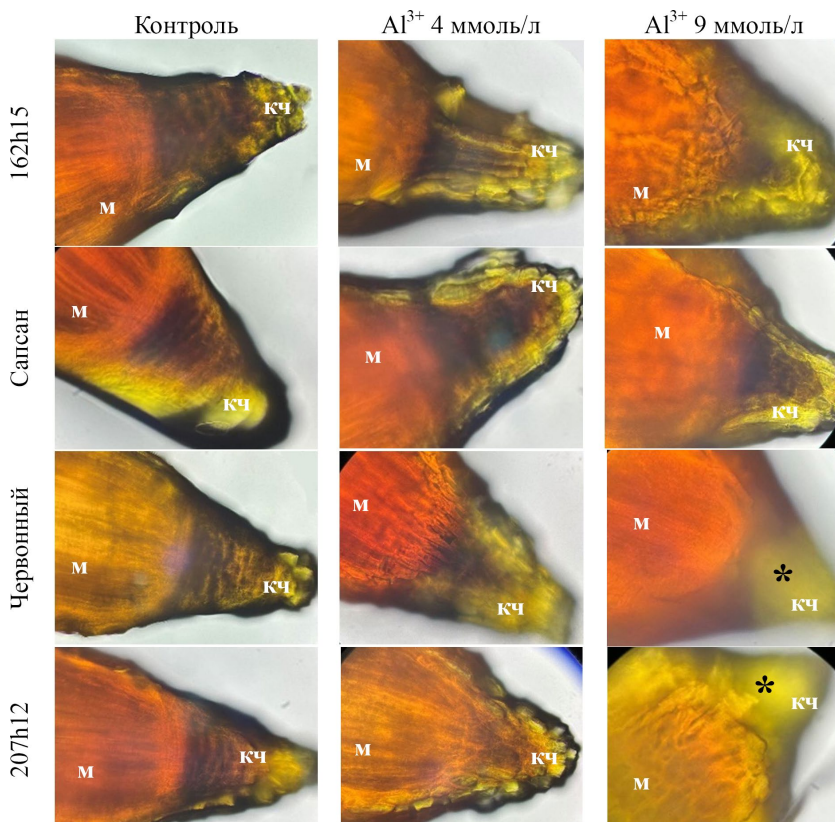


Рис. 2. Окрашенные корешки генотипов овса 1% раствором йода. Обозначения: м – меристема; кч – корневой чехлик; * - отсутствие крахмальных зерен.

Fig. 2. Oat genotype roots stained with a 1% iodine solution

Legend: m – meristem; rc – root cap; * – absence of starch grains.

Заключение

Ионы алюминия оказывают существенное влияние в первые семь дней жизни на рост и развитие генотипов овса. В результате проведенных исследований 20 генотипов овса были выявлены наиболее устойчивые к воздействию ионов алюминия (4-15 ммоль/л) сорта: Бербер (к-15924), 162h15 (к-15925), Аргмак (к-14648) и Сапсан (к-15444). Среднее значение индекса длины корня на вариантах с возрастающей концентрацией ионов алюминия достигло: 4 ммоль/л – 62%; 9 ммоль/л – 32%; 15 ммоль/л –

13% относительно контроля. Среди изученных генотипов овса выявлена группа восприимчивых сортов к воздействию ионов алюминия: Фауст (к-14781), 207h12 (к-15809), 325h12 (к-15808) и Червонный (к-2896). Среднее значение ИДК у восприимчивой группы достигло: 4 ммоль/л – 35; 9 ммоль/л – 17%; 15 ммоль/л – 9% относительно контроля. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа установлено влияние ионов алюминия на развитие длины первичных корешков (93%) и соотношение воздушно-сухой массы корней и побегов (65%) генотипов овса ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$). Основной мишенью токсического проявления ионов алюминия на растение овса были первичные корешки. Под действием стресс-фактора индекс СКП изучаемых генотипов овса уменьшился в 1,5-3,8 раза относительно контрольных значений. Выявлено, что генотипы овса имеют непосредственную связь устойчивости к ионам алюминия с наличием крахмальных зерен в корневом чехлике, которые отвечают за гравитропическую направленность роста растений.

Информация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-00048.

Благодарности. Автор статьи выражает благодарности А.В. Любимовой кандидату биологических наук, заведующей лабораторией и Д.И. Еремину доктору биологических наук, ведущему научному сотруднику НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Асеева, Т. А., Зенкина, К. В., & Трифунтова, И. Б. (2021). Оценка зерновых яровых культур на устойчивость к алюминию. *Достижения науки и техники АПК*, 35(4), 35–40. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10405>. EDN: <https://elibrary.ru/POIKYW>
2. Барыкина, И. П., Веселова, Т. Д., & Девятков, А. Г. (2004). *Справочник по ботанической микротехнике. Основы и методы* [Учебное пособие]. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. ISBN: 5-211-06103-9. EDN: <https://elibrary.ru/RBBHDP>
3. Баталова, Г. А., Широких, И. Г., Тулякова, М. В., и др. (2015). Некоторые результаты и вопросы методологии селекции овса на устойчивость к эдафическому стрессу. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, (47)(4), 9–15. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2015.44.4.09-15>. EDN: <https://elibrary.ru/UCBQWX>

4. Баталова, Г. А., Тулякова, М. В., Пермякова, С. В., и др. (2014). Новые адаптивные сорта пленчатого овса. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, (41)(4), 4–8. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2014.41.4.04-08>. EDN: <https://elibrary.ru/SGWETP>
5. Бабенко, Л. М., Щербатюк, Н. Н., Климчук, Д. А., и др. (2018). Структурно-функциональные особенности клеток мезофила листьев контрастных по термоустойчивости сортов *TRITICUM AESTIVUM* при действии кратковременных температурных стрессов. *Цитология*, 60(2), 128–135. <https://doi.org/10.31116/tsitol.2018.02.08>. EDN: <https://elibrary.ru/NRQINH>
6. Воложанина, Е. Н. (2025). Кормовая продуктивность и адаптивные свойства плёнчатых и голозёрных генотипов овса в условиях Кировской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 26(2), 239–250. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.239-250>. EDN: <https://elibrary.ru/EKDKOO>
7. Воложанина, Е. Н., & Баталова, Г. А. (2023). Оценка адаптивности ярового пленчатого овса по урожайности и качеству зерна в условиях Кировской области. *Российская сельскохозяйственная наука*, (4), 8–12. <https://doi.org/10.31857/S2500262723040026>. EDN: <https://elibrary.ru/JXAKVR>
8. Гончар-Зайкин, П. П., & Чертов, В. Г. (2003). Надстройка к EXCEL для статистической оценки и анализа результатов полевых и лабораторных опытов. В *Рациональное природопользование и сельскохозяйственное производство в южных регионах Российской Федерации: сборник материалов научно-практической конференции «Разработка адаптивных систем природоохранных технологий производства сельскохозяйственной продукции в аридных районах России»* (с. 559–565). Москва.
9. Еремин, Д. И., Любимова, А. В., & Ахтямова, А. А. (2023). Элементы структуры урожайности как способ выявления засухоустойчивости современных сортов овса. *Достижения науки и техники АПК*, 37(7), 50–57. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_7_50. EDN: <https://elibrary.ru/MYBXXF>
10. Заикина, Е. А., Румянцев, С. Д., Сарварова, Е. Р., и др. (2019). Гены транскрипционных факторов, задействованных в ответе растений на абиотические стрессовые факторы. *Экологическая генетика*, 17(3), 47–58. <https://doi.org/10.17816/ecogen17347-58>. EDN: <https://elibrary.ru/IUIILV>
11. Каюгина, С. М., & Еремин, Д. И. (2022). Физико-химические свойства серых лесных почв восточной окраины Зауральского Плато. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
12. Кононенко, Н. В., Чабан, И. А., Смирнова, Е. А., и др. (2019). Тестирование устойчивости разных форм ячменя (*Hordeum vulgare* L.) к токсическому дей-

- ствию алюминия. *Теоретическая и прикладная экология*, (2), 121–130. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-121-130>. EDN: <https://elibrary.ru/LGPVFJ>
13. Кривобок, А. С., & Бибикова, Т. Н. (2019). Регуляция роста и пространственной ориентации боковых корней *Arabidopsis thaliana* L. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, (3), 80–94. <https://doi.org/10.34677/0021-342X-2019-3-80-94>. EDN: <https://elibrary.ru/UDOPLG>
14. Фомина, М. Н., Иванова, Ю. С., Брагин, Н. А., и др. (2024). Кормовая продуктивность и энергетическая питательность селекционных образцов овса посевного (*Avena sativa* L.) в условиях Северного Зауралья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*, 185(2), 116–127. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-2-116-127>. EDN: <https://elibrary.ru/ISJLVL>
15. Фомина, М. Н. (2015). Яровой овёс Фома. *Достижения науки и техники АПК*, 29(10), 63–66. EDN: <https://elibrary.ru/UMKOET>
16. Широких, И. Г., Назарова, Я. И., Огородникова, С. Ю., и др. (2020). Трансформация табака по гену синтеза глицинбетаина не ослабила чувствительность растений к токсичности алюминия в кислой почве. *Теоретическая и прикладная экология*, (2), 103–110. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-103-110>. EDN: <https://elibrary.ru/VQMKSA>
17. Шкуркин, С. И., Носиков, В. В., & Торшин, С. П. (2022). Основоположник коллоидной химии почв. *Плодородие*, (125)(2), 71–73. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.125.17>. EDN: <https://elibrary.ru/TPZPJT>
18. Щенникова, И. Н., & Шуплецова, О. Н. (2019). Источники для селекции ячменя устойчивого к токсичности алюминия. *Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса*, (39)(1), 22–25. <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1-22-25>. EDN: <https://elibrary.ru/QOOAXA>
19. Bláha, L. (2019). Importance of root-shoot ratio for crops production. *J Agron Agri Sci*, 2, 012. <https://doi.org/10.24966/AAS-8292/100012>
20. Lin-Tong, Y., Yi-Ping, Q., Huan-Xin, J., & Li-Song, C. (2013). Roles of organic acid anion secretion in aluminium tolerance of higher plants. *BioMed Research International*, 2013, 16. <https://doi.org/10.1155/2013/173682>
21. Huanhuan, G., Sang, Y., Jiayi, W., Liuyan, W., Ruili, W., Wei, L., Lijiao, M., Fang, Y., Qingyuan, Z., & Cui, C. (2020). Genome-wide association analysis of aluminum tolerance related traits in rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68, 335–357. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00989-2>. EDN: <https://elibrary.ru/DFVVFQ>
22. Muyuan, Y. Z., Jianwe, P., Lilin, W., Qing, G., & Chunyuan, H. (2003). Mutation induced enhancement of Al tolerance in barley cell lines. *Plant Science*, 164, 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00317-5). EDN: <https://elibrary.ru/BBTJTP>

23. Loskutov, I. G., Butris, V., Kosareva, I. A., Blinova, E. V., & Yu, L. Novikova. (2022). Aluminum tolerance and micronutrient content in the grain of oat cultivars with different levels of breeding improvement from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, 183(3), 96–110. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-3-96-110>. EDN: <https://elibrary.ru/WCLSXA>

References

1. Aseeva, T. A., Zenkina, K. V., & Trifuntova, I. B. (2021). Assessment of spring grain crops for aluminum resistance. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*, 35(4), 35–40. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10405>. EDN: <https://elibrary.ru/POIKYW>
2. Barykina, I. P., Veselova, T. D., & Devyatov, A. G. (2004). *Handbook on botanical microtechnique: Fundamentals and methods* [Educational manual]. Lomonosov Moscow State University. ISBN: 5-211-06103-9. EDN: <https://elibrary.ru/RBBHDP>
3. Batalova, G. A., Shirokikh, I. G., Tulyakova, M. V., et al. (2015). Some results and methodological issues in oat breeding for resistance to edaphic stress. *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 47(4), 9–15. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2015.44.4.09-15>. EDN: <https://elibrary.ru/UCBQWX>
4. Batalova, G. A., Tulyakova, M. V., Permyakova, S. V., et al. (2014). New adaptive varieties of hulled oats. *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 41(4), 4–8. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2014.41.4.04-08>. EDN: <https://elibrary.ru/SGWETP>
5. Babenko, L. M., Shcherbatyuk, N. N., Klimchuk, D. A., et al. (2018). Structural and functional features of mesophyll cells in leaves of *Triticum aestivum* varieties contrasting in thermotolerance under short-term temperature stresses. *Tsitologiya*, 60(2), 128–135. <https://doi.org/10.31116/tsitol.2018.02.08>. EDN: <https://elibrary.ru/NRQINH>
6. Vologzhanina, E. N. (2025). Feed productivity and adaptive traits of hulled and naked oat genotypes in the Kirov region. *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 26(2), 239–250. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.239-250>. EDN: <https://elibrary.ru/EKDKOO>
7. Vologzhanina, E. N., & Batalova, G. A. (2023). Assessment of adaptability of spring hulled oats by yield and grain quality in the Kirov region. *Rossiyskaya Sel'skokhozyaystvennaya Nauka*, (4), 8–12. <https://doi.org/10.31857/S2500262723040026>. EDN: <https://elibrary.ru/JXAKVR>
8. Gonchar-Zaikin, P. P., & Chertov, V. G. (2003). An add-in for EXCEL for statistical evaluation and analysis of field and laboratory experiment results. In *Rational nature management and agricultural production in the southern regions of the Russian Federation: Proceedings of the scientific and practical conference "Development of adaptive systems of environmental protection technologies for agricultural production in arid regions of Russia"* (pp. 559–565). Moscow.

9. Eremin, D. I., Lyubimova, A. V., & Akhtyamova, A. A. (2023). Elements of yield structure as a method for identifying drought tolerance in modern oat varieties. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*, 37(7), 50–57. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_7_50. EDN: <https://elibrary.ru/MYBXXF>
10. Zaikina, E. A., Rumyantsev, S. D., Sarvarova, E. R., et al. (2019). Genes of transcription factors involved in the plant response to abiotic stress factors. *Ekologicheskaya Genetika*, 17(3), 47–58. <https://doi.org/10.17816/ecogen17347-58>. EDN: <https://elibrary.ru/IUIILV>
11. Kayugina, S. M., & Eremin, D. I. (2022). Physicochemical properties of gray forest soils in the eastern margin of the Trans-Ural Plateau. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
12. Kononenko, N. V., Chaban, I. A., Smirnova, E. A., et al. (2019). Testing the resistance of different barley (*Hordeum vulgare* L.) forms to the toxic effect of aluminum. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya*, (2), 121–130. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-121-130>. EDN: <https://elibrary.ru/LGPVFI>
13. Krivobok, A. S., & Bibikova, T. N. (2019). Regulation of growth and spatial orientation of lateral roots in *Arabidopsis thaliana* L. *Izvestiya Timiryazevskoy Sel'skokhozyaystvennoy Akademii*, (3), 80–94. <https://doi.org/10.34677/0021-342X-2019-3-80-94>. EDN: <https://elibrary.ru/UDOPLG>
14. Fomina, M. N., Ivanova, Yu. S., Bragin, N. A., et al. (2024). Feed productivity and energy value of breeding samples of common oat (*Avena sativa* L.) in the conditions of Northern Trans-Urals. *Trudy po Prikladnoy Botanike, Genetike i Selektzii*, 185(2), 116–127. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-2-116-127>. EDN: <https://elibrary.ru/ISJLVL>
15. Fomina, M. N. (2015). Spring oat 'Foma'. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*, 29(10), 63–66. EDN: <https://elibrary.ru/UMKOET>
16. Shirokikh, I. G., Nazarova, Ya. I., Ogorodnikova, S. Yu., et al. (2020). Transformation of tobacco with the glycine betaine synthesis gene did not reduce plant sensitivity to aluminum toxicity in acidic soil. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya*, (2), 103–110. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-103-110>. EDN: <https://elibrary.ru/VQMKSA>
17. Shkurkin, S. I., Nosikov, V. V., & Torshin, S. P. (2022). The founder of soil colloid chemistry. *Plodorodie*, 125(2), 71–73. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.125.17>. EDN: <https://elibrary.ru/TPZPJT>
18. Shchennikova, I. N., & Shupletsova, O. N. (2019). Sources for breeding aluminum-tolerant barley. *Theoretical and Applied Problems of the Agro-Industrial Complex*, 39(1), 22–25. <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1-22-25>. EDN: <https://elibrary.ru/QOOAXA>
19. Bláha, L. (2019). Importance of root-shoot ratio for crops production. *J Agron Agri Sci*, 2, 012. <https://doi.org/10.24966/AAS-8292/100012>

20. Lin-Tong, Y., Yi-Ping, Q., Huan-Xin, J., & Li-Song, C. (2013). Roles of organic acid anion secretion in aluminium tolerance of higher plants. *BioMed Research International*, 2013, 16. <https://doi.org/10.1155/2013/173682>
21. Huanhuan, G., Sang, Y., Jiayi, W., Liuyan, W., Ruili, W., Wei, L., Lijiao, M., Fang, Y., Qingyuan, Z., & Cui, C. (2020). Genome-wide association analysis of aluminum tolerance related traits in rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68, 335–357. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00989-2>. EDN: <https://elibrary.ru/DFVVFQ>
22. Muyuan, Y. Z., Jianwe, P., Lilin, W., Qing, G., & Chunyuan, H. (2003). Mutation induced enhancement of Al tolerance in barley cell lines. *Plant Science*, 164, 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00317-5). EDN: <https://elibrary.ru/BBTJTP>
23. Loskutov, I. G., Butris, V., Kosareva, I. A., Blinova, E. V., & Yu, L. Novikova. (2022). Aluminum tolerance and micronutrient content in the grain of oat cultivars with different levels of breeding improvement from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, 183(3), 96–110. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-3-96-110>. EDN: <https://elibrary.ru/WCLSXA>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Ахтямова Анастасия Андреевна, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН
ул. Бурлаки, 2, пос. Московский, Тюменский р-н, Тюменская обл., 625501, Российская Федерация
gen.i72@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anastasia A. Akhtyamova, Ph.D. Agricultural Sciences, Senior Researcher

Research Agricultural Institute of the Northern Trans-Urals, branch of the Federal Research Center of Tyumen Scientific Center, Siberian branch, Russian Academy of Sciences
2, Burlaki Str, Moskovskii, Tyumen Region, 625501, Russian Federation
gen.i72@mail.ru
SPIN-code: 6197-9642
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-6958>
Scopus Author ID: 58520030500

Поступила 16.06.2025

После рецензирования 19.07.2025

Принята 05.08.2025

Received 16.06.2025

Revised 19.07.2025

Accepted 05.08.2025

Садоводство и лесоводство / Horticulture and Forestry

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1414](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1414)EDN: [LNXARQ](https://www.edn.ru/LNXARQ)

UDC 634.11:631.541



Study of adaptive forms of clonal apple tree rootstocks in extreme conditions of the South Ural

A.A. Borisova¹, E.Z. Savin², V.A. Novikov³, T.V. Berezina¹,
A.A. Mushinsky⁴, A.Zh. Saudabaeva⁴

¹*Federal State Budgetary Scientific Organization "Federal Horticultural Center
for Breeding, Agrotechnology and Nursery, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russian Federation*

³*Botanical Garden of Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation*

⁴*Orenburg Branch of the Federal State Budgetary Research Center of Horticulture,
Orenburg, Russian Federation*

Abstract

Background. In the context of horticultural intensification, rootstocks play a key role in ensuring plantation resilience to extreme environmental factors. The Southern Urals region is characterized by a sharply continental climate with moisture deficiency, high summer and low winter temperatures, necessitating the use of specialized adaptive rootstocks. Traditional dwarf forms (e.g., M9) are losing relevance due to advancements in tree growth regulation technologies and mechanization for tall plantations. Domestic studies confirm the promise of semi-dwarf rootstocks (54-118, MM106, MM111) and regional forms (Volga 3, Ural 5), which exhibit drought and frost resistance. Of particular interest are new OB-series lines selected in the Southern Urals and undergoing trials at the Orenburg State University (OSU) Botanical Garden. Their comprehensive evaluation based on biometric, physiological, and productivity traits will identify optimal genotypes for developing resilient scion-rootstock combinations, aligning with the principles of adaptive horticulture established by I. V. Michurin. The findings will contribute to competitive horticulture under Russia's extreme conditions.

Purpose. To conduct a comparative study of the resistance of selected apple clonal rootstock forms to biotic and abiotic stressors, assessing their rhizogenic capacity and productivity in a mother plantation established by the vertical layering method.

Materials and methods. The study was conducted in the Southern Urals (OSU Botanical Garden) on southern calcareous chernozems under a sharply continental climate (winter temperatures down to -48 °C, summer up to +42 °C, precipitation 363 mm/year).

The subjects were 37 promising OB-series apple clonal rootstocks selected in 2008 from second-generation seedlings obtained through open pollination of rootstocks and apple cultivars from various geographic zones (Kuibyshev, Donetsk, Crimean stations, etc.). Seed sowing (2007) and seedling evaluation followed fruit crop (1999) and clonal rootstock (1980) study methodologies. Field germination, standard rootstock yield, and morphological traits (fibrous roots, brachyblasts) were recorded. Selected forms were propagated in a mother plantation by vertical layering, analyzing survival, preservation, and productivity (standard layer yield, rooting capacity) compared to the control (Ural 5 rootstock). Statistical analysis was performed using Statistica 9.0 and Microsoft Excel (ANOVA, Student's t-test).

Results. The features of replication and adaptation to biotic and abiotic stress of promising forms of clonal apple tree rootstocks obtained by the free pollination method and by selection among apple seedlings, which had increased drought and frost resistance of the root system, and which were unpretentious to soil conditions, were studied in the South Ural climatic and soil conditions. Plants were characterized by better adaptability to biotic and abiotic stressors and a high reproduction rate compared to the control (Ural 5). The OB 2-4, OB 3-4, OB 3-14, OB 2-12, OB 2-15 forms and some other hybrids were distinguished by vegetative productivity. A slight relative sampling error (less than 25%) indicates a high reliability of the obtained results. The exception was the OB 2-1 and OB 2-8 forms, which require additional study, since the annual yield of vertical branches of these forms per unit area and the average over the years exceeded the control.

Keywords: forms of clonal rootstocks; vertical branches; adaptability; South Ural

For citation. Borisova, A. A., Savin, E. Z., Novikov, V. A., Berezina, T. V., Mushinsky, A. A., & Saudabaeva, A. Zh. (2026). Study of adaptive forms of clonal apple tree rootstocks in extreme conditions of the South Ural. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 262–282. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1414>

Изучение адаптивных форм клоновых подвоев яблони в экстремальных условиях Южного Урала

А.А. Борисова¹, Е.З. Савин², В.А. Новиков³, Т.В. Березина¹,
А.А. Мушинский⁴, А.Ж. Саудабаева⁴

¹Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, Москва, Российская Федерация

²Институт степи Уральского отделения Российской Академии наук, Оренбург, Российская Федерация

³Ботанический сад ОГУ, Оренбург, Российская Федерация

⁴Оренбургский филиал ФГБНУ ФНЦ Садоводства, Оренбург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В условиях интенсификации садоводства ключевая роль принадлежит подвоям, обеспечивающим устойчивость насаждений к экстремальным

факторам среды. Южный Урал характеризуется резко континентальным климатом с дефицитом влаги, высокими летними и низкими зимними температурами, что требует использования специализированных адаптивных подвоев. Традиционные карликовые формы (например, М9) теряют актуальность в связи с развитием технологий регулирования роста деревьев и механизации ухода за высокорослыми насаждениями. Отечественные исследования подтверждают перспективность среднерослых подвоев (54-118, ММ106, ММ111) и региональных форм (Волга 3, Урал 5), обладающих засухо- и морозоустойчивостью. Особый интерес представляют новые линии серии ОБ, отобранные в Южно-Уральском регионе и проходящие испытания в Ботаническом саду ОГУ. Их комплексная оценка по биометрическим, физиологическим и продуктивным показателям позволит выделить оптимальные генотипы для создания устойчивых привойно-подвойных комбинаций, что соответствует принципам адаптивного садоводства, заложенным И.В. Мичуриным. Результаты исследований внесут вклад в развитие конкурентоспособного садоводства в экстремальных условиях России.

Цель. Провести сравнительное изучение устойчивости выделенных форм клоновых подвоев яблони к биотическим и абиотическим стрессорам, оценить их ризогенную способность и продуктивность в маточнике, заложенном методом вертикальных отводков.

Материалы и методы. Исследование проводили в условиях Южного Урала (Ботанический сад ОГУ) на черноземах южных карбонатных с резко континентальным климатом (температуры от -48°C зимой до $+42^{\circ}\text{C}$ летом, осадки 363 мм/год). Объектами изучения стали 37 перспективных форм клоновых подвоев яблони серии ОБ, отобранных в 2008 г. из семян второго поколения, полученных от свободного опыления подвоев и сортов яблони из различных географических зон (Куйбышевская, Донецкая, Крымская станции и др.). Посев семян (2007 г.) и оценку семян проводили по методикам сортоизучения плодовых культур (1999) и клоновых подвоев (1980). Учитывали полевую всхожесть, выход стандартных подвоев, морфологические признаки (мочковатость корней, наличие брахибластов). Отобранные формы размножали в маточнике методом вертикальных отводков, анализируя приживаемость, сохранность, продуктивность (выход стандартных отводков, окореняемость) в сравнении с контролем (подвой Урал 5). Статистическую обработку данных выполняли в Statistica 9.0 и Microsoft Excel (дисперсионный анализ, критерий Стьюдента).

Результаты. В почвенно-климатических условиях Южного Урала изучены особенности тиражирования и адаптации к биотическим и абиотическим стрессорам перспективных форм клоновых подвоев яблони, полученных методом свободного опыления и выделенных среди отборов из семян яблони, которые обладают

повышенной засухоустойчивостью и морозостойкостью корневой системы, неприхотливы к почвенным условиям. По сравнению с контролем (Урал 5) растения отличаются лучшей адаптивностью к биотическим и абиотическим стрессорам и высоким коэффициентом размножения. По вегетативной продуктивности отличались формы ОБ 2-4, ОБ 3-4, ОБ 3-14, ОБ 2-12, ОБ 2-15 и несколько других гибридов. Незначительная относительная ошибка выборки (менее 25 %) свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов. Исключение составили формы ОБ 2-1 и ОБ 2-8, требующие дополнительного изучения, поскольку по ежегодному выходу вертикальных отводков с единицы площади и в среднем по годам показатели превышали контроль.

Ключевые слова: формы клоновых подвоев; вертикальные отводки; адаптивность; Южный Урал

Для цитирования. Борисова, А. А., Савин, Е. З., Новиков, В. А., Березина, Т. В., Мушинский, А. А., & Саудабаева, А. Ж. (2026). Изучение адаптивных форм клоновых подвоев яблони в экстремальных условиях Южного Урала. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 262–282. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1414>

Introduction

The importance of rootstocks in the intensification of nursery practice is difficult to overestimate, since in extreme gardening conditions in most of the territory of Russia, rootstocks have to meet a number of requirements: they have to be adapted to the environmental conditions of the region of growth, be well compatible with pomological varieties, and achieve high biometric indicators of the aboveground part and root system development, thus providing the production of high-quality seedlings for planting of the intensive industrial plantings [1-2].

In recent years, the M9 dwarf rootstock for apple trees has been considered the standard of quality in world gardening. Plants on this rootstock reached no more than 2 m in height and had good resistance to diseases and compatibility with most varieties of apple trees. The main advantage until recently was considered the ability to carry out fruit harvesting and planting care without using platforms. In recent years, interest in dwarf rootstocks has been declining, since formulas of tree height to regulation had been developed in order to maximize the use of an inexhaustible natural source of solar energy by planting. According to calculations, the taller the tree is, the more efficiently it uses a natural source to form a crop. Additionally, in order to accelerate the entry of plants into the fruiting period, from the second year after planting in the garden, the

shortening of the conductor is completely stopped, which, like in the nursery, contributes to an increase in the height of the tree [3]. Modern mechanization tools are designed taking into account the vigorous growth of plantings and have platforms that allow for effective harvesting and appropriate care of the garden. The advantage of using dwarf rootstocks is increasingly lost and research on the development of technologies for the production of higher rootstocks, such as MM106 and MM111, begins [4].

According to the results of domestic scientific data for Central Russia, the medium-sized clonal rootstock 54-118, which is effectively propagated by the method of vertical branches using various surfactants and fertilizers, is also the most productive [5-7].

Michurin in his works emphasized the need to select the forms of rootstock for each region of Russia. At the same time, a comparative analysis of apple yields of the world exporting countries testifies not in favor of the productivity of domestic industrial plantings, which confirms the importance of planting by material adaptive to the climatic conditions of Russia and having an optimal scion-rootstock combination [8, 9]. Tests of rootstocks of various forms in extreme conditions of the South Ural zone, characterized by insufficient moisture, high temperatures during the vegetation period, and low temperatures during the dormant period, are relevant. It has been found that such forms of clonal rootstocks as 64-143, 70-20-20, Arm 18, E-56, and K-2 selected in others, more favorable geographical areas of growth are of interest for horticulture of the South Urals. At the same time clonal rootstocks Volga 3, 12, Ural 1, 2, 5 created in the Middle Volga region most closely correspond to the features of the extreme climate, in particular, are resistant to drought and low temperatures, unpretentious to soil conditions, and highly productive in the garden and nursery [10-12].

At the present moment, new clonal rootstocks of the OB series have been selected on the South Ural territory. Rootstocks of this series pass a long-term test in the mother plant place of the Orenburg State University (OSU) Botanical Garden. Based on a comprehensive study among the huge variety of forms, it is necessary to select the forms most suitable for the effective development of industrial gardening in extreme climate conditions.

The purpose of the work is to conduct a comparative study of the resistance of isolated forms of clonal rootstocks to biotic and abiotic stressors and to assess their rhizogenic ability and productivity in the mother plant place, planted by the method of vertical branches.

Materials and methods. Selected seedlings from free pollination, obtained by harvesting the fruits of clonal rootstocks of apple trees and cultivars, extraction

of seeds, and sowing on the open ground, were the objects of research on the breeding trial area in the conditions of the South Ural region.

The fruits were collected in August and September in the plantations of OSU Botanical Garden, the Orenburg branch of the Federal Research Center of Horticulture, Saraktash fruit nursery, in the gardens of Nizhny Gumbet, Samara Institute of Horticulture “Zhigulevsky Gardens”, which were laid using stock forms of selection of Kuibyshev, Donetsk, Saratov, and Crimean experimental gardening stations, Michurinsky State Agrarian University, Don Zonal Agricultural Research Institute, and the Experimental Base “Polly” of the Research Institute of Agriculture, Estonia. Seeds were sown in 2007; in 2008, a group of second-generation forms of the OB series was selected among all seedlings – 37 pcs., selected in the OSU Botanical Garden, and the mother plant place was planted in order to obtain vertical branches. The study was carried out there.

The climate of the steppe zone of the Orenburg Region is sharply continental and is extreme for cultivating fruit crops. In the winter period, the temperature drops to -40°C , and in some places, it reaches -48°C . In the summer period, the temperature rises to $+40$ – 42°C , and on the soil, it reaches $+60$ – 70°C . Relative humidity is often 40–60%, and the number of days with relative humidity less than 30% is often 100% per season. Atmospheric precipitation per year is 363 mm. The average duration of the summer period with a temperature of 10°C is 140–150 days. The sum of positive temperatures is in the range of 3000 $^{\circ}\text{C}$, the sum of effective temperatures is 2100–2500 $^{\circ}\text{C}$, and the sum of active temperatures is 2800–3000 $^{\circ}\text{C}$ (Table 1) [13].

Table 1.

**Weather conditions of the city of Orenburg during the years of research,
Central Office for Hydrometeorology and Environmental Monitoring**

Years of observations	Indicators						
	Average annual air temperature, $^{\circ}\text{C}$	Max air temperature on the soil surface, $^{\circ}\text{C}$ / Min air temperature, $^{\circ}\text{C}$	Min soil temperature at a depth of 20 cm, $^{\circ}\text{C}$ / Frost depth	Precipitation, mm/ Snow cover, cm	Relative air humidity, %/ Number of days with relative humidity $\leq 30\%$	Sum of positive temperatures (≥ 0), $^{\circ}\text{C}$	Sum of effective temperatures (≥ 5), $^{\circ}\text{C}$ / Sum of active temperatures (≥ 10), $^{\circ}\text{C}$
2010	5.3	39/-34	-3.5/142	245/52	46.3/138	3850	3538/2745
2011	5.6	40/-35	-14.3/150	401/33	59/70	3371	2332/2909

2012	5.3	40/-30	-12/150	278/35	56/101	4170	3048/3827
2013	3.7	37/-32	-16/116	463/44	60.3/89	3573	2459/3082
2014	6.1	41/-33	-4/85	259/44	57.8/108	3346	2364/2987
2015	5.7	66/-32	-14.2/124	335/34	55/88	3328	2339/2982
2016	6.5	62/-29	-4.6/46	464/44	55.8/106	3482	2469/3272
2017	4.7	60/-32	-8.4/108	327/41	55.6/56	3227	2263/3262
2018	5.8	64/-30	-15/150	243/22	54.4/58	3450	2415/3033
2019	5.4	60/-28	-6.4/94	386/46	51.3/104	3459	2249/2763
2020	7.8	64/-25	-7.2/63	264/38	53/109	3555	2399/3050
2021	6.3	66/-31	-13/129	255/34	48/153	3820	2680/3215
2022	5.7	60/-27	-2.6/78	372/36	56.6/82	3458	2386/2935
2023	9.5	62/-35	-10/143	384/33	56.4/95	3695	2531/3246
Norm	4.6	61.6/-42	-13/114	363/31	55.2/81	3163	2148/2887

The soils of the OSU Botanical Garden are represented by southern, carbonate, and heavy loamy chernozems (mollisols) with a thickness of 50–60 cm, with a structural and aggregate composition favorable for plant cultivation. Groundwater lies at a depth of 35–40 m.

The experiments were designed according to the program and methodology [14] and the methodology [15]. After overwintering the mother plants of clonal rootstocks, the condition of plantations was determined according to Budagovsky.

In the fall of 2007 (October), isolated seeds were sown at the seedling school. Next year, the field germination of seeds, the yield of standard seed rootstocks, and the number of selected forms were taken into account at the seedling school. After digging the plants in the fall of 2008, seedlings with a fibrous root system and the presence of burr knots on the shoots were selected, and then they were planted in the mother plant place planted using the method of vertical branches.

The survival rate, the preservation of plants, the yield of branches from the bush, including standard ones, rootability, and the branching of shoots were taken into account in the plant mother stock. The clonal rootstock Ural 5 (k) was used as a control. Statistical processing was performed using Statistica 9.0 and Microsoft Office Excel.

Results

Most of the selected forms were obtained among seedlings obtained from fruits harvested from Ural 5 (k), Ye-56, K-2, 71-7-22, 57-490, 64-143, and 65-151 forms (Fig. 1).



Fig. 1. Vegetative productivity of clonal rootstocks in the mother stock, planted by the method of vertical branches: on the left – OB 3-4, on the right – Ural 5 (control).

In the mother plant stock of vertical branches, all selected forms of the OB series were evaluated for a number of parameters. Table 2 shows the data on the survival rate of the forms and the main indicators for 2023: preservation, condition, rootability, the number of branches from the bush, and the sum of branches over the years of research.

Table 2.

Characteristics of selected forms of apple tree clonal rootstocks in the mother stock of vertical branches in the OSU Botanical Garden. Planting 2008

No.	Selected forms	Seedling rootstocks	Planted		Indicators 2023				Sum of branches, thousand/ha (2010–2023)
			pcs.	survival rate, %	preservation, %	condition, point	rootability, point	number of branches per bush, pcs.	
1	OB 1-3		8	100	12.5	5.0	4.5	13.0	1180.9
2	OB 1-4		3	100	100	5.0	4.5	20.0	1266.4
3	OB 1-5		11	90.9	36.4	5.0	4.5	6.2	717.9
4	OB 1-9		8	87.5	100	5.0	4.5	8.0	716.4
5	OB 1-15		5	80.0	40.0	5.0	4.0	20.0	859.2
6	OB 2-1	71-2-22	10	20.0	100	4.5	5.0	5.7	1488.5
7	*OB 2-2		20	100	70.0	5.0	4.5	8.7	1730.8
8	OB 2-3		5	100	100	5.0	4.0	9.0	1371.0
9	*OB 2-5		5	100	100	5.0	4.5	34.5	1573.1

10	*OB 2-4		21	100	100	5.0	5.0	20.5	3196.5
11	OB 2-6		5	80.0	33.3	4.5	4.0	3.0	740.1
12	*OB 2-7		10	90.0	100	4.5	4.0	8.0	1587.9
13	OB 2-8		5	100	60.0	4.5	4.0	5.0	1390.5
14	OB 2-9		5	100	100	4.5	4.5	8.0	1329.0
15	OB 2-10		5	40.0	100	4.0	4.5	5.2	321.2
16	OB 2-11		5	100	60.0	4.5	4.0	6.2	927.7
17	*OB 2-12		5	100	20.0	4.5	4.5	18.0	2243.0
18	OB 2-13	62-396	5	80.0	60.0	5.0	4.5	14.3	1226.2
19	OB 2-14	57-490	4	100	40.0	4.0	5.0	4.0	1190.6
20	*OB 2-15	57-490	5	80.0	77.8	4.5	5.0	14.0	2160.8
21	OB 2-16		8	62.6	75.0	4.5	4.0	12.8	1111.5
22	OB 2-17		5	100	40.0	4.5	4.0	9.6	746.2
23	OB 2-24		7	100	66.7	5.0	4.5	5.0	1223.8
24	OB 2-28		5	100	60.0	4.5	4.5	5.0	818.3
25	OB 2-30		8	62.3	100	4.5	4.5	4.8	450.1
26	OB 3-1		4	100	80.0	5.0	4.5	13.4	1401.3
27	OB 3-2		6	100	80.0	4.5	4.5	6.3	829.7
28	OB 3-3		3	100	44.2	5.0	4.0	5.0	845.9
29	*OB 3-4	71-7-22	22	90.9	66.7	5.0	5.0	20.2	2191.2
30	OB 3-5		6	100	75.0	5.0	4.5	4.7	1091.8
31	*OB 3-6		6	50.0	100	5.0	4.5	12.2	1800.4
32	OB 3-7	57-366	5	100	60.0	4.0	4.5	5.2	1297.3
33	OB 3-8		13	100	33.3	5.0	4.5	17.5	802.6
34	OB 3-9		12	100	100	5.0	4.0	10.5	1282.8
35	*OB 3-10		5	100	100	5.0	4.5	11.0	1794.5
36	OB 3-12		18	16.7	100	4.5	5.0	5.0	1192.7
37	*OB 3-14	54-118	4	100	66.7	5.0	5.0	6.5	2137.7
38	Ural 5 (control)	57-469	113	78.7	56.9	5.0	5.0	7.9	1377.3

Note. * – promising form, clones that reliably exceed the control are highlighted in bold.

In the mother stock, planted by the method of vertical branches, most of the forms had a good survival rate, significantly exceeding the control (Fig. 2). The forms OB2-1 and OB3-12, had low survival rates, 20 and 16.7%, respectively. As of 2023, 57% of Ural 5 plants remained in the control. The forms OB 1-4, OB 1-9, OB 2-1, OB 2-3, OB 2-5, OB 2-4, OB 2-7, OB 2-9, OB 2-10, OB 2-30, OB 3-6, OB 3-9, OB 3-10, and OB 3-12 showed 100% preservation.



Fig. 2. Experimental mother stock, planted by the method of vertical branches (OSU Botanical Garden, Orenburg, Russia).

Preservation of 20% or less was observed in the forms OB 1-3 and OB 2-12. The condition of all forms was rated at 4–5 points. The control group and the forms of OB 2-1, OB 2-4, OB 2-14, OB 2-15, OB 3-4, OB 3-12, and OB 3-14 had a rootability of 5 points.

In 2023, the productivity of the control group was 8 branches per bush. Among the OB forms, 16 forms were lower than the control in productivity, 14 forms were at the level of Ural 5 (k), and 7 forms had a productivity 2 times higher than in the control: OB1-4, OB1-15, OB2-5, OB2-4, OB2-12, OB3-4, and OB3-8 (Table 4).

Of particular interest are samples of OB 3-4, OB 2-4, OB 2-5, OB 3-14, and OB 2-15, which are significantly ahead of the control in all parameters (Fig. 3).



Fig. 3. Generative productivity of the form OB 3-14.

Over the years of observation, the yield of standard branches of selected forms of apple clonal rootstocks in the mother stock of vertical branches varied from 2.7 thousand/ha (OB 2-30 in 2021) up to 444 thousand/ha (OB 2-8 in 2023) (Table 3). The productivity of the mother stock largely depends on the genetic resources of plants, agricultural technology, and soil and climatic conditions of the current and previous years. The yield of standard branches of the OB series in the mother stock of vertical branches during the entire observation period varied (Table 3) depending on climatic conditions.

In 2011, 2013, 2015, and 2018, the winters were severe, the soil cover was frozen by more than 100 cm, and the soil temperature at a depth of 20 cm dropped to critical -14–16 °C. Under these conditions, some forms reduced productivity by 2–3 times. In the years ahead, the productivity of plantings almost recovered. High adaptability to adverse conditions of the winter period can be noted in the forms OB 1-3, OB 2-4, OB 2-13, OB 2-15, OB 2-24, OB 3-4, OB 3-9, and OB 3-14.

The vegetation periods of 2020 and 2021 were abnormally hot and dry. The number of days with relative humidity below 30% reached 109 and 153 days, respectively. Under these extreme conditions, the productivity of most forms decreased by 2 times or more. Productivity dropped to 0 in the OB 2-10 form.

Some forms in 2020 during the period of abnormal heat and drought also sharply reduced their productivity compared to 2019, but recovered in the next 2021. It was observed in the control (Ural 5) and in the forms OB 2-2, OB 2-4, OB 2-9, OB 3-1, and OB 3-6. On the contrary, others showed high results in 2020, despite the drought; but in 2021 they had lower productivity than in the previous 2 years (Table 3).

Table 3.

Yield in the mother stock vertical branches of clonal apple rootstocks selected forms (OSU Botanical Garden, planting 2008)

No.	Selected forms	Yield of branches by years, thousand/ha														
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
1	OB 1-3	27.8	177.5	155.4	165.4	140.6	68.6	60.9	24.9	27.5	38.6	91.9	99.4	83.2	19,2	
2	OB 1-4	54.6	56.4	39.4	22.2	11.0	47.5	115.5	193.2	182.5	193.5	153.5	73.5	74.0	49,6	
3	OB 1-5	83.4	55.6	66.5	66.6	110.3	57.3	42.3	18.0	49.9	36.3	33.3	32.1	44.3	22,0	
4	OB 1-9	49.1	56.6	22.2	37.3	77.7	69.7	83.7	83.2	74.1	70.4	66.4	8.8	9.8	7,4	
5	OB 1-15	27.8	39.0	34.7	44.4	57.2	34.9	17.7	26.4	118.7	78.4	111.8	134.6	73.8	59,8	
6	OB 2-1	-	-	-	-	79.8	62.1	71.8	177.6	417.7	399.6	215.8	64.1	-	-	
7	* OB 2-2	83.4	83.3	310.8	133.2	48.3	44.3	54.1	55.8	66.0	44.4	96.8	221.9	288.7	199,8	
8	OB 2-3	55.6	83.4	111.0	66.6	110.0	66.0	62.8	56.2	54.7	177.6	201.5	132.2	116.9	76,5	
9	* OB 2-5	121.4	194.6	186.4	110.9	310.8	76.4	60.9	24.9	49.9	38.6	166.4	88.8	66.6	76,5	

10	* OB 2-4	83.4	222.4	169.3	129.6	288.5	162.1	116.8	246.9	327.0	260.8	198.2	229.7	471.6	290,2
11	OB 2-6	27.8	38.9	22.2	39.4	18.5	23.2	66.7	85.7	177.5	83.2	8.9	26.6	54.8	66,7
12	* OB 2-7	53.6	148.4	48.6	39.5	55.2	54.4	55.1	104.2	136.5	48.9	147.3	177.6	222.0	296,6
13	OB 2-8	55.6	138.4	72.1	36.9	51.7	47.5	62.1	68.4	109.1	22.2	55.5	105.2	122.1	1443,7
14	* OB 2-9	83.4	55.6	51.4	44.7	40.6	32.0	39.9	102.0	66.7	44.4	202.3	332.8	133.2	100,0
15	OB 2-10	-	-	-	-	-	44.3	66.6	58.6	17.6	82.4	25.1	0.0	26.6	0,0
16	OB 2-11	55.6	94.6	44.4	44.4	18.5	32.0	42.0	115.2	97.4	134.7	73.7	62.7	70.7	41,8
17	* OB 2-12	139.0	194.6	222.1	101.0	112.0	94.4	48.7	54.1	208.5	202.8	332.5	104.0	206.4	222,9
18	OB 2-13	83.4	138.4	82.1	121.7	66.1	129.4	44.3	88.8	109.8	49.4	35.5	122.1	99.8	55,4
19	OB 2-14	55.6	27.8	111.0	14.8	37.3	66.7	71.0	150.9	171.5	168.5	124.2	75.5	80.7	35,1
20	* OB 2-15	111.3	177.2	177.5	171.4	133.7	63.8	164.3	35.5	298.5	98.7	263.3	123.1	192.5	150,0
21	OB 2-16	166.8	69.5	46.6	40.6	59.0	68.3	72.8	115.2	88.7	98.7	80.0	66.7	78.8	59,8
22	OB 2-17	38.3	54.7	41.3	27.7	48.3	44.7	30.4	95.7	58.6	61.0	42.7	39.9	83.3	79,6
23	OB 2-24	83.1	94.6	69.2	129.6	88.8	125.6	139.1	88.4	101.2	22.3	59.5	95.9	51.5	75,0
24	OB 2-28	21.4	36.2	42.1	33.3	59.0	64.9	61.3	43.7	68.7	87.9	74.0	52.4	124.0	49,4
25	OB 2-30	-	-	-	-	68.8	122	23.5	57.7	39.6	61.0	30.4	2.7	44.4	0,0
26	OB 3-1	139.0	152.8	146.2	36.4	49.5	57.8	13.3	21.7	7.5	66.6	44.4	199.8	222.0	244,3
27	OB 3-2	48.7	69.5	54.1	65.9	40.6	27.6	61.3	79.9	80.9	88.7	71.0	66.5	75.0	0,0
28	OB 3-3	55.7	167.1	66.6	37.7	9.5	133.1	30.7	78.6	70.4	55.4	44.4	22.1	44.0	30,6
29	* OB 3-4	83.4	154.7	149.2	144.4	168.0	122.0	109.5	209.7	286.2	240.9	169.9	165.5	93.1	94,7
30	OB 3-5	139.0	156.4	111.0	52.2	13.3	43.7	57.7	37.2	87.9	90.0	114.5	77.1	38.8	73,0
31	* OB 3-6	178.0	194.6	111.0	110.9	127.3	43.4	115.5	182.5	193.5	153.3	73.6	74.0	193.2	49,6
32	OB 3-7 cr.	166.8	192.8	166.4	44.2	55.4	66.5	77.0	75.4	83.6	102.0	70.7	57.8	45.9	92,8
33	OB 3-8	52.1	55.6	111.0	66.6	17.7	33.3	97.6	44.4	66.8	22.2	95.4	57.8	66.6	15,5
34	OB 3-9	138.9	139.0	133.2	147.9	83.2	64.4	57.7	37.2	87.9	90.0	114.5	77.1	38.8	73,0
35	* OB 3-10	122.4	149.9	44.4	44.9	77.7	63.8	88.9	110.9	360.9	199.8	182.2	177.5	98.5	72,7
36	OB 3-12	-	-	-	-	79.8	332.8	167.3	211.2	79.7	147.9	72.8	101.2	0.0	0,0
37	* OB 3-14	111.3	152.8	133.0	221.9	126.5	142.0	62.8	110.7	311.6	121.8	162.2	162.8	203.5	114,8
38	Ural 5 (control)	68.8	85.2	56.7	45.5	61.1	97.3	91.1	93.6	140.0	132.5	87.6	140.8	150.8	126,3

Note. * – promising form, results that significantly exceed the control are highlighted in bold.

The initial forms OB 1-3, OB 1-15, OB 2-2, OB 2-7, OB 2-8, OB 2-9, OB 2-15, OB 3-4, OB 3-10, and OB 3-14 did not reduce annual productivity gains and demonstrated high adaptability to biotic and abiotic stressors.

Data of most study samples (Table 4) have a slight relative sampling error (less than 25%); therefore, the obtained results can be considered reliable. The exception is the rootstocks OB 2-1 and OB 2-8. Therefore, observations will be continued, since the sum of branches received during the study period and the average over the years exceed the control.

The group of studied rootstocks is characterized by a high coefficient of variation (more than 50%) and standard deviation (more than 50 thousand/ha), which indicates a high level of variability. These indicators are associated with the challenging and unstable climatic conditions of the Orenburg Region, where dry and hot years alternate with wet and cool ones.

Periodically frosty and snowless winters cause great damage to the mother stock of clonal rootstocks; especially it is characteristic for forms, which had been bred in the southern regions. The indicators of the clonal rootstock Ural 5 (k) had a coefficient of variation of 35%, which confirms its adaptation to these climatic conditions.

The forms of rootstocks OB 2-4, OB 2-13, OB 2-15, OB 2-16, OB 2-17, OB 2-24, OB 2-28, OB 3-2, OB 3-4, OB 3-6, OB 3-9, and OB 3-14 have close to control results for this parameter. Fourteen forms of rootstocks OB 2-1, OB 2-2, OB 2-5, OB 2-4, OB 2-7, OB 2-8, OB 2-12, OB 2-15, OB 3-1, OB 3-4, OB 3-6, OB 3-10, OB 3-12, and RL 3-14 exceeded the control on the sum of branches over the years and on average by years (Table 4).

Table 4.

Variational and statistical indicators of the yield in the mother stock of vertical branches of standard branches of clonal apple rootstocks selected forms (OSU Botanical Garden, planting 2008)

No.	Selected forms	Sum of branches, thousand/ha (2010–2023)	Average (2010–2023), thousand/ha	Standard deviation	Coefficient of variation, %	LSD _{0.5} between variants and control	Actual difference between variants and control	Relative sampling error, %
1	OB 1-3	1180.9	84.4	56.1	66.4	36.23	-14.03	15.0
2	OB 1-4	1266.4	90.5	64.7	71.4	40.49	-7.92	17.3
3	OB 1-5	717.9	51.3	24.9	48.5	23.39	-47.10	6.7
4	OB 1-9	716.4	51.2	28.8	56.2	24.70	-47.21	7.7
5	OB 1-15	859.2	61.4	37.3	60.8	27.96	-37.01	10.0
6	* OB 2-1	1488.5	148.9	152.8	102	103.38	36.74	40.9
7	* OB 2-2	1730.8	123.6	93.1	75.4	54.69	25.25	24.9
8	OB 2-3	1371.0	97.9	46.6	47.6	31.91	-0.45	12.5
9	* OB 2-5	1573.1	112.4	78.2	69.6	47.06	13.99	20.9
10	* OB 2-4	3196.5	228.3	99.9	43.8	58.20	129.94	26.7
11	OB 2-6	740.1	52.9	43.5	82.1	30.53	-45.51	11.6
12	* OB 2-7	1587.9	113.4	78.5	69.2	47.21	15.04	21.0
13	OB 2-8	1390.5	99.3	104.7	105.4	60.70	0.94	28.0

14	* OB 2-9	1329.0	94.9	82.8	87.2	49.37	-3.45	22.1
15	OB 2-10	321.2	32.1	29.7	92.6	44.75	-79.99	7.9
16	OB 2-11	927.7	66.3	33.6	50.6	26.48	-32.11	9.0
17	* OB 2-12	2243.0	160.2	79.6	49.7	47.76	61.84	21.3
18	OB 2-13	1226.2	87.6	33.9	38.7	26.60	-10.79	9.1
19	* OB 2-14	1190.6	85.0	52.2	61.5	34.45	-13.34	14.0
20	* OB 2-15	2160.8	154.3	70.3	45.6	43.11	55.96	18.8
21	OB 2-16	1111.5	79.4	31.9	40.1	25.82	-18.99	8.5
22	OB 2-17	746.2	53.3	20.4	38.3	22.04	-45.08	5.5
23	OB 2-24	1223.8	87.4	31.7	36.2	23.69	-10.96	8.5
24	OB 2-28	818.3	58.5	25.8	44.1	27.94	-39.93	6.9
25	OB 2-30	450.1	45.0	35.6	79.2	30.79	-67.10	9.5
26	* OB 3-1	1401.3	100.1	81.8	81.7	48.86	1.71	21.9
27	OB 3-2	829.7	59.3	23.8	40.1	23.04	-39.11	6.4
28	OB 3-3	845.9	60.4	43.0	71.2	30.34	-37.96	11.5
29	* OB 3-4	2191.2	156.5	58.1	37.2	37.21	58.14	15.5
30	OB 3-5	1091.8	78.0	41.3	53.0	29.62	-20.39	11.0
31	* OB 3-6	1800.4	128.6	54.8	42.6	35.63	30.22	14.6
32	OB 3-7	1297.3	92.7	48.0	51.8	32.54	-5.71	12.8
33	OB 3-8	802.6	57.3	29.8	52.0	25.07	-41.05	8.0
34	OB 3-9	1282.8	91.6	37.4	40.8	27.99	-6.75	10.0
35	* OB 3-10	1794.5	128.2	83.9	65.5	49.97	29.8	22.4
36	OB 3-12	1192.7	119.3	100.7	84.4	70.95	7.16	26.9
37	* OB 3-14	2137.7	152.7	60.7	39.8	38.45	54.31	16.2
38	Ural 5 (control)	1377.3	98.4	34.4	35.0			9.2
	Mean value	1305.60	95.86	56.17	59.4			15.02

Note. * – promising form, results that significantly exceed the control are highlighted in bold.

Conclusion

Over the entire period of studies, the forms OB 1-5, OB 1-9, OB 1-15, OB 2-6, OB 2-10, OB 2-11, OB 2-17, OB 2-28, OB 2-30, OB 3-2, OB 3-3, and OB 3-8 had consistently low results in the mother stock of vertical branches compared to the control.

Among all studied forms, the forms OB 2-4, OB 2-12, OB 2-15, OB 3-4, and OB 3-14 were distinguished reliably (results of LSD_{0.5}). The OB 2-4 form had a powerful root system (Fig. 4).



Fig. 4. Root system of selected forms of clonal apple rootstocks: on the left – OB 2-4, on the right – Ural 5 (control).

OB 2-4. Seedlings from the free pollination form 71-7-23. Semi-dwarf. Greenleaf form. Rootability 5 points. Survival rate 100%. Preservation 100%. Winter hardiness, drought and heat resistance are high. The leaf is small, light green, with stipules, the leaf margin is finely serrated, the petiole length is 1 cm. The leaf area is 11 cm². The yield of branches in the mother stock is 3196.5 thousand/ha. The root system is developed better than that of the control Ural 5.

OB 3-4. Seedling of the Michurin form 71-7-22. Semi-dwarf. Greenleaf form. Rootability 5 points. Survival rate 90.9%. Preservation 67.7%. Winter hardiness, drought and heat resistance are high. The leaf is serrated at the base, the bottom of the leaf and the petiole of the leaf are pubescent, there are stipules, the length of the petiole is 1.5 cm.

The form OB 3-14, along with the annual yield of vertical branches exceeding the control, is also distinguished by high generative productivity (Fig. 3).

OB 3-14. Seedling from free pollination of the form Ural 5. Semi-dwarf. Redleaf form. Rootability 5 points. Survival rate 100%. Preservation 67.7%. Winter hardiness, drought and heat resistance are high. The leaf is double-serrated, serrated at the base, with stipules, the bottom of the leaf, petiole, and stipules are pubescent, the petiole length is up to 2 cm. The leaf area is 24 cm². The yield of branches in the mother stock is 2137.7 thousand/ha. It has a high generative productivity.

OB 2-12. Seedling of free pollination. Semi-dwarf. Greenleaf form. Rootability 4.5 points. Survival rate 100%. Preservation 60%. Winter hardiness is high. The yield of branches in the mother stock is 2243 thousand/ha. Distinguished by less preservation compared to the control.

OB 2-15. Seedling of free pollination of the form Ural 5. Semi-dwarf. Greenleaf form. Rootability 5 points. Survival rate 80%. Preservation 77.8%. Winter hardiness, drought and heat resistance are high. The leaf with small scales-stipules, the leaf edge is double-serrated, the petiole length is 2 cm. The leaf area is 18 cm². The yield of branches in the mother stock is 2160.8 thousand/ha.

Conclusion

1. Selection of clonal rootstocks in extreme conditions of the Southern Urals made it possible to identify the most stable and productive forms OB 2-4, OB 2-2, OB 2-15, OB 3-4, and OB 3-14.

2. A long-term study of the forms in the mother stock, planted by the method of vertical branches, makes it possible to identify the most productive specimens among the forms OB 2-4, OB 2-2, OB 2-15, and OB 3-14 and to develop technologies for their accelerated propagation without disrupting productivity and genetic stability.

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

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

Sponsorship information. The work was carried out within the framework of planned budget themes: IC Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No. GR No. AAAA21-121011190016-1; state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Federal Research Center of Horticulture "Genetic and biotechnological approaches to managing the breeding process, improving existing breeding methods for constructing new genetic modifications of fruit, berry, vegetable and field crops that meet modern agricultural production requirements" (FGUW-2021-0001).

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках плановых бюджетных тем: ИС УрО РАН №ГР № AAAA21-121011190016-1; Исследования выполнены в соответствии с государственным заданием ФГБНУ ФНЦ Садоводства по теме «Генетические и биотехнологические подходы управления селекционным процессом, совершенствование существующих методов селекции для конструирования новых генетических модификаций плодовых, ягодных, овощных и полевых культур, отвечающих современным требованиям сельскохозяйственного производства» (FGUW-2021-0001).

References

1. Kotov, L. A., & Savin, E. Z. (2021). *Apple trees on clonal rootstocks in the Urals: A training and research manual* (96 p.). Chelyabinsk: ZAO “Biblioteka A. Millera” Publishing House.
2. Borisova, A. A., & Kulikov, I. M. (2016). *Intensive apple orchards on seed rootstock* (52 p.). Moscow: FSBSI VSTISP.NO “Fund for the Development and Support of Horticulture”. ISBN: 978-5-9908580-9-1. EDN: <https://elibrary.ru/WKNFNB>
3. Yavari, A., Habibi, F., Naseri, L., Rasouli-Sadaghiani, M., Sarkhosh, A.I., & Pessarakli, M. (2022). Responses of semi-vigorous apple rootstocks (MM106 and MM111) to different nitrate and ammonium ratios under soilless culture. *Journal of Plant Nutrition*, 46(3), 439–452. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2071730>. EDN: <https://elibrary.ru/RBFPTD>
4. Borisova, A. A., Konovalov, S. N., Pomyaksheva, L. V., & Bychkov, N. V. (2022). Efficiency of plant growth regulators and prolonged-action fertilizer Osmocote in growing high-quality clonal apple rootstocks in protected ground. *Agrochemical Bulletin*, (1), 51–58. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-1-010>. EDN: <https://elibrary.ru/ZWVVIX>
5. Pomyaksheva, L. V., Konovalov, S. N., Borisova, A. A., & Bychkov, N. V. (2022). Effect of Osmocote Pro mineral fertilizer and plant growth regulators on biometric indicators of clonal apple rootstocks 54–118. *Fruit and Berry Growing in Russia*, 69, 65–76. <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2022-69-65-76>. EDN: <https://elibrary.ru/TMROTC>
6. Konovalov, S. N., Borisova, A. A., Medvedev, S. N., Bobkova, V. V., & Salimova, S. A. (2024). Mass production of clonal apple rootstocks intended for establishing mother blocks using fertilizers and growth regulators. *Agrochemical Bulletin*, (6), 82–87. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-6-014>. EDN: <https://elibrary.ru/YHZWPP>
7. Apple trees. Choosing the right rootstock. Retrieved from https://onlinesemena.ru/helpful_hint/all.html/id/160 (accessed 20.03.2025).
8. Savin, E. Z., Berezina, T. V., & Vasilenko, A. Yu. (2023). Parameters and productivity of apple trees on clonal rootstocks in the Southern Urals. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*, 102(4), 106–112. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-102-4-106-112>. EDN: <https://elibrary.ru/GDFUNX>
9. Savin, E. Z., Bochkarev, E. A., & Berezina, T. V. (2024). Behavior of clonal apple rootstocks in orchard and mother block. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 68(4), 50–58. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2024-4-50-58>. EDN: <https://elibrary.ru/TKQHAZ>
10. Merezko, O. E., Savin, E. Z., Berezina, T. V., Mushinsky, A. A., Aminova, E. V., & Korshikov, A. V. (2020). Results of studying clonal apple rootstocks in various ecological conditions of the Volga-Ural region. *Fruit and Berry Growing in Russia*, 63(1), 137–145. <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2020-63-137-145>. EDN: <https://elibrary.ru/CEAVLG>

11. Savin, E. Z., Chugunov, V. G., Antipenko, M. I., & Kuznetsov, A. A. (2022). Results of breeding work on clonal apple rootstocks in the Volga-Ural region. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*, 97(5), 98–107. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-97-5-98-107>. EDN: <https://elibrary.ru/LHAMTU>
12. Rachenko, A. M., Rachenko, M. A., & Kiseleva, E. N. (2024). Potential for using clonal apple rootstocks in horticulture in the Irkutsk region. *Scientific and Practical Journal "Bulletin of IrGSHA"*, 122(3), 58–69. <https://doi.org/10.51215/1999-37652024-122-58-69>. EDN: <https://elibrary.ru/WYPIRY>
13. Meteorological data of the Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Privolzhskoe UGMS. Retrieved from <https://pogoda-sv.ru> (accessed 29.06.2024).
14. Sedov, E. N., & Ogoltsova, T. P. (Eds.). (1999). *Program and methodology for variety study of fruit, berry, and nut crops* (608 p.). Orel: VNIIPSK Publishing House.
15. Kochenov, I. (Ed.). (1980). *Methodology for studying clonal rootstocks in the Baltic republics and the Byelorussian SSR* (59 p.) [Preprint; No. 066]. Jelgava: Latvian Agricultural Academy.

Список литературы

1. Котов, Л. А., & Савин, Е. З. (2021). *Яблоня на клоновых подвоях в условиях Урала: учебно-научное пособие* (96 с.). Челябинск: Изд-во ЗАО «Библиотека А. Миллера».
2. Борисова, А. А., & Куликов, И. М. (2016). *Интенсивные сады яблони на семенном подвое* (52 с.). М.: ФГБНУ ВСТИСП.НО «Фонд развития и поддержки садоводства». ISBN: 978-5-9908580-9-1. EDN: <https://elibrary.ru/WKNFNB>
3. Yavari, A., Habibi, F., Naseri, L., Rasouli-Sadaghiani, M., Sarkhosh, A.I., & Pessarakli, M. (2022). Responses of semi-vigorous apple rootstocks (MM106 and MM111) to different nitrate and ammonium ratios under soilless culture. *Journal of Plant Nutrition*, 46(3), 439–452. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2071730>. EDN: <https://elibrary.ru/RBFPTD>
4. Борисова, А. А., Коновалов, С. Н., Помякшева, Л. В., & Бычков, Н. В. (2022). Эффективность регуляторов роста растений и удобрения пролонгированного действия Osmocote при выращивании клоновых подвоев яблони высших категорий качества в защищённом грунте. *Агрохимический вестник*, (1), 51–58. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-1-010>. EDN: <https://elibrary.ru/ZWVVIX>
5. Помякшева, Л. В., Коновалов, С. Н., Борисова, А. А., & Бычков, Н. В. (2022). Влияние минерального удобрения Osmocote pro и регуляторов роста растений на биометрические показатели клоновых подвоев яблони 54–118. *Плодоводство и ягодоводство России*, 69, 65–76. <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2022-69-65-76>. EDN: <https://elibrary.ru/TMROTC>

6. Коновалов, С. Н., Борисова, А. А., Медведев, С. Н., Бобкова, В. В., & Салимова, С. А. (2024). Тиражирование клоновых подвоев яблони, предназначенных для закладки маточников с применением удобрений и регуляторов роста. *Агрохимический вестник*, (6), 82–87. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-6-014>. EDN: <https://elibrary.ru/YNZWPP>
7. Яблони. Правильный выбор подвоя. Получено с https://onlinesemena.ru/helpful_hint/all.html/id/160 (дата обращения: 20.03.2025).
8. Савин, Е. З., Березина, Т. В., & Василенко, А. Ю. (2023). Параметры и продуктивность яблони на клоновых подвоях в условиях Южного Урала. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 102(4), 106–112. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-102-4-106-112>. EDN: <https://elibrary.ru/GDFUNX>
9. Савин, Е. З., Бочкарев, Е. А., & Березина, Т. В. (2024). Поведение клоновых подвоев яблони в саду и маточнике. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, 68(4), 50–58. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2024-4-50-58>. EDN: <https://elibrary.ru/TKQHAZ>
10. Мережко, О. Е., Савин, Е. З., Березина, Т. В., Мушинский, А. А., Аминова, Е. В., & Коршиков, А. В. (2020). Результаты изучения клоновых подвоев яблони в различных экологических условиях Волго-Уральского региона. *Плодоводство и ягодоводство России*, 63(1), 137–145. <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2020-63-137-145>. EDN: <https://elibrary.ru/CEAVLG>
11. Савин, Е. З., Чугунов, В. Г., Антипенко, М. И., & Кузнецов, А. А. (2022). Итоги селекционной работы клоновых подвоев яблони в Волго-Уральском регионе. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 97(5), 98–107. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-97-5-98-107>. EDN: <https://elibrary.ru/LHAMTU>
12. Раченко, А. М., Раченко, М. А., & Киселева, Е. Н. (2024). Потенциальная возможность использования клоновых подвоев яблони в садоводстве Иркутской области. *Научно-практический журнал «Вестник ИрГСХА»*, 122(3), 58–69. <https://doi.org/10.51215/1999-37652024-122-58-69>. EDN: <https://elibrary.ru/WYPIRY>
13. Метеоданные федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, управление (Центр) по гидрометеорологии и по мониторингу окружающей среды, Приволжское УГМС. Получено с <https://pogoda-sv.ru> (дата обращения: 29.06.2024).
14. Седов, Е. Н., & Огольцова, Т. П. (Ред.). (1999). *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур* (608 с.). Орел: Изд-во ВНИИСПК.

15. Коченов, И. (Ред.). (1980). *Методика изучения клоновых подвоев в Прибалтийских республиках и Белорусской ССР* (59 с.) [Препринт; № 066]. Елгава: Латвийская сельскохозяйственная академия.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Antonina A. Borisova, Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher
Federal State Budgetary Scientific Organization "Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery
4, Zagoryevskaya Str., Moscow, 115598, Russian Federation
coord_vstisp@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3849-8567>

Evgeny Z. Savin, Doctor of Agricultural Sciences, Researcher
Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
11, Pionerskaya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
orensteppe@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2974-5175>

Valery A. Novikov, Candidate of Biological Sciences, Director
Botanical Garden of Orenburg State University
134g, Tereshkova Str., Orenburg, 460050, Russian Federation
agronovikov77@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-0400-6860>

Tatiana V. Berezina, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
11, Pionerskaya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
gaevskayatyana@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3528-0263>

Aleksander A. Mushinsky, Doctor of Agricultural Sciences, Director
Orenburg Branch of the Federal State Budgetary Research Center of Horticulture
10, Nezhinskoye highway, Orenburg, 460008, Russian Federation
orennauka-plodopitomnik@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3761-1836>

Aliya Zh. Saudabaeva, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
Orenburg Branch of the Federal State Budgetary Research Center of Horticulture
10, Nezhinskoye highway, Orenburg, 460008, Russian Federation

aleka_87@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5274-8657>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Борисова Антонина Александровна, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства

ул. Загорьевская, 4, г. Москва, 115598, Российская Федерация

coord_vstisp@mail.ru

Савин Евгений Захарович, доктор сельскохозяйственных наук, научный сотрудник

Институт степи Уральского отделения Российской Академии наук

ул. Пионерская, 11, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация

orensteppe@mail.ru

Новиков Валерий Александрович, кандидат биологических наук, директор

Ботанический сад ОГУ

ул. Терешковой, 134г, г. Оренбург, 460050, Российская Федерация

agronovikov77@mail.ru

Березина Татьяна Владимировна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Институт степи Уральского отделения Российской Академии наук

ул. Пионерская, 11, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация

gaevskayatyana@mail.ru

Мушинский Александр Алексеевич, доктор сельскохозяйственных наук, директор

Оренбургский филиал ФГБНУ ФНЦ Садоводства

Нежинское шоссе, 10, г. Оренбург, 460008, Российская Федерация

orennauka-plodopitomnik@yandex.ru

Саудабаева Алия Жонысовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Оренбургский филиал ФГБНУ ФНЦ Садоводства

Нежинское шоссе, 10, г. Оренбург, 460008, Российская Федерация

aleka_87@mail.ru

Поступила 07.08.2025

После рецензирования 15.09.2025

Принята 09.10.2025

Received 07.08.2025

Revised 15.09.2025

Accepted 09.10.2025

Садоводство и лесоводство / Horticulture and Forestry

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1403](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1403)EDN: [KOQTTG](https://edn.ru/koqttg)

УДК 630*232.11



Рост культур сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) в лесорастительных условиях северо-востока Московской области

А.В. Лебедев, Р.С. Хамитов, С.М. Хамитова

*ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва,
Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Сосна скрученная – быстрорастущий и выносливый вид хвойных деревьев родом из западной части Северной Америки. Для комплексного выявления адаптационной способности этого вида к условиям зоны хвойно-широколиственных лесов, для оценки скорости роста, устойчивости, ресурсного и экологического потенциала культур требуется проведение исследований в широком возрастном диапазоне.

Цель. Выявление особенностей роста культур сосны скрученной в лесорастительных условиях северо-востока Московской области.

Материалы и методы. Лесокультурная площадь расположена в Огудневском участковом лесничестве Московского учебно-опытного лесничества. Культуры заложены в первой половине 1991 года трехлетними саженцами. В первой половине 2025 года проведено обследование участка культур на площади 0,2 га.

Результаты. Сосна скрученная к биологическому возрасту 37 лет имеет среднюю высоту 15,5 м и запас древесины 95 м³/га. По скорости роста она уступает сосне обыкновенной. Отпад в культурах происходит по низовому типу, а наибольшее количество здоровых и ослабленных деревьев сосредоточено в центральных ступенях толщины. Средневзвешенная категория санитарного состояния сосны скрученной характеризует ее как сильно ослабленную. Несмотря на плодоношение деревьев, естественное возобновление сосны скрученной отсутствует.

Заключение. Сосну скрученную можно рекомендовать для выращивания на лесных плантациях Московской области с целью получения балансовой древесины. Для регулирования породного состава насаждений, улучшения санитарного

состояния и создания благоприятных условий для роста целевой древесной породы важно проводить своевременные лесохозяйственные уходы.

Ключевые слова: сосна скрученная; интродукция растений; лесные культуры; рост и производительность; Московская область

Для цитирования. Лебедев, А. В., Хамитов, Р. С., & Хамитова, С. М. (2026). Рост культур сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) в лесорастительных условиях северо-востока Московской области. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 283–301. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1403>

Growth of lodgepole pine (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) plantations in forest conditions of the north-east of Moscow region

A.V. Lebedev, R.S. Khamitov, S.M. Khamitova

*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation*

Abstract

Background. Lodgepole pine is a fast-growing and hardy coniferous tree species native to western North America. To comprehensively assess its adaptability to the conditions of the coniferous-broadleaf forest zone, as well as to evaluate its growth rate, stability, resource potential, and ecological impact, a study covering a wide age range is required.

Purpose was to analyze the growth characteristics of lodgepole pine plantations under forest-growing conditions in the northeast of the Moscow region.

Materials and methods. The study area is located in the Ogudnevsky district of the Moscow Educational and Experimental Forestry. The trees were planted in the first half of 1991 using three-year-old seedlings. In the first half of 2025, a survey was conducted on a 0.2-hectare plot within the plantation.

Results. At a biological age of 37 years, lodgepole pine had an average height of 15.5 m and a timber stock of 95 m³/ha. In terms of growth rate, it was found to be slower than that of Scots pine (*Pinus sylvestris*). Mortality in the plantation followed a bottom-up pattern, with the highest number of healthy and weakened trees concentrated in the intermediate diameter classes. The weighted average sanitary condition category of lodgepole pine classified it as severely weakened. Despite active fruiting, no natural regeneration of lodgepole pine was observed.

Conclusion. Based on these findings, lodgepole pine can be recommended for cultivation in forest plantations in the Moscow region for pulpwood production. However,

to regulate species composition, improve sanitary conditions, and promote the growth of target tree species, timely silvicultural interventions are essential.

Keywords: lodgepole pine; plant introduction; forest plantations; growth and yield; Moscow region

For citation. Lebedev, A. V., Khamitov, R. S., & Khamitova, S. M. (2026). Growth of lodgepole pine (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) plantations in forest conditions of the north-east of Moscow region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 283–301. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1403>

Введение

Сосна скрученная (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) – это быстрорастущий и выносливый вид хвойных деревьев родом из западной части Северной Америки, который может произрастать в неблагоприятных для многих других древесных пород условиях [26]. Вид широко интродуцирован в Южной Америке, Европе, Турции, Новой Зеландии, но в ряде регионов к настоящему времени признан инвазивным, приводящим к значительному сокращению биологического разнообразия местных экосистем [25; 27]. Сосна скрученная выращивается с целью получения хозяйственно ценной древесины, высаживается для борьбы с эрозией почв и на нарушенных землях для проведения лесной рекультивации, также она подходит для создания декоративных посадок на объектах озеленения [3; 10; 21; 22; 24; 26]. В последние годы активно рассматривается возможность использования сосны скрученной для создания лесных углероддепонизирующих плантаций [26].

В европейской части России испытания сосны скрученной начались в конце 1970-ых годов, а значительные результаты по изучению роста и производительности культур, их ресурсного, биологического, экологического и рекреационного потенциала накоплены для таежной зоны на опытных объектах, расположенных в южной Карелии [14; 15], республике Коми [1; 13; 16], Архангельской области [5; 17; 19; 23], Ленинградской области [2; 28], Новгородской области [1], Вологодской области [3; 10]. В условиях регионов севера и северо-запада европейской части России сосна скрученная рассматривается как перспективный вид для создания лесосырьевых плантаций [14; 15].

Инициатором исследований по интродукции сосны скрученной в зону хвойно-широколиственных лесов (Московская область) является И.С. Мелехов [12]. Например, опытные объекты в Подмоскovie были заложены в 1991 году под руководством И.С. Мелехова и Ю.И. Дроз-

дова (Огудневское лесничество) и в 1999 году под руководством М.Д. Мерзленко (Озерецкое лесничество). Результаты исследований роста культур в условиях интродукционного стресса в Московской области ограничиваются биологическим возрастом до 17 лет [8, 9]. Для комплексного выявления адаптационной способности сосны скрученной к условиям зоны хвойно-широколиственных лесов, оценки скорости роста и производительности культур требуются исследования в более старших возрастах.

Цель исследования – выявление особенностей роста культур сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) в лесорастительных условиях северо-востока Московской области.

Материалы и методы

Объект исследования – культуры сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon), расположенные в Огудневском участковом лесничестве Московского учебно-опытного лесничества (рисунок 1). Культуры заложены на свежей дренированной вырубке площадью 1,5 га в первой половине 1991 года трехлетними саженцами, выращенными в Латвийском НИИ лесного хозяйства из посевов семян из 6 географических пунктов Канады. В качестве контроля высаживались саженцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) местного происхождения. Исходный тип леса – ельник кисличный, почва – дерновосреднеподзолистая суглинистая. Предварительно на вырубке выполнялась обработка почвы двухотвальным плугом ПКЛ-70 путем нарезки борозд через 3,0-3,5 м, на дно которых через 0,8-1,0 м осуществлялась посадка саженцев [8; 9].

В первой половине 2025 года проведено обследование участка культур на площади 0,2 га в северной части выдела 9, квартала 72. Для сосны скрученной и сосны обыкновенной выполнена перичислительная таксация (с использованием приложения Arboreal Forest и высотомера Vertex IV) [11], а для второстепенных древесных пород – измерительная таксация (с применением цепного полнотомера Биттерлиха и высотомера Vertex IV). Для деревьев сосны скрученной и сосны обыкновенной определены категории санитарного состояния по пятибалльной шкале, где 1 – здоровые, 2 – ослабленные, 3 – сильно ослабленные, 4 – усыхающие, 5 – погибшие деревья [7]. Данные таксационных измерений обработаны в соответствии с общепринятыми методами. Фрагмент обследованного древостоя с участием сосны скрученной и ее морфологические особенности показаны на рисунке 2.



Рис. 1. Расположение объекта исследования (ограничен красным полигоном).

Координаты: N 56,079395, E 38,286442, WGS 84

Fig. 1. Location of the study site (outlined in red).

Coordinates: N 56.079395, E 38.286442, WGS 84

Для изучения динамики роста деревьев сосны скрученной пропорционально представленным ступеням толщины было отобрано 20 кернов на высоте 1,3 м приростным буравом Haglof для хвойных пород. Годичные приросты определялись в камеральных условиях с использованием измерителя кернов Haglof. Полученные в ходе выполнения полевых и камеральных работ данные, а также результаты предыдущих исследований [8, 9] легли в основу моделей роста деревьев сосны скрученной в высоту и толщину, базирующихся на динамическом уравнении С.Ж. Cieszewski [18]:

$$Y_2 = \exp \left(X_0 - \left(\frac{b_1}{X_0} \right) A_2^c \right), \quad X_0 = \frac{1}{2} \left(\ln(Y_1) + (\ln^2(Y_1) + 4b_1 A_1^c)^{\frac{1}{2}} \right),$$

где Y_1 и Y_2 – начальное и конечное значения таксационного показателя (высота или диаметр дерева), A_1 и A_2 – начальное и конечное значения возраста, X_0 – вспомогательная переменная, b_1 и c – оцениваемые по выборке параметры.



Рис. 2. Морфологические особенности сосны скрученной в культурах Московской области: а) общий вид деревьев, б) хвоя, с) шишка, д) ствол и кора
Fig. 2. Morphological characteristics of the twisted pine in plantations in the Moscow Region:
а) general view of the trees, б) needles, с) cones, д) trunk and bark

При обработке полученных данных применялись методы описательной статистики, методы регрессионного анализа (нелинейный метод наименьших квадратов). Для всех уравнений регрессии рассчитывались метрики качества: квадратный корень из среднеквадратической ошибки ($RMSE$), средний процент абсолютной ошибки ($MAPE$), коэффициент детерминации (R^2).

Результаты исследования и их обсуждение

Древесная растительность на обследованном участке представлена культурами сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), а также естественным происхождением ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H.Karst.), березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), осины (*Populus tremula* L.) и ивы козьей (*Salix caprea* L.). Основные таксационные показатели показаны в таблице 1. Сосна скрученная при биологическом возрасте 37 лет имеет среднюю высоту 15,5 м, средний диаметр 17,3 см, сумму площадей поперечных сечений 12,0 м²/га и запас растущей древесины 95 м³/га. Сосна обыкновенная по значениям средней высоты (18,5 м) и среднего диаметра (20,7 см) несколько превосходит сосну скрученную. Так как количество высаженных саженцев сосны обыкновенной было намного меньше, чем сосны скрученной, то она имеет сумму площадей сечений всего 2,1 м²/га и запас 20 м³/га. Из-за отсутствия своевременных лесохозяйственных уходов в древостое также преобладает береза, достигающая средней высоты 20 м, суммы площадей сечений 9,3 м²/га и запаса 100 м³/га.

Таблица 1.

Таксационная характеристика лесного участка с культурами сосны скрученной
Table 1. Valuation Characteristics of a Forest Plot with Twisted Pine Stands

Вид	Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Сумма площадей сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га
Сосна скрученная (<i>Pinus contorta</i> Douglas ex Loudon)	37	15,5	17,3	12,0	95
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	37	18,5	20,7	2,1	20
Ель обыкновенная (<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.)	-	10	8	1,5	5
Береза пушистая (<i>Betula pubescens</i> Ehrh.)	-	20	18	9,3	100
Осина (<i>Populus tremula</i> L.)	-	20	16	0,5	5
Ива козья (<i>Salix caprea</i> L.)	-	10	8	0,1	1
Итого	-	-	-	25,5	226

Несмотря на плодоношение деревьев сосны скрученной, естественное возобновление отсутствует. Подрост представлен единичными экземплярами ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H.Karst.). Подлесок – редкий, сформирован такими видами, как жимолость лесная (*Lonicera xylosteum* L.), бузина обыкновенная (*Sambucus racemosa* L.), черемуха

обыкновенная (*Prunus padus* L.). В травяно-кустарничковом ярусе преобладают такие виды, как ожика волосистая (*Luzula pilosa* (L.) Willd.), яснотка желтая (*Lamium galeobdolon* L.), осока волосистая (*Carex pilosa* Scop.), звездчатка дубравная (*Stellaria nemorum* L.), звездчатка ланцетолистная (*S. holostea* L), живучка ползучая (*Ajuga reptans* L.), вероника дубравная (*Veronica chamaedrys* L.), щитовник картузианский (*Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P.Fuchs), щитовник мужской (*D. filix-mas* (L.) Schott), копытень европейский (*Asarum europaeum* L.), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), подмаренник мягкий (*Galium mollugo* L.), земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), вейник тростниковидный (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth).

Наибольшее количество здоровых и ослабленных деревьев сосредоточено в центральных ступенях толщины (рисунок 3). Для сосны скрученной ряд распределения растущих деревьев (с 1 по 4 категории состояния) по форме приближается к нормальному распределению, а для сосны обыкновенной – имеет бимодальную структуру (по 20 шт. на 1 га содержат ступени толщины 12 и 24 см). Отпад деревьев в культурах сосны происходит по низовому типу. В ряде распределения стволов по ступеням толщины и категориям санитарного состояния основное количество сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев находится в ступенях от 8 до 16 см. Средневзвешенная категория санитарного состояния для сосны скрученной составила 2,6 (сильно ослабленная), а для сосны обыкновенной – 2,1 (ослабленная).

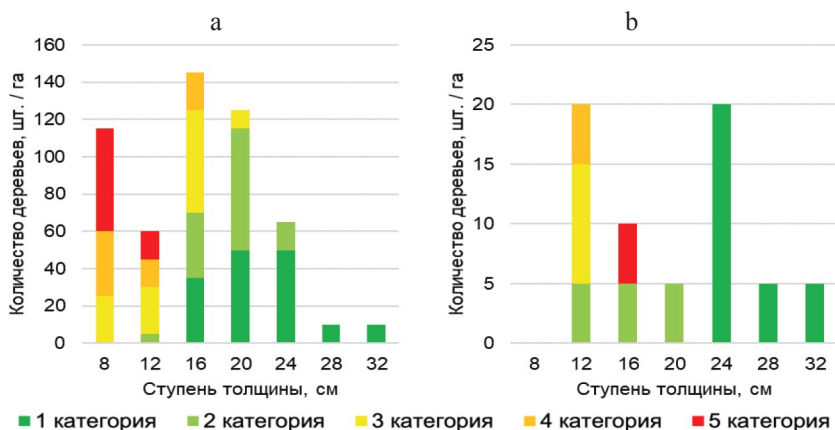


Рис. 3. Распределение по ступеням толщины и категориям санитарного состояния деревьев сосны скрученной (а) и сосны обыкновенной (б)

Fig. 3. Distribution by thickness class and health category of twisted pine (a) and Scots pine (b) trees

Оценить различия в размерах деревьев сосны скрученной и сосны обыкновенной можно путем сопоставления кривых высот. Результаты оценки параметров и точности уравнения зависимости высоты от диаметра деревьев на высоте 1,3 м представлены в таблице 2. Полученные уравнения обладают высокой обобщающей способностью и объясняют около 90% дисперсии высот. Построенные по уравнениям кривые высот для сосны скрученной и сосны обыкновенной показаны на рисунке 4. При одинаковых значениях диаметра дерева интродуцированный вид уступает по высоте аборигенному. Например, при диаметре 12 см разница в высотах между сосной обыкновенной и скрученной составляет 0,47 м, при диаметре 20 см – 0,87 м, а при диаметре 28 см – 1,19 м.

Таблица 2.

Оценка параметров и точности уравнения зависимости высоты от диаметра на высоте 1,3 м деревьев (h – высота, м; dbh – диаметр на высоте 1,3 м, см)

Table 2. Estimation of the parameters and accuracy of the equation relating tree height to diameter at a height of 1.3 m (h – height, m; dbh – diameter at a height of 1.3 m, cm)

Вид	Параметры уравнения $h = 1,3 + \left(\frac{dbh}{b_0 + b_1 dbh} \right)^2$		Метрики качества		
	b_0	b_1	$RMSE$	$MAPE$	R^2
Сосна скрученная	1,781	0,161	1,714	10,3	0,87
Сосна обыкновенная	1,775	0,155	1,347	7,8	0,91

Результаты оценки параметров и точности уравнений роста деревьев сосны скрученной в высоту и в толщину представлены в таблице 3. Динамическая модель роста в высоту объясняет около 60% дисперсии ($R^2 = 0,605$), а модель роста в толщину – около 90% дисперсии ($R^2 = 0,937$). Средняя ошибка прогнозирования ($MAPE$) высот составляет $\pm 16,3\%$, диаметров – $\pm 11,6\%$. Ростовые кривые для высот и диаметров отдельных деревьев сосны скрученной показаны на рисунке 5. Кривые дифференцированы по значению прогнозируемого таксационного показателя в базовом возрасте 35 лет (переменная A_j в уравнениях). Динамические уравнения могут использоваться для оценки успешности роста растений сосны скрученной на начальных этапах и для прогнозирования их потенциала в будущем.

В лесорастительных условиях северо-восточной части Подмосковья на дерновосреднеподзолистых суглинистых почвах без лесохозяйственных уходов сосна скрученная уступает в росте сосне обыкновенной. С момента проведения последнего обследования культур в 2007 году [9] эта тенден-

ция сохранилась. Похожие результаты были получены при сравнении роста различных происхождений сосны скрученной и сосны обыкновенной в Карташевском лесничестве Ленинградской области [2].

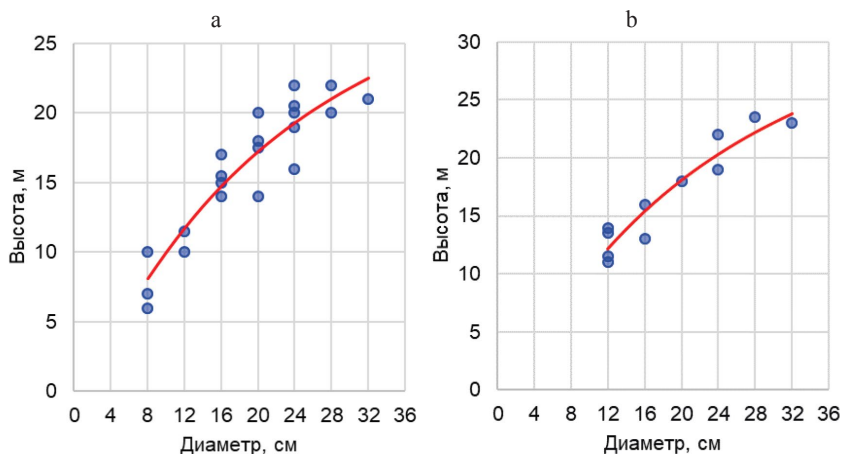


Рис. 4. Зависимость высот от диаметров стволов сосны скрученной (а) и сосны обыкновенной (б)

Fig. 4. Relationship between height and trunk diameter for twisted pine (a) and Scots pine (b)

Таблица 3.

Оценка параметров и точности уравнений роста деревьев сосны скрученной

Table 3. Estimation of Parameters and Accuracy of Growth Equations for Twisted Pine Trees

Зависимая переменная	Параметры уравнения С.Я. Cieszewski		Метрики качества		
	b_1	c	$RMSE$	$MAPE$	R^2
Высота, м	63,229	-0,551	4,133	16,3	0,605
Диаметр, см	144,021	-1,178	2,591	11,6	0,937

Противоположные данные были получены в Сторожевском лесничестве республики Коми [6], в Видлицком лесничестве республики Карелии [15], в Исакогорском лесничестве Архангельской области [17]. В северных регионах европейской части России сосна скрученная по показателям роста значительно превосходит сосну обыкновенную.

Таким образом, в условиях, являющихся типичными для выращивания еловых древостоев в зоне хвойно-широколиственных лесов, сосна скрученная в целом демонстрирует хорошие устойчивость и продуктивность, незначительно уступая аборигенному виду – сосне обыкновенной. Нега-

тивно на росте и выживаемости сосны скрученной сказывается угнетение со стороны березы.

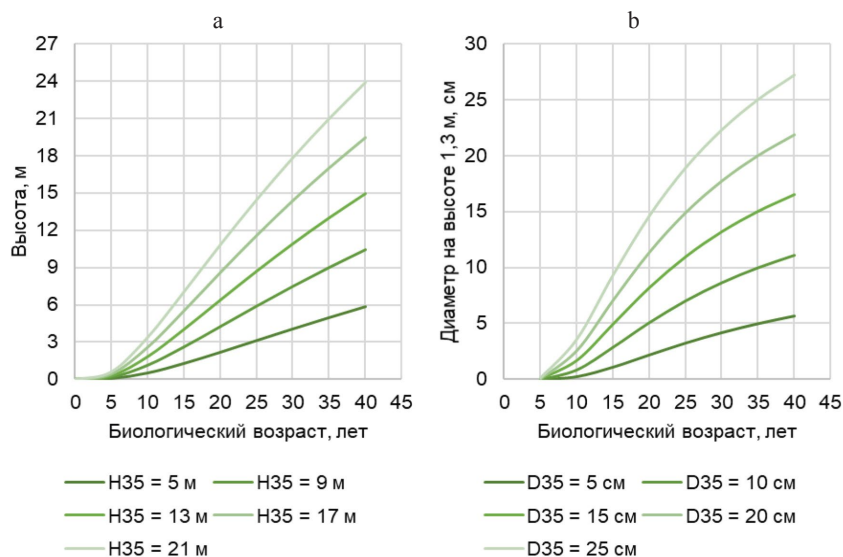


Рис. 5. Рост деревьев сосны скрученной: а) в высоту (H_{35} – высота в базовом возрасте 35 лет) и б) в толщину (D_{35} – диаметр ствола без коры в базовом возрасте 35)

Fig. 5. Growth of contorted pine trees: a) in height (H_{35} – height at a reference age of 35 years) and b) in diameter (D_{35} – bark-free trunk diameter at a reference age of 35 years)

Проведенное исследование показывает, что сосну скрученную можно рекомендовать для выращивания на лесных плантациях Московской области для получения балансовой древесины, но при этом важно проводить своевременные лесохозяйственные уходы для регулирования породного состава древостоев, улучшения санитарного состояния и создания благоприятных условий для роста.

Заключение

Проведенное исследование показало, что сосна скрученная к биологическому возрасту 37 лет имеет среднюю высоту 15,5 м и запас древесины 95 м³/га. По скорости роста она уступает сосне обыкновенной. Отпад в культурах происходит по низовому типу, а наибольшее количество здоровых и ослабленных деревьев сосредоточено в центральных ступенях толщины.

Средневзвешенная категория санитарного состояния сосны скрученной характеризует ее как сильно ослабленную. Несмотря на плодоношение деревьев, естественное возобновление сосны скрученной отсутствует. Сосну скрученную можно рекомендовать для выращивания на лесных плантациях Московской области с целью получения балансовой древесины. Для регулирования породного состава насаждений, улучшения санитарного состояния и создания благоприятных условий для роста целевой древесной породы важно проводить своевременные лесохозяйственные уходы.

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

Список литературы

1. Алексеев, В. М. (2009). Анализ перспективности различных хвойных видов интродуцентов в лесокультурном производстве. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 186, 24–30. EDN: <https://elibrary.ru/LJNHJP>
2. Алексеев, В. М., Жигунов, А. В., Бондаренко, А. С., & Бурцев, Д. С. (2014). Интродукция сосны скрученной в условиях Ленинградской области. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 3(339), 24–33. EDN: <https://elibrary.ru/SEEONR>
3. Бабич, Н. А., & Андропова, М. М. (2014). Сосна скрученная — перспективный интродуцент для озеленения малых северных городов. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 6(342), 155–160. EDN: <https://elibrary.ru/TALVRV>
4. Гутый, А. Л. (2016). Состояние и рост экспериментальных культур сосны скрученной в Республике Коми. *Лесоведение*, 4, 265–269. EDN: <https://elibrary.ru/WKDYUF>
5. Демидова, Н. А., Дуркина, Т. М., & Гоголева, Л. Г. (2017). Семеношение сосны скрученной широкохвойной (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm. ex Wats) в Архангельской области. *Лесохозяйственная информация*, 2, 65–77. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.07>. EDN: <https://elibrary.ru/QHVAPF>
6. Демидова, Н. А., Дуркина, Т. М., Гоголева, Л. Г., Быков, Ю. С., & Парамонов, А. А. (2017). Рост сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats.) в Сторожевском лесничестве Республики Коми. *Лесохозяйственная информация*, 1, 24–33. EDN: <https://elibrary.ru/YIFEUX>
7. Денисова, Н. Б., Лебедев, А. В., Волков, С. Н., Белов, Д. А., & Козлов, К. А. (2025). Санитарное и лесопатологическое состояние сосны пицундской (*Pinus*

- brutia var. pityusa (Steven) Silba) в Джанхотском бору. *Природообустройство*, 2, 137–144. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-137-144>. EDN: <https://elibrary.ru/KAZZWU>
8. Дроздов, И. И., & Дроздов, Ю. И. (2005). Культуры сосны скрученной в решении сырьевой проблемы балансовой древесины. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*, 5, 83–84. EDN: <https://elibrary.ru/JSJHTH>
 9. Дроздов, Ю. И. (2008). Сосна скрученная (*Pinus contorta*) на опытных объектах МГУЛ. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*, 1, 188–191. EDN: <https://elibrary.ru/ISCIRB>
 10. Корчагов, С. А., & Хамитов, Р. С. (2020). Опыт выращивания сосны скрученной (*Pinus contorta*) в Вологодской области. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*, 24(3), 60–65. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-60-65>. EDN: <https://elibrary.ru/EWIVGT>
 11. Лебедев, А. В. (2023). Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона. *Лесотехнический журнал*, 3(51), 56–70. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>. EDN: <https://elibrary.ru/HBYIOC>
 12. Мелехов, И. С. (1984). Интродукция хвойных в лесном хозяйстве. *Лесоведение*, 6, 72–78. EDN: <https://elibrary.ru/ZYMGIZ>
 13. Пристова, Т. А., Федорков, А. Л., & Новаковский, А. Б. (2023). Надземная фитомасса древостоя в экспериментальных культурах сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 6(396), 31–43. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-31-43>. EDN: <https://elibrary.ru/XWIDOD>
 14. Раевский, Б. В., & Мордась, А. А. (2000). Рост и продуктивность испытательных культур сосны скрученной в южной Карелии. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 5–6, 74–81. EDN: <https://elibrary.ru/SJYEER>
 15. Раевский, Б. В. (2010). Ход роста смешанных культур сосны скрученной и сосны обыкновенной в южной Карелии. *Известия Коми научного центра УрО РАН*, 1(1), 31–38. EDN: <https://elibrary.ru/NCOGFT>
 16. Федорков, А. Л., & Гутый, Л. Н. (2017). Состояние экспериментальных культур сосны скрученной в Республике Коми. *Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*, 2(200), 25–31. EDN: <https://elibrary.ru/ZTUTSD>
 17. Феклистов, П. А., & Бирюков, С. Ю. (2006). Сезонный рост сосны скрученной в северной подзоне тайги. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 6, 24–30. EDN: <https://elibrary.ru/HYONHP>

18. Cieszewski, C. J. (2004). GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull and other exponential functions. B: *International Conference on Forest Measurements and Qualitative Methods and Management* (pp. 248–261). Athens, USA: University of Georgia. https://www.researchgate.net/publication/255564510_GADA_derivation_of_dynamic_site_equations_with_polymorphism_and_variable_asymptotes_from_Richards_Weibull_and_other_exponential_functions
19. Demidova, N. A., Durkina, T. M., Gogoleva, L. G., & Paramonov, A. A. (2020). Lodgepole pine of Yukon origin in the European North of Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 574, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012022>. EDN: <https://elibrary.ru/SYQQSZ>
20. Heiðarsson, L., Pukkala, T., & Snorrason, A. (2023). Individual-tree growth models for lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 36, 81–93. <https://doi.org/10.16886/IAS.2023.07>. EDN: <https://elibrary.ru/YQZFEH>
21. Jansons, A., Sisenis, L., Neimane, U., & Rieksts-Riekstins, J. (2013). Biomass production of young lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) stands in Latvia. *iForest*, 6, 10–14. <https://doi.org/10.3832/for0637-006>
22. Liziniewicz, M., Ekö, P. M., & Agestam, E. (2011). Effect of spacing on 23-year-old lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia*) in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(4), 361–371. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.639798>
23. Sobolev, A., Feklistov, P., Bolotov, I., & Barzut, O. (2022). The results of the introduction of twisted pine (*Pinus contorta*) in Bolshoy Solovetsky Island. *Folia Forestalia Polonica, Series A — Forestry*, 64(1), 1–6. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0001>. EDN: <https://elibrary.ru/LSJANC>
24. Sullivan, T. P., Sullivan, D. S., Lindgren, P. M. F., Ransome, D. B., & Zabek, L. (2020). Twenty-five years after stand thinning and repeated fertilization in lodgepole pine forest: Implications for tree growth, stand structure, and carbon sequestration. *Forests*, 11, 337. <https://doi.org/10.3390/f11030337>. EDN: <https://elibrary.ru/EU-ZBMZ>
25. Taylor, K. T., Maxwell, B. D., Pauchard, A., Nuñez, M. A., & Rew, L. J. (2016). Native versus non-native invasions: Similarities and differences in the biodiversity impacts of *Pinus contorta* in introduced and native ranges. *Diversity and Distributions*, 22, 578–588. <https://doi.org/10.1111/ddi.12419>. EDN: <https://elibrary.ru/XPBSTN>
26. Vacek, S., Vacek, Z., Cukor, L., Podrázský, V., & Gallo, J. (2022). *Pinus contorta* Douglas ex Loudon and climate change: A literature review of opportunities, challenges, and risks in European forests. *Journal of Forest Science*, 68(9), 329–343. <https://doi.org/10.17221/101/2022-JFS>. EDN: <https://elibrary.ru/SPQCRK>

27. Wasowicz, P., Óskarsdóttir, G., & Þórhallsdóttir, Þ. E. (2025). Lodgepole pine (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) invasion in subarctic Iceland: Evidence from a long-term study. *NeoBiota*, 97, 47–66. <https://doi.org/10.3897/neobiota.97.134047>. EDN: <https://elibrary.ru/RJKXJT>
28. Zhigunov, A., & Butenko, O. (2019). Estimating the growth of 20- to 26-year-old lodgepole pine plantations in the Leningrad region of Russia. *Folia Forestalia Polonica, Series A — Forestry*, 61(1), 58–63. <https://doi.org/10.2478/ffp-2019-0006>. EDN: <https://elibrary.ru/PMZNTA>

References

1. Alekseev, V. M. (2009). Analysis of the prospects of various coniferous species of introduced plants in forestry production. *Izvestia Sankt-Peterburgskoi Lesotekhnicheskoi Akademii*, 186, 24–30. EDN: <https://elibrary.ru/LJNHJP>
2. Alekseev, V. M., Zhigunov, A. V., Bondarenko, A. S., & Burtsev, D. S. (2014). Introduction of lodgepole pine in the Leningrad Region. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, 3(339), 24–33. EDN: <https://elibrary.ru/SEEHR>
3. Babich, N. A., & Andronova, M. M. (2014). Lodgepole pine — a promising introduced species for landscaping small northern cities. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, 6(342), 155–160. EDN: <https://elibrary.ru/TALVRV>
4. Gutiy, A. L. (2016). State and growth of experimental lodgepole pine plantations in the Komi Republic. *Lesovedenie (Forest Science)*, 4, 265–269. EDN: <https://elibrary.ru/WKDYUF>
5. Demidova, N. A., Durkina, T. M., & Gogoleva, L. G. (2017). Seed production of lodgepole pine, broad-needled variety (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm. ex Wats) in the Arkhangelsk Region. *Lesokhozyaystvennaya Informatsiya (Forestry Information)*, 2, 65–77. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.07>. EDN: <https://elibrary.ru/QHVAPF>
6. Demidova, N. A., Durkina, T. M., Gogoleva, L. G., Bykov, Y. S., & Paramonov, A. A. (2017). Growth of lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats.) in the Storozhevskoe forest district of the Komi Republic. *Lesokhozyaystvennaya Informatsiya (Forestry Information)*, 1, 24–33. EDN: <https://elibrary.ru/YIFEUX>
7. Denisova, N. B., Lebedev, A. V., Volkov, S. N., Belov, D. A., & Kozlov, K. A. (2025). Sanitary and forest pathology state of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba in the Dzhankhot pine forest. *Prirodooobustroystvo (Environmental Engineering)*, 2, 137–144. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-137-144>. EDN: <https://elibrary.ru/KAZZWU>
8. Drozdov, I. I., & Drozdov, Y. I. (2005). Lodgepole pine plantations as a solution to the raw material problem of pulpwood. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo*

- Universiteta Lesa — Lesnoy Vestnik (Bulletin of Moscow State Forest University — Forestry Bulletin)*, 5, 83–84. EDN: <https://elibrary.ru/JSJHJH>
9. Drozdov, Y. I. (2008). Lodgepole pine (*Pinus contorta*) at the experimental sites of MSFU. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Lesa — Lesnoy Vestnik (Bulletin of Moscow State Forest University — Forestry Bulletin)*, 1, 188–191. EDN: <https://elibrary.ru/ISCIRB>
 10. Korchagov, S. A., & Khamitov, R. S. (2020). Experience in growing lodgepole pine (*Pinus contorta*) in the Vologda Region. *Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin*, 24(3), 60–65. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-60-65>. EDN: <https://elibrary.ru/EWIVGT>
 11. Lebedev, A. V. (2023). Inventory of tree plantations in urbanized areas using a smartphone. *Lesotekhnicheskii Zhurnal (Journal of Forestry Engineering)*, 3(51), 56–70. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>. EDN: <https://elibrary.ru/HBYIOC>
 12. Melekhov, I. S. (1984). Introduction of conifers in forestry. *Lesovedenie (Forest Science)*, 6, 72–78. EDN: <https://elibrary.ru/ZYMGIZ>
 13. Pristova, T. A., Fedorkov, A. L., & Novakovskiy, A. B. (2023). Aboveground phytomass of the stand in experimental lodgepole pine plantations in the Syktyvkar forest district of the Komi Republic. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, 6(396), 31–43. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-31-43>. EDN: <https://elibrary.ru/XWIDOD>
 14. Raevsky, B. V., & Mordas, A. A. (2000). Growth and productivity of test plantations of lodgepole pine in southern Karelia. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, 5–6, 74–81. EDN: <https://elibrary.ru/SJYEPP>
 15. Raevsky, B. V. (2010). Growth dynamics of mixed plantations of lodgepole pine and Scots pine in southern Karelia. *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 1(1), 31–38. EDN: <https://elibrary.ru/NCOGFT>
 16. Fedorkov, A. L., & Gutiy, L. N. (2017). State of experimental lodgepole pine plantations in the Komi Republic. *Bulletin of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2(200), 25–31. EDN: <https://elibrary.ru/ZTUTSD>
 17. Feklistov, P. A., & Biryukov, S. Y. (2006). Seasonal growth of lodgepole pine in the northern taiga subzone. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*, 6, 24–30. EDN: <https://elibrary.ru/HYOHHP>
 18. Cieszewski, C. J. (2004). GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull and other exponential functions. In *International Conference on Forest Measurements and Qualitative Methods and Management* (pp. 248–261). Athens, USA: University of Georgia. https://www.researchgate.net/publication/255564510_GADA_derivation_

- of_dynamic_site_equations_with_polymorphism_and_variable_asymptotes_from_Richards_Weibull_and_other_exponential_functions
19. Demidova, N. A., Durkina, T. M., Gogoleva, L. G., & Paramonov, A. A. (2020). Lodgepole pine of Yukon origin in the European North of Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 574, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012022>. EDN: <https://elibrary.ru/SYQQSZ>
 20. Heiðarsson, L., Pukkala, T., & Snorrason, A. (2023). Individual-tree growth models for lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 36, 81–93. <https://doi.org/10.16886/IAS.2023.07>. EDN: <https://elibrary.ru/YQZFEH>
 21. Jansons, A., Sisenis, L., Neimane, U., & Rieksts-Riekstins, J. (2013). Biomass production of young lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) stands in Latvia. *iForest*, 6, 10–14. <https://doi.org/10.3832/ifer0637-006>
 22. Liziniewicz, M., Ekö, P. M., & Agestam, E. (2011). Effect of spacing on 23-year-old lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia*) in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(4), 361–371. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.639798>
 23. Sobolev, A., Feklistov, P., Bolotov, I., & Barzut, O. (2022). The results of the introduction of twisted pine (*Pinus contorta*) on Bolshoy Solovetsky Island. *Folia Forestalia Polonica, Series A — Forestry*, 64(1), 1–6. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0001>. EDN: <https://elibrary.ru/LSJANC>
 24. Sullivan, T. P., Sullivan, D. S., Lindgren, P. M. F., Ransome, D. B., & Zabek, L. (2020). Twenty-five years after stand thinning and repeated fertilization in lodgepole pine forest: Implications for tree growth, stand structure, and carbon sequestration. *Forests*, 11, 337. <https://doi.org/10.3390/f11030337>. EDN: <https://elibrary.ru/EUZBMZ>
 25. Taylor, K. T., Maxwell, B. D., Pauchard, A., Nuñez, M. A., & Rew, L. J. (2016). Native versus non-native invasions: Similarities and differences in the biodiversity impacts of *Pinus contorta* in introduced and native ranges. *Diversity and Distributions*, 22, 578–588. <https://doi.org/10.1111/ddi.12419>. EDN: <https://elibrary.ru/XPBSTN>
 26. Vacek, S., Vacek, Z., Cukor, L., Podrázský, V., & Gallo, J. (2022). *Pinus contorta* Douglas ex Loudon and climate change: A literature review of opportunities, challenges, and risks in European forests. *Journal of Forest Science*, 68(9), 329–343. <https://doi.org/10.17221/101/2022-JFS>. EDN: <https://elibrary.ru/SPQCRK>
 27. Wasowicz, P., Óskarsdóttir, G., & Þórhallsdóttir, Þ. E. (2025). Lodgepole pine (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) invasion in subarctic Iceland: Evidence from a long-term study. *NeoBiota*, 97, 47–66. <https://doi.org/10.3897/neobiota.97.134047>. EDN: <https://elibrary.ru/RJKXJT>

28. Zhigunov, A., & Butenko, O. (2019). Estimating the growth of 20- to 26-year-old lodgepole pine plantations in the Leningrad region of Russia. *Folia Forestalia Polonica, Series A — Forestry*, 61(1), 58–63. <https://doi.org/10.2478/ffp-2019-0006>. EDN: <https://elibrary.ru/PMZNTA>

ВКЛАД АВТОРОВ

Лебедев А.В.: общее руководство проведением исследования, сбор данных, анализ данных, подготовка текста статьи.

Хамитов Р.С.: интерпретация результатов, подготовка теста статьи.

Хамитова С.М.: интерпретация результатов, подготовка теста статьи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Aleksandr V. Lebedev: general management of the research, data collection, data analysis, preparation of the text of the article.

Renat S. Khamitov: interpretation of results, preparation of the text of the article.

Svetlana M. Khamitova: interpretation of results, preparation of the text of the article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Александр Вячеславович, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, доктор сельскохозяйственных наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
alebedev@rgau-msha.ru

Хамитов Ренат Салимович, профессор кафедры землеустройства и лесоводства, доктор сельскохозяйственных наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
r.khamitov@rgau-msha.ru

Хамитова Светлана Михайловна, доцент кафедры ландшафтной архитектуры, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
hamitova@rgau-msha.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr V. Lebedev, Associate Professor at the Department of Land Organization and Forestry, Doctor of Agriculture Science, Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
alebedev@rgau-msha.ru
SPIN-code: 5789-5540
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>
ResearcherID: AAX-9891-2020
Scopus Author ID: 57214907823

Renat S. Khamitov, Professor at the Department of Land Organization and Forestry, Doctor of Agriculture Science, Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
r.khamitov@rgau-msha.ru
SPIN-code: 1660-6032
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1490-3553>
ResearcherID: Z-1461-2018
Scopus Author ID: 57221952101

Svetlana M. Khamitova, Associate Professor at the Department of Landscape Architecture, Candidate of Agriculture Science, Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
hamitova@rgau-msha.ru
SPIN-code: 6491-4435
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3432-3804>
ResearcherID: ABA-1592-2020
Scopus Author ID: 57473779800

Поступила 10.07.2025
После рецензирования 01.09.2025
Принята 07.10.2025

Received 10.07.2025
Revised 01.09.2025
Accepted 07.10.2025

Здравоохранение и профилактическая медицина / Public Health and Preventive Medicine

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1390](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1390)

EDN: [JFMOHQ](https://www.edn.ru/jfmohq)

УДК 616.857



Изучение эффективности транскраниальной фотобиомодуляции при посттравматической головной боли

А.К. Мартусевич¹, Н.Л. Богачек¹, О.В. Евстафьев², В.С. Бадянова³

¹Университет Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

²Нижегородский областной неврологический госпиталь ветеранов войн,
Нижний Новгород, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО Нижегородский ГАТУ им. Л.Я. Флорентьева,
Нижний Новгород, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В последние десятилетия фототерапия получает значительное распространение в различных областях медицины. Эмпирически было показано, что данная лечебная технология оказывает многочисленные положительные эффекты, в том числе купирование болевого синдрома. При этом фокус проблемы смещен в сторону нейродегенеративной патологии и стимуляции восстановления когнитивных функций, тогда как возможности фотобиомодуляции в купировании болевых синдромов различного происхождения раскрыты недостаточно полно.

Цель исследования – оценить целесообразность применения транскраниальной фотобиомодуляции в алгоритме ведения пациентов с посттравматической цефалгией.

Материалы и методы. В предварительном открытом рандомизированном плацебо-контролируемом исследовании приняли участие 2 группы людей с предварительно подтвержденным диагнозом посттравматической цефалгии. Первая группа (n=18) получала стандартное лечение в сочетании с 10 процедурами фототерапии по 10 минут в день с использованием устройства плацебо. Вторая группа (n=17) получала стандартное лечение, дополненное 10 полноценными процедурами фототерапии по 10 минут в день. Эффективность лечения контролировалась по динамике клинических симптомов, а также с помощью стандартных психофизиологических

тестов: краткой шкалы оценки психического статуса (MMSE), опросника качества жизни пациентов SF-36, госпитальной шкалы тревоги и депрессии (HADS), а также визуально-аналогового теста. шкала тяжести боли (ВАШ). Для мониторинга были выбраны три контрольные точки: до начала лечения, через неделю после начала лечения и через две недели после начала лечения (после окончания процедур фототерапии).

Результаты. Наши исследования показали, что анализ результатов одноцентрового плацебо-контролируемого исследования, проведенного на ограниченной выборке, показал преимущества включения фотобиомодуляции в комплексную схему лечения пациентов данного профиля. Установлено, что использование данной технологии позволяет ускорить темпы обезболивания, улучшить качество жизни пациентов и оптимизировать их психологический статус, включая устранение эстетических и депрессивных симптомов.

Ключевые слова: фотобиомодуляция; посттравматическая цефалгия; болевой синдром; депрессия; качество жизни

Для цитирования. Мартусевич, А. К., Богачек, Н. Л., Евстафьев, О. В., & Бадянова, В. С. (2026). Изучение эффективности транскраниальной фотобиомодуляции при посттравматической головной боли. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 302–314. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1390>

The estimation of transcranial photobiomodulation efficiency in complex treatment of patients with posttraumatic cephalgia

A.K. Martusevich¹, N.L. Bogachek¹, O.V. Evstafyev², V.S. Badyanova³

¹*Lobachevsky University, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*Nizhny Novgorod Region Neurological Hospital of War Veterans,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

³*Nizhny Novgorod State Florentyev Agricultural University,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

Abstract

Background. In recent decades, phototherapy has become widespread in various fields of medicine. It has been empirically shown that this therapeutic technology has numerous positive effects, including relief of pain. At the same time, the focus of the problem is shifted towards neurodegenerative pathology and stimulation of cognitive recovery, while the possibilities of photobiomodulation in relieving pain syndromes of various origins are not fully disclosed.

The **purpose** of the study is to estimate the feasibility of transcranial photobiomodulation in the algorithm of management of patients with post-traumatic cephalgia.

Materials and methods. The preliminary, open-label, randomized, placebo-controlled trial included 2 groups of people with a pre-verified diagnosis of post-traumatic cephalgia. The first group (n=18) received standard treatment in combination with 10 phototherapy procedures for 10 minutes daily using a placebo device. The second group (n=17) received standard treatment supplemented with 10 full-fledged phototherapy procedures for 10 minutes daily. The effectiveness of the treatment was monitored according to the dynamics of clinical symptoms, as well as using standard psychophysiological tests: the short mental status Assessment Scale (MMSE), the SF-36 patient quality of life questionnaire, the Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS), as well as the visual-analog scale of pain severity (VAS). Three control points were selected for monitoring: before the start of treatment, one week after the start of treatment, and two weeks after the start of treatment (after the end of phototherapy procedures).

Results. Our studies have demonstrated that an analysis of the results of a single-center placebo-controlled trial performed on a limited sample showed the advantages of including photobiomodulation in a comprehensive management regimen for patients of the profile in question. It has been established that the use of this technology makes it possible to accelerate the rate of pain relief, improve the quality of life of patients and optimize their psychological status, including the elimination of asthenic and depressive symptoms.

Keywords: photobiomodulation; posttraumatic cephalgia; pain syndrome; depression; life quality

For citation. Martusevich, A. K., Bogachek, N. L., Evstafyev, O. V., & Badyanova, V. S. (2026). The estimation of transcranial photobiomodulation efficiency in complex treatment of patients with posttraumatic cephalgia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 302–314. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1390>

В последние десятилетия фототерапия получает значительное распространение в различных областях медицины [12; 16; 20; 21]. Эмпирически было показано, что данная лечебная технология оказывает многочисленные положительные эффекты, в том числе купирование болевого синдрома [1; 4; 6; 9; 20]. Однако в мировой литературе фокус проблемы смещен в сторону нейродегенеративной патологии и стимуляции восстановления когнитивных функций [2], тогда как возможности фотобиомодуляции (ФБМ) в купировании болевых синдромов различного происхождения раскрыты недостаточно полно [3; 10; 22; 23]. Лишь в последние годы рассматриваемая проблема начала привлекать к себе внимание специалистов, и появились отдельные клинические исследования в данной области [3; 5; 9; 24; 25].

При этом в России подобные публикации практически отсутствуют, а аппаратное обеспечение технологии представлено только единственным устройством [3; 17]. В частности, эти затруднения связаны с недостаточно полным пониманием путей и механизмов действия светового излучения красной области спектра и ИК-излучения на биосистемы. Также дискуссионным остается вопрос проникновения данных видов излучения через покровные ткани и костные структуры (в частности, кости черепа при транскраниальном варианте терапии) [7; 13; 15].

Анализ молекулярно-клеточных механизмов формирования болевых синдромов позволил верифицировать некоторые пути реализации рассматриваемого воздействия. В частности, в наших предыдущих публикациях предоставлена общая концепция о «молекулярном биорадикальном сенсоре» для физико-химических факторов [18]. Мы предполагаем, что данный механизм может реализовываться при проведении ФБМ, однако экспериментальных и клинических подтверждений этой гипотезы на данный момент недостаточно [8; 11; 14; 19]. В полной мере это относится к отдельной группе болевых синдромов, получающих особую актуальность в свете многочисленных военных конфликтов, развивающихся в последние годы в различных точках мира.

С учетом вышеперечисленного, *целью исследования* служит изучение целесообразности транскраниальной ФБМ в алгоритме ведения пациентов с посттравматическими цефалгиями.

Материал и методы

В проведенное предварительное, открытое, рандомизированное, плацебо-контролируемое исследование были включены 2 группы людей с предварительно верифицированным диагнозом «Посттравматическая цефалгия». Включение пациентов в исследование осуществляли после подписания информированного согласия на участие в нем. Первая группа (группа сравнения; n=18) получала стандартное лечение в комбинации с 10 фототерапевтическими процедурами по 10 минут ежедневно с понедельника по пятницу аппаратом «плацебо». Вторая группа (основная; n=17) получала стандартное лечение, дополненное 10 полноценными фототерапевтическими процедурами по 10 минут ежедневно с понедельника по пятницу.

Процедуры транскраниальной ФБМ проводятся на аппарате «Elmedlife H» по стандартному протоколу [17]. Во время сеанса пациенту проводили низкоинтенсивное излучение инфракрасного и красного диапазонов на проекцию 10-ти лобных, теменных и височных отделов коры

головного мозга через светодиоды, расположенные в надеваемой на голову пациента шлема-гарнитуры «Elmedlife H» [17]. Сеансы проводились в условиях стационара либо дневного стационара.

Мониторинг эффективности проводимого лечения осуществляли по динамике клинических симптомов, а также с применением стандартных психофизиологических тестов: краткой шкалы оценки психического статуса (MMSE), опросника качества жизни пациентов SF-36, госпитальной шкалы тревоги и депрессии (Hospital Anxiety and Depression Scale, HADS), а также визуально-аналоговой шкалы выраженности болевого синдрома (ВАШ). Были выбраны 3 контрольные точки для мониторинга: перед началом лечения, через неделю после начала лечения и через две недели после начала лечения (после окончания фототерапевтических процедур).

Статистическая обработка результатов эксперимента была выполнена с использованием пакета программ Statistica 6.0. Данные представляли в форме среднего значения и стандартного отклонения. Значимость различий между отдельными воздействиями оценивали путем применения t-критерия Стьюдента.

Результаты

Нами была проведена комплексная оценка качества жизни, выраженности основной клинической симптоматики и психоэмоционального статуса пациентов с посттравматической головной болью в динамике терапии. Первым компонентом выполненного анализа служил мониторинг выраженности болевого синдрома, который осуществляли с использованием стандартного метода – применения визуально-аналоговой шкалы. Установлено, что у представителей обеих сформированных групп в процессе комплексного лечения наблюдается редукция основного патологического синдрома, что проявляется в статистически значимом снижении параметра ВАШ уже после проведения пятой процедуры относительно исходного уровня показателя ($p < 0,05$; рис. 1). Данная тенденция по снижению выраженности головной боли продолжалась к завершению курса. При этом если в середине лечебного цикла уровень критерия не демонстрировал межгрупповых различий, то после десятой (заключительной) процедуры у пациентов основной группы регистрировали более низкое значение ВАШ по сравнению с выявленным для больных, в схему лечения которых включали «плацебо» ($p < 0,05$). Данный факт свидетельствует о позитивном влиянии транскраниальной фотобиомодуляции на коррекцию хронической головной боли.

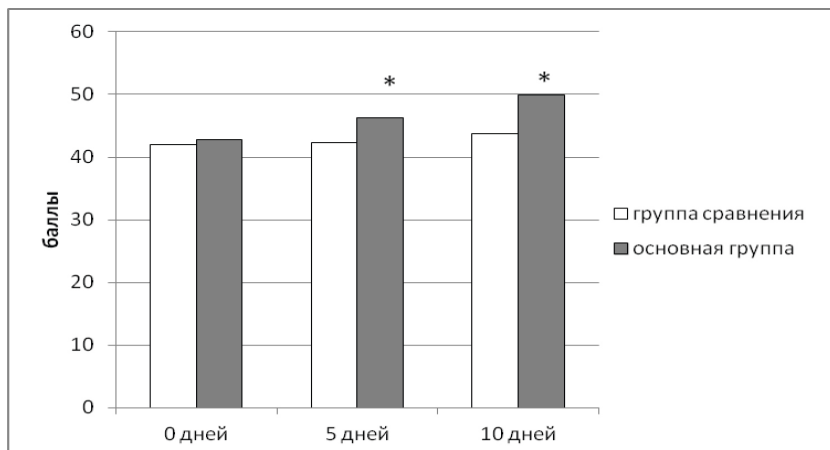


Рис. 1. Выраженность головной боли у пациентов с посттравматической головной болью на основании самооценки по визуально-аналоговой шкале в динамике лечения (“*” - различия относительно уровня контрольной группы статистически значимы, $p < 0,05$)

Fig. 1. Severity of headache in patients with post-traumatic headache, as self-reported on a visual analog scale, over the course of treatment (“*” indicates that differences from the control group are statistically significant, $p < 0.05$)

С учетом того, что распространенной интегральной характеристикой эффективности лечения является качество жизни, нами также был использован опросник SF-36 (рис. 2). Показано, что у представителей группы сравнения данный показатель практически не претерпел изменений на протяжении всего курса лечения, тогда как у пациентов, в алгоритм ведения которых включали транскраниальную ФБМ, качество жизни планомерно возрастало, достигая уровня статистической значимости относительно состояния до начала курса как после пятой, так и после десятой процедуры ($p < 0,05$ для обоих случаев). Это также подтверждает системные позитивные сдвиги психоэмоционального состояния пациентов при использовании фотобиомодуляции.

Третьим компонентом анализа являлась оценка динамики психологического статуса пациентов, для чего нами была применена методика MMSE (рис. 3). Установлено, что по интегральному критерию данного теста у больных, вошедших в группу сравнения, умеренное повышение на уровне тенденции зафиксировано только в конце курса лечения (+6,5%; $p < 0,1$). Напротив, применение транскраниальной ФБМ способствовало статистически значимо-

му увеличению показателя уже после пятой процедуры (на 14,8% относительно исходного уровня; $p < 0,05$), а по завершении полного курса регистрировали более выраженное повышение параметра (на 28,6%; $p < 0,05$). Данная динамика свидетельствует об ускорении темпов восстановления психологического состояния пациентов в случае включения в схему лечения ФБМ.

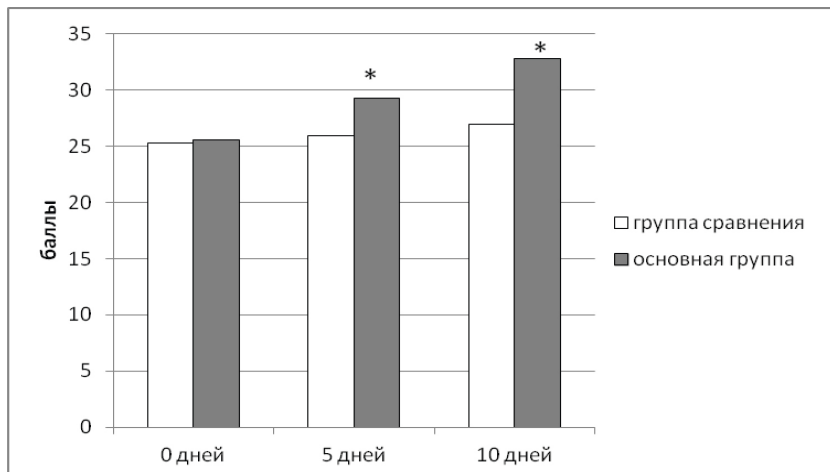


Рис. 2. Уровень интегрального параметра качества жизни по тесту SF-36 у пациентов с посттравматической головной болью в динамике лечения (“*” - различия относительно уровня контрольной группы статистически значимы, $p < 0,05$)

Fig. 2. Changes in the SF-36 overall quality of life score in patients with post-traumatic headache over the course of treatment (“*” indicates that differences from the control group are statistically significant, $p < 0.05$)

Наконец, последним видом индикаторов эффективности изучаемого варианта физиотерапевтического лечения служило изучение наличия и степени выраженности депрессивной симптоматики, с целью которого нами использовалась госпитальная шкала тревоги и депрессии (HADS; рис. 4). Выявлено, что в процессе лечения происходит снижение уровня оценочного параметра, причем указанная тенденция более отчетливо проявляется у представителей основной группы, получивших 10 процедур фотобиомодуляции. Установлено, что у них параметр на каждом этапе мониторинга был статистически значимо ниже, чем у пациентов, в схему лечения которых были включены фототерапевтические процедуры ($p < 0,05$ во второй и третьей контрольных точках).

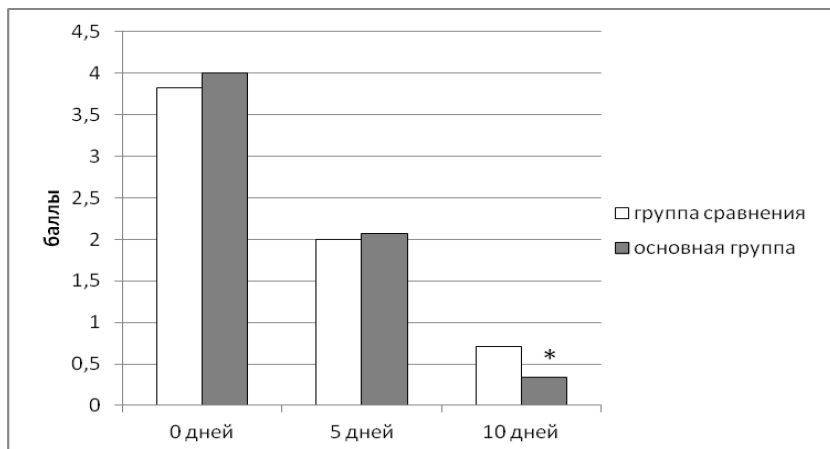


Рис. 3. Уровень интегрального параметра теста MMSE у пациентов с посттравматической головной болью в динамике лечения (“*” - различия относительно уровня контрольной группы статистически значимы, $p < 0,05$)

Fig. 3. Changes in the total MMSE score in patients with post-traumatic headache over the course of treatment (“*” indicates that differences from the control group are statistically significant, $p < 0.05$)

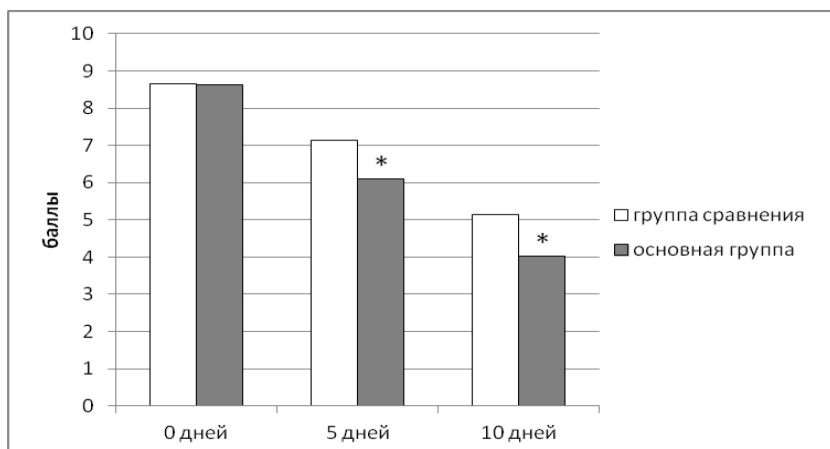


Рис. 4. Выраженность депрессии у пациентов с посттравматической головной болью в динамике лечения (“*” - различия относительно уровня контрольной группы статистически значимы, $p < 0,05$)

Fig. 4. Severity of depression in patients with post-traumatic headache over the course of treatment (“*” indicates that differences from the control group are statistically significant, $p < 0.05$)

Заключение

Анализ результатов одноцентрового плацебо-контролируемого исследования, выполненного на ограниченной выборке, показал преимущества включения фотобиомодуляции в комплексную схему ведения пациентов рассматриваемого профиля. Установлено, что использование данной технологии позволяет ускорить темпы купирования болевого синдрома, повысить качество жизни пациентов и оптимизации психологического статуса, в том числе – устранения астено-депрессивных проявлений.

Список литературы / References

1. Abdurashid, N. A., Ali, O. I., & Elsharkawy, M. A. (2024). Effect of photobiomodulation therapy on headache and fatigue in patients with chronic rhinosinusitis: A randomized controlled study. *Lasers in Medical Science*, 39(1), 62. <https://doi.org/10.1007/s10103-024-04011-4>. EDN: <https://elibrary.ru/SNENYW>
2. Belova, A. N., Israelyan, Yu. A., Sushin, V. O., Shabanova, M. A., & Rezenova, A. M. (2021). Transcranial photobiomodulation in therapy of neurodegenerative diseases of the brain: Theoretical background and clinical effectiveness. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy*, 98(6), 61–67. <https://doi.org/10.17116/kurort20219806161>. EDN: <https://elibrary.ru/XQJITJ>
3. Campos, M. C. V., Schuler, S. S. V., Lacerda, A. J., Mazzoni, A. C., Silva, T., Rosa, F. C. S., Martins, M. D., Fernandes, K. P. S., Fonseca, E. S., Mesquita-Ferrari, R. A., Horliana, A. C. R. T., Bussadori, S. K., & Motta, L. J. (2024). Evaluation of vascular photobiomodulation for orofacial pain and tension type headache following COVID-19 in a pragmatic randomized clinical trial. *Scientific Reports*, 14(1), 31138. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82412-9>. EDN: <https://elibrary.ru/RKUQEU>
4. Costanti Vilela Campos, M., Simoes Velloso Schuler, S., de Barros Motta, P., Cátia Mazzoni, A., Cristina da Silva, F., Domingues Martins, M., Porta Santos Fernandes, K., Agnelli Mesquita-Ferrari, R., Ratto Tempestini Horliana, A. C., Kalil Bussadori, S., & Jansiski Motta, L. (2022). The effect of systemic versus local transcutaneous laser therapy on tension-type cephalgia and orofacial pain in post-COVID-19 patients: A pragmatic randomized clinical trial. *Medicine (Baltimore)*, 101(46), e31218. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000031218>. EDN: <https://elibrary.ru/XWYMFO>
5. da Fonseca, E. V., Bussadori, S. K., da Silva Martinho, L. F. C., de Sousa Melo, M. C., de Andrade, F. L., Gonçalves, M. L. L., Mesquita-Ferrari, R. A., Horliana, A. C. R. T., & Fernandes, K. P. S. (2019). Evaluation of photobiomodulation effects on pain, edema, paresthesia, and bone regeneration after surgically assisted rapid maxillary expansion: Study protocol for a randomized, controlled, and double

- blind clinical trial. *Medicine (Baltimore)*, 98(48), 17756. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000017756>
6. de Pedro, M., López-Pintor, R. M., de la Hoz-Aizpurua, J. L., Casañas, E., & Hernández, G. (2020). Efficacy of low-level laser therapy for the therapeutic management of neuropathic orofacial pain: A systematic review. *Journal of Oral and Facial Pain and Headache*, 34(1), 13–30. <https://doi.org/10.11607/ofph.2310>. EDN: <https://elibrary.ru/JBWKMM>
 7. Detaboada, L., Ilic, S., Leichter-Martha, S., et al. (2006). Transcranial application of low-energy laser irradiation improves neurological deficits in rats following acute stroke. *Lasers in Surgery and Medicine*, 38(1), 70–73. <https://doi.org/10.1002/lsm.20256>
 8. Dompe, C., Moncrieff, L., Matys, J., Grzech-Leśniak, K., Kocherova, I., Bryja, A., Bruska, M., Dominiak, M., Mozdziak, P., Skiba, T. H. I., Shibli, J. A., Angelova Volponi, A., Kempisty, B., & Dyszkiewicz-Konwińska, M. (2020). Photobiomodulation—underlying mechanism and clinical applications. *Journal of Clinical Medicine*, 9(6), 1724. <https://doi.org/10.3390/jcm9061724>. EDN: <https://elibrary.ru/QBBJTH>
 9. Ebneshahidi, N. S., Heshmatipour, M., Moghaddami, A., & Eghtesadi-Araghi, P. (2005). The effects of laser acupuncture on chronic tension headache—a randomised controlled trial. *Acupuncture in Medicine*, 23(1), 13–18. <https://doi.org/10.1136/aim.23.1.13>
 10. Gomes, A. O., Martimbiano, A. L. C., Brugnera Junior, A., Horliana, A. C. R. T., da Silva, T., Santos, E. M., Fragoso, Y. D., Fernandes, K. P. S., Nammour, S., & Bussadori, S. K. (2022). Photobiomodulation for the treatment of primary headache: Systematic review of randomized clinical trials. *Life (Basel)*, 12(1), 98. <https://doi.org/10.3390/life12010098>. EDN: <https://elibrary.ru/KNWWBK>
 11. Henderson, T. A., & Morries, L. D. (2015). SPECT perfusion imaging demonstrates improvement of traumatic brain injury with transcranial near-infrared laser phototherapy. *Advances in Mind-Body Medicine*, 29(4), 27–33. <https://doi.org/10.2147/NDT.S65809>
 12. Hou, T. W., Yang, C. C., Lai, T. H., Wu, Y. H., & Yang, C. P. (2024). Light therapy in chronic migraine. *Current Pain and Headache Reports*, 28(7), 621–626. <https://doi.org/10.1007/s11916-024-01258-y>. EDN: <https://elibrary.ru/YNFDNU>
 13. Lampl, Y., Zivin, J. A., & Fisher, M. (2007). Infrared laser therapy for ischemic stroke: A new treatment strategy: Results of the NeuroThera Effectiveness and Safety Trial-1 (NEST-1). *Stroke*, 38(6), 1843–1849. <https://doi.org/10.1161/STROKEA-HA.106.478230>. EDN: <https://elibrary.ru/LYHJLH>
 14. Langella, L. G., Silva, P. F. C., Costa-Santos, L., Gonçalves, M. L. L., Motta, L. J., Deana, A. M., Fernandes, K. P. S., Mesquita-Ferrari, R. A., & Bussadori, S. K. (2018). Photobiomodulation versus light-emitting diode (LED) therapy in the treat-

- ment of temporomandibular disorder: Study protocol for a randomized, controlled clinical trial. *Trials*, 19(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s13063-018-2444-7>. EDN: <https://elibrary.ru/WSLZAL>
15. Lapchak, P. A., Wei, J., & Zivin, J. A. (2004). Transcranial infrared laser therapy improves clinical rating scores after embolic strokes in rabbits. *Stroke*, 35(8), 1985–1988. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000131808.69640.b7>
 16. Lutfallah, S., Wajid, I., Sinnathamby, E. S., Maitiski, R. J., Edinoff, A. N., Shekoohi, S., Cornett, E. M., Urman, R. D., & Kaye, A. D. (2023). Low-level laser therapy for acute pain: A comprehensive review. *Current Pain and Headache Reports*, 27(10), 607–613. <https://doi.org/10.1007/s11916-023-01149-8>. EDN: <https://elibrary.ru/YCCSDW>
 17. Martusevich, A., Bogachek, N., Nazarov, V. (2024). Transcranial photobiomodulation in neurological and psychiatric practice: Fundamental and clinical aspects. *Archiv Euromedica*, 13(1), e1, 107. <https://doi.org/10.35630/2024/14/1.107>. EDN: <https://elibrary.ru/XGBONK>
 18. Martusevich, A. K., Surovegina, A. V., Bocharin, I. V., Nazarov, V. V., Minenko, I. A., & Artamonov, M. Y. (2022). Cold argon atmospheric plasma for biomedicine: Biological effects, applications and possibilities. *Antioxidants (Basel)*, 11(7), 1262. <https://doi.org/10.3390/antiox11071262>. EDN: <https://elibrary.ru/IIOKKO>
 19. Morries, L. D., Cassano, P., & Henderson, T. A. (2015). Treatments for traumatic brain injury with emphasis on transcranial near-infrared laser phototherapy. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 11, 2159–2175. <https://doi.org/10.2147/NDT.S65809>. EDN: <https://elibrary.ru/VGOMZV>
 20. Munguia, F. M., Jang, J., Salem, M., Clark, G. T., & Enciso, R. (2018). Efficacy of low-level laser therapy in the treatment of temporomandibular myofascial pain: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Oral and Facial Pain and Headache*, 32(3), 287–297. <https://doi.org/10.11607/ofph.2032>
 21. Öz, S., Gökçen-Röhligh, B., Saruhanoglu, A., & Tuncer, E. B. (2010). Management of myofascial pain: Low-level laser therapy versus occlusal splints. *Journal of Craniofacial Surgery*, 21(6), 1722–1728. <https://doi.org/10.1097/SCS.0b013e3181f3c76c>
 22. Peres, M. F. (2010). Low-level laser therapy for neck pain. *Cephalalgia*, 30(11), 1408. <https://doi.org/10.1177/0333102410362121>
 23. Schuler, S. S. V., Campos, M. C. V., Lacerda, A. J., Mazzoni, A. C., Silva, T., Silva, F. C. D., Martins, M. D., Fernandes, K. P. S., Fonseca, E. S., Mesquita-Ferrari, R. A., Horliana, A. C. R. T., Bussadori, S. K., & Motta, L. J. (2024). Dosimetry model for photobiomodulation based on anthropometric and hemodynamic variables in patients with orofacial pain post-Covid-19: Study protocol for randomized clinical trial. *PLOS ONE*, 19(10), e0309073. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309073>. EDN: <https://elibrary.ru/HSVICL>

24. Tomaz de Magalhães, M., Núñez, S. C., Kato, I. T., & Ribeiro, M. S. (2016). Light therapy modulates serotonin levels and blood flow in women with headache: A preliminary study. *Experimental Biology and Medicine (Maywood)*, 241(1), 40–45. <https://doi.org/10.1177/1535370215596383>. EDN: <https://elibrary.ru/WTFAZD>
25. Yang, H. W., & Huang, Y. F. (2011). Treatment of persistent idiopathic facial pain (PIFP) with a low-level energy diode laser. *Photomedicine and Laser Surgery*, 29(10), 707–710. <https://doi.org/10.1089/pho.2011.3030>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Мартусевич Андрей Кимович, д.б.н., доцент, руководитель лаборатории интегрального здоровья человека, профессор кафедры спортивной медицины и психологии

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

*пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, 603005, Российская Федерация
cryst-mart@yandex.ru*

Богачек Наум Львович, к.э.н., соискатель

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

*пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, 603005, Российская Федерация
nbogachek@gmail.com*

Евстафьев Олег Владимирович, главный врач

Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Нижегородской области «Нижегородский областной неврологический госпиталь ветеранов войн»

*пер. Гоголя, д. 9а, г. Нижний Новгород, 603001, Российская Федерация
ngvv_nn@mail.52gov.ru*

Бадянова Вера Сергеевна, студент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева»

*пр. Гагарина, 97, г. Нижний Новгород, 603117, Российская Федерация
verabad1978@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS**Andrew K. Martusevich**, PhD, MD, Head of the Laboratory of Human Integral Health*Lobachevsky University**23, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation**cryst-mart@yandex.ru**SPIN-code: 5618-4826**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0818-5316>**ResearcherID: AAY-6097-2020, G-1752-2011**Scopus Author ID: 22035825900***Naum L. Bogachek**, PhD*Lobachevsky University**23, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation**nbogachek@gmail.com**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9524-5320>***Oleg V. Evstafyev**, Chief Doctor*Nizhny Novgorod Region Neurological Hospital of War Veterans**9a, Gogol Str., Nizhny Novgorod, 603001, Russian Federation**ngvv_nn@mail.52gov.ru***Vera S. Badyanova**, student*Nizhny Novgorod State Florentyev Agricultural University**97, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603117, Russian Federation**verabad1978@gmail.com**ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5047-3760>*

Поступила 13.06.2025

После рецензирования 10.08.2025

Принята 07.09.2025

Received 13.06.2025

Revised 10.08.2025

Accepted 07.09.2025

Здравоохранение и профилактическая медицина / Public Health and Preventive Medicine

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1383](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1383)EDN: [NXYCCE](https://www.edn.ru/entry/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1383)

УДК 611.08, 611.12-611.13



Морфометрический анализ бифуркаций венечных артерий сердца человека в норме по данным рентгенологического обследования лиц разного пола, второго периода зрелого и пожилого возраста

А.В. Дмитриев¹, А.А. Сергиенко², И.С. Милтых³, О.К. Зенин²¹*Институт неотложной и восстановительной хирургии
им. В.К. Гусака, Донецк, Российская Федерация*²*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»,
Пенза, Российская Федерация*³*Университет Палермо, Палермо, Италия*

Аннотация

Обоснование. Соотношение внутренних диаметров артериальных сегментов (АС) составляющих артериальные бифуркации (АБ) венечных артерий сердца человека (ВАСЧ) используют для классификации поражений АБ и разработки стандартного протокола оперативного вмешательства по устранению сужений просвета АС. Однако, вопрос количественной нормы строения АБ ВАСЧ остается открытым.

Цель. Установить морфометрические закономерности соотношений внутренних диаметров АС составляющих АБ в норме путем ретроспективного анализа рентгенограмм ВАСЧ лиц разного пола, второго периода зрелого и пожилого возраста.

Материалы и методы. Проведен ретроспективный морфометрический анализ рентгенограммах ВАСЧ (лиц 2-го периода зрелого возраста – 48 шт. и пожилого возраста – 14 шт.; лиц мужского пола – 31 шт. и женского – 31 шт.; левой венечной артерии – 62 шт. и правой венечной артерии 60 шт) без видимых стенотических поражений. ВАСЧ рассматривали как систему, состоящую из АБ, в состав которой входят проксимальный АС (D) и два дистальных АС ($d_{\max}$ и $d_{\min}$). Рассчитывали: g, коэффициент асимметрии дочерних ветвей: $g=(d_{\min}/d_{\max})^2$; h, коэффициент ветвления: $h=(d_{\max}^2+d_{\min}^2)/D^2$. Для анализа использовали статистический пакет R (версия 4.1).

Результаты. Установлено: величины внутреннего диаметра D и $d_{\max}$ АС составляющих АБ входящих в состав ВАСЧ лиц мужского пола значимо больше,

чем у лиц женского пола; величины D , $d_{\max}$ и $d_{\min}$ AC составляющих AB входящих в состав ВАСЧ лиц 2-го периода зрелого возраста значимо больше, чем у лиц пожилого возраста; значения D , $d_{\max}$, $d_{\min}$, g и h заметно больше у AC левой венечной артерии, чем правой; AB входящие в состав левой венечной артерии сердца более «симметричны», чем составляющие правую венечную артерию.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о необходимости дальнейших морфометрических исследований ВАСЧ, ревизии закона Murray C.D. и разработки универсальной объединяющей теории строения и функционирования AB.

Ключевые слова: венечные артерии сердца; рентгенограммы; морфометрия; бифуркации; закон Murray C.D.

Для цитирования. Дмитриев, А. В., Сергиенко, А. А., Милтых, И. С., & Зенин, О. К. (2026). Морфометрический анализ бифуркаций венечных артерий сердца человека в норме по данным рентгенологического обследования лиц разного пола, второго периода зрелого и пожилого возраста. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 315–333. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1383>

Morphometric analysis of coronary artery bifurcations in normal human hearts based on X-ray examination in individuals of different sexes in the second period of mature and elderly age

A.V. Dmitriev¹, A.A. Sergienko², I.S. Milytkh³, O.K. Zenin²

¹V.K. Gusak Institute of Emergency and Reconstructive Surgery,
Donetsk, Russian Federation

²Penza State University, Penza, Russian Federation

³University of Palermo, Palermo, Italy

Abstract

Background. The ratio of the inner diameters of arterial segments (AS) constituting arterial bifurcations (AB) of the human coronary arteries (HCA) is used to classify AB lesions and develop a standard protocol for surgical intervention to eliminate AS lumen narrowing. However, the question of the quantitative norm of the HCA AB structure remains open.

Purpose. To establish morphometric patterns of the ratios of the inner diameters of AS constituting AB in the norm by retrospective analysis of HCA radiographs in individuals of different sexes, the second period of mature and elderly age.

Materials and methods. A retrospective morphometric analysis of HCA radiographs (individuals of the 2nd period of mature age - 48. and elderly age - 14; males - 31 and females - 31; left coronary artery - 62 and right coronary artery 60) without

visible stenotic lesions was performed. HCA was considered as a system consisting of AB, which includes a proximal AS (D) and two distal AS ($d_{\max}$ and $d_{\min}$). The following were calculated: γ , the asymmetry coefficient of daughter branches: $\gamma = (d_{\min}/d_{\max})^2$; η , branching coefficient: $\eta = (d_{\max}^2 + d_{\min}^2)/D^2$. The statistical package R (version 4.1) was used for analysis.

Results. It was found that: the values of the inner diameter D and $d_{\max}$ of AS constituting AB included in the HCA of males are significantly larger than those of females; the values of D, $d_{\max}$ and $d_{\min}$ of AS constituting AB included in the HCA of individuals of the 2nd period of mature age are significantly larger than those of elderly individuals; the values of D, $d_{\max}$, $d_{\min}$, γ and η are noticeably larger in the AS of the left coronary artery than in the right; AB included in the left coronary artery of the heart are more “symmetrical” than those constituting the right coronary artery.

Conclusion. The obtained data indicates the need for further morphometric studies of HCA, revision of Murray C.D.’s law, and development of a universal unifying theory of the structure and functioning of AB.

Keywords: coronary arteries of the heart; radiographs; morphometry; bifurcations; Murray C.D. law

For citation. Dmitriev, A. V., Sergienko, A. A., Milykh, I. S., & Zenin, O. K. (2026). Morphometric analysis of coronary artery bifurcations in normal human hearts based on X-ray examination in individuals of different sexes in the second period of mature and elderly age. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 315–333. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1383>

Введение

Венечные артерии сердца человека (ВАСЧ) являются основными поставщиками крови к стенке сердца, обеспечивают адекватное кровоснабжение этого органа для поддержания его работы. Любые нарушения структуры или функции ВАСЧ могут привести к серьезным заболеваниям таким как ишемическая болезнь сердца или инфаркт миокарда [18]. Атеросклеротические поражения участков артериальных бифуркаций (АБ) ВАСЧ составляют 15–20% всех случаев данной патологии [6, 25, 10]. Трудности, связанные с коррекцией этих повреждений [15] проблемы оценки их физиологической значимости и высокий риск развития рестеноза [7] вызывают живой интерес к морфологическому исследованию этих участков ВАСЧ [10].

Сегодня уже недостаточно простое словесное (качественное) описание анатомических структур, теория и практика медицины требуют их количественного (цифрового) представления. Особый интерес у исследовате-

лей вызывает соотношение внутренних диаметров артериальных сегментов (АС) составляющих АБ ВАСЧ [22]. Предлагается использовать это соотношение для классификации поражений АБ и разработки стандартного протокола оперативного вмешательства по устранению данной патологии. Последние исследования подтверждают, что такие соотношения, в особенности индекс Финэ (Finet's ratio - отношение диаметра основного ствола к сумме диаметров дочерних ветвей), являются ключевыми детерминантами локальной гемодинамики и распределения эндотелиального напряжения сдвига (ESS). Так, значение индекса Финэ $<0,8$ коррелирует с развитием зон низкого и осциллирующего напряжения сдвига вдоль латеральных стенок бифуркации, где преимущественно формируются атеросклеротические бляшки. Математические модели, основанные на данных КТ-ангиографии 127 пациентов без стенозов (2025 г.), продемонстрировали статистически значимую корреляцию ($p < 0,001$) между индексом Финэ и площадью поверхности сосуда, подверженной патологически низким значениям ESS ($<0,5$ Па) – ключевым триггером эндотелиальной дисфункции и атерогенеза [11].

Гемодинамические особенности бифуркаций также напрямую связаны с их морфометрией. Зоны низкого и осциллирующего напряжения сдвига (ESS $<0,5$ Па) преимущественно формируются вдоль латеральных стенок бифуркаций, что гистологически коррелирует с локализацией фиброатером и кальцинированных бляшек [11].

Несмотря на такой повышенный интерес к данной проблеме [12] фактических сведений о морфометрических характеристиках «нормальных» (без атеросклеротических и иных поражений) АБ ВАСЧ явно недостаточно.

Вышесказанное определило цель настоящего исследования.

Цель исследования – установить морфометрические закономерности соотношений внутренних диаметров АС составляющих АБ в норме путем ретроспективного анализа рентгенограмм ВАСЧ лиц разного пола, второго периода зрелого и пожилого возраста.

Материал и методы

Данное исследование выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующих поправках. Заключение биоэтического комитета было получено на заседании Координационного совета Института неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака (ДНР) от 10.12.2021 г., протокол №3. Ретроспективно изучались цифровые рентгенограммы ВАСЧ лиц, проходивших обследование в отделении рентген-эндоваскулярной хирургии Института неот-

ложной и восстановительной хирургии (ИНВХ) им. В. К. Гусака МЗ ДНР
2015-2022 гг.

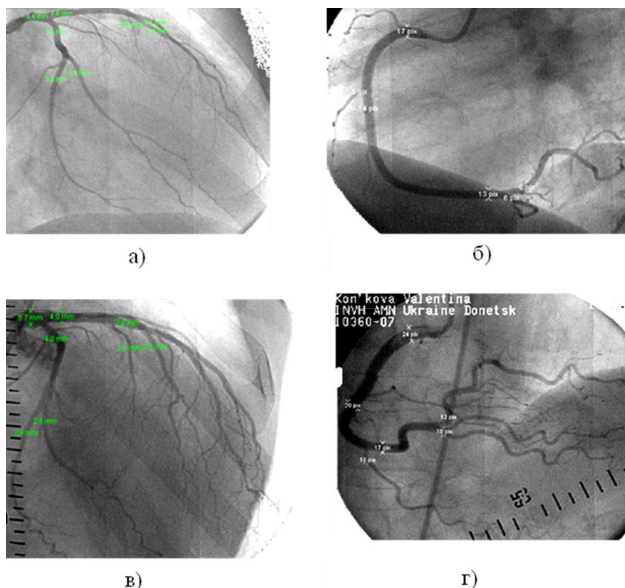


Рис. 1. Рентгенограммы ВАСЧ лиц без окклюзионно-стенотических поражений венечных артерий: а) рентгенограмма левой венечной артерии сердца, Г., пол женский 37 год; б) рентгенограмма правой венечной артерии сердца, К., пол мужской, 51 год; в) рентгенограмма левой венечной артерии сердца, Г., пол мужской, 65 лет; г) рентгенограмма правой венечной артерии сердца, Ж., пол женский, 70 лет.

Fig. 1. Radiographs of the coronary arteries in individuals without occlusive-stenotic lesions of the coronary arteries: a) radiograph of the left coronary artery, G., female, 37 years old; b) radiograph of the right coronary artery, K., male, 51 years old; c) X-ray of the left coronary artery, G., male, 65 years old; d) X-ray of the right coronary artery, Zh., female, 70 years old.

Ретроспективно были исследованы рентгенограммы ВАСЧ лиц 2-го периода зрелого возраста – 48 шт. (мужчины - от 36 до 60 года, женщины - от 36 до 55 лет) и пожилого возраста – 14 шт. (мужчины - от 61 до 75 года, женщины - от 56 до 75 лет); лиц мужского пола – 31 шт. и женского – 31 шт.; левой венечной артерии – 62 шт. и правой венечной артерии 60 шт. (рис. 1).

Критерии включения: наличие добровольного согласия; возраст от 36 до 74 лет; отсутствие сердечно-сосудистой патологии в анамнезе; отсутствие видимых окклюзионно-стенотических повреждений ВАСЧ. Крите-

рии исключения: отсутствие добровольного согласия; возраст меньше 36 и больше 74 лет; наличие в анамнезе заболевания, вызывающие повреждение ВАСЧ; визуально при обследовании обнаруженные деформации и аномалии ВАСЧ.

Морфометрию цифровых рентгенограмм ВАСЧ проводили при помощи лицензионной компьютерной программы Quantcor на ангиографическом аппарате «Infinix VC-i» (заводской номер E6B1392019) фирмы Toshiba, в соответствии с прилагаемыми к аппарату инструкциями. Измеряли диаметры АС составляющих АБ ВАСЧ (рис. 2). Полученные данные заносились в специальные таблицы (Microsoft Office Excel): номер протокола; возрастная группа (1 - второй период зрелого возраста, 2 - пожилой возраст); пол (1 - мужской, 2 - женский); венечная артерия (1 - левая, 2 - правая); D диаметр материнского (проксимального) АС (мм); $d_{\max}$ диаметр большего дочерного (дистального) АС (мм); $d_{\min}$ диаметр меньшего дочерного (дистального) АС (мм).

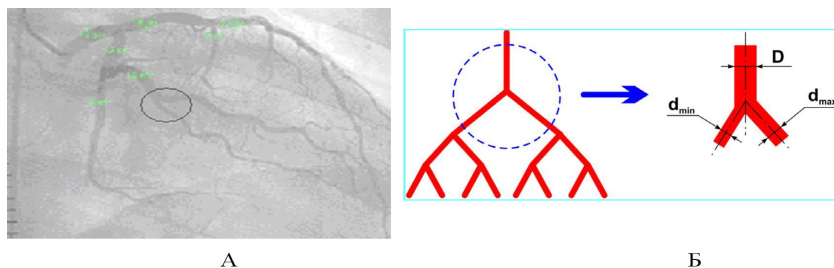


Рис. 2. А – рентгенограмма ВАСЧ, Б – схематичное представление ВАСЧ в виде взаимосвязанных АБ; на рентгенограмме (А) выделена АБ; D – диаметр материнского (проксимального) АС; $d_{\max}$ – диаметр большего дочерного (дистального) АС, $d_{\min}$ – диаметр меньшего дочерного (дистального) АС.

Fig. 2. А – X-ray image of the VASCH; Б – schematic representation of the VASCH as interconnected ABs: AB is highlighted in the X-ray image (A); D – diameter of the parent (proximal) AS; $d_{\max}$ – diameter of the larger daughter (distal) AS; $d_{\min}$ – diameter of the smaller daughter (distal) AS.

В последующем ВАСЧ рассматривали как конструкцию, состоящую из взаимосвязанных между собой АБ [17]. Для характеристики такой конструкции на основании данных морфометрии определяли величины следующих показателей: g , коэффициент асимметрии, $g=(d_{\min}/d_{\max})^2$; h , коэффициент ветвления, $h=(d_{\max}^2+d_{\min}^2)/D^2$ [3].

Статистический анализ данных включал: расчёт медианных значений, доверительных интервалов, минимальных и максимальных наблюдаемых

величин; наличие или отсутствие значимых связей между величинами исследуемых показателей полом, возрастной группой, левая или правая венечная артерия; наличие или отсутствие корреляционных связей между значениями исследуемых показателей. Для оценки характера распределения величин исследуемых показателей применялся критерий Колмогорова–Смирнова. В зависимости от характера распределения использовались либо параметрические, либо непараметрические методы анализа. Все расчёты выполнялись с применением статистического пакета R (версия 4.1).

Результаты исследования

Результаты представлены в табл. 1. Общее число измеренных АБ составило 380 шт., лиц 2-го периода зрелого возраста – 184 шт. и пожилого возраста – 196 шт.; мужчин - 289 шт. и женщин – 91 шт.; левой венечной артерии – 251 шт. и правой венечной артерии 129 шт. Проверка гипотезы на соответствие распределения величин изучаемых показателей нормальному закону распределения показала, что распределение значений D , $d_{\max}$, $d_{\min}$, h и g отличаются от нормального закона распределения.

Таблица 1.

Значения изучаемых показателей АБ ВАСЧ, по результатам морфометрии рентгенограмм

Table 1. Values of the studied indicators of AB VASCH, based on the results of X-ray morphometry

Пере- менная	Кол- во	Ме- диана	I квар- тиль	III квар- тиль	Мин.	Макс.	Лев. (95% ДИ)	Прав. (95% ДИ)
D	380	3,5	3,1	4,1	1,4	6,5	3,4	3,6
$d_{\max}$	380	3	2,5	3,6	0,8	5,5	2,9	3,1
$d_{\min}$	380	2	1,5	2,5	0,4	4,6	1,9	2,1
g	380	0,49	0,30	0,70	0,01	1	0,44	0,56
h	380	1,05	0,90	1,23	0,39	1,9	1,01	1,08

Примечание: D, диаметр материнского АС (мм); $d_{\max}$, диаметр большего дочернего АС (мм); $d_{\min}$, диаметр меньшего дочернего АС (мм); g, коэффициент асимметрии дочерних ветвей: $g=(d_{\min}/d_{\max})^2$; h, коэффициент ветвления: $h=(d_{\max}^2+d_{\min}^2)/D^2$.

Параметр D характеризует диаметры материнских артериальных сегментов (табл. 1). Максимальное его значение 6,5 мм, минимальное – 1,4 мм, медиана 3,5 мм. Выражено смещение распределения величин диаметров в сторону меньших значений. Параметр $d_{\max}$ характеризует диаметры дочерних АС, имеющих большую величину внутреннего диаметра. Максимальное его значение 5,5 мм, минимальное – 0,8 мм, медиана - 3,0 мм. Выражено смещение распределения величин диаметров в сторону

меньших значений. Параметр $d_{\min}$ характеризует диаметры дочерних АС имеющих меньшую величину внутреннего диаметра. Максимальное его значение 4,6 мм, минимальное – 0,4 мм, медиана - 2 мм. Выражено смещение распределения величин диаметров в сторону меньших значений. Анализируя величины параметров g и h , можно отметить, что их распределение смещается в сторону малых значений.

Далее была проведена проверка гипотезы о равенстве средних двух независимых выборок исследуемых показателей по данным морфометрии рентгенограмм ВАСЧ (табл. 2).

Таблица 2.

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних двух независимых выборок изучаемых показателей по данным морфометрии рентгенограмм ВАСЧ.

Table 2. Results of the test of the hypothesis that the means of two independent samples of the studied indicators, based on X-ray morphometry data of the VASCH, are equal.

Показатель	Значение исследуемого показателя АБ ВАСЧ Ме (95% ДИ)								
	Пол			Возраст			Венечная артерия		
	муж.	жен.	p	Зрелый	Пожилой	p	Левая	Правая	p
D (мм)	3,7 (3,6; 4)	3,4 (3,3; 3,6)	0,001	3,8 (3,7; 4)	3,2 (3,1; 3,3)	0,0001	3,8 (3,7; 4)	3,2 (3,1; 3,3)	0,0001
$d_{\max}$ (мм)	3,2 (3,1; 3,4)	2,9 (2,8; 3)	0,0001	3,2 (3,1; 3,4)	2,5 (2,4; 2,8)	0,001	3,2 (3,1; 3,4)	2,5 (2,4; 2,8)	0,0001
$d_{\min}$ (мм)	2,1 (2,1; 2,4)	2 (2; 2,1)	0,148	2,2 (2,1; 2,4)	1,6 (1,5; 1,8)	0,013	2,2 (2,1; 2,4)	1,6 (1,5; 1,8)	0,0001
g	0,49 (0,41; 0,58)	0,51 (0,47; 0,59)	0,497	0,50 (0,44; 0,58)	0,49 (0,37; 0,6)	0,818	0,54 (0,48; 0,6)	0,41 (0,36; 0,54)	0,034
h	1,07 (1,02; 1,11)	1,03 (1; 1,08)	0,429	1,09 (1,05; 1,14)	0,98 (0,94; 1,04)	0,801	1,09 (1,05; 1,14)	0,98 (0,94; 1,04)	0,0001

Примечание: D, диаметр материнского АС (мм); $d_{\max}$, диаметр большего дочернего АС (мм); $d_{\min}$, диаметр меньшего дочернего АС (мм); g , коэффициент асимметрии дочерних ветвей: $g=(d_{\min}/d_{\max})^2$; h , коэффициент ветвления: $h=(d_{\max}^2+d_{\min}^2)/D^2$; n, количество рентгенограмм; Ме, медиана; m, ошибка медианы; p, уровень значимости (Mann-Whitney U Test).

Установлено: величины (Ме (95% ДИ)) внутреннего диаметра D (D = 3,7 (3,6; 4) мм) и $d_{\max}$ ($d_{\max} = 3,2$ (3,1; 3,4) мм) АС составляющих АБ входящих в состав ВАСЧ лиц мужского пола значимо ($p \leq 0,001$, p – значимость отличий, здесь и далее по тексту) больше, чем у лиц женского пола: D = 3,4 (3,3; 3,6) мм и $d_{\max} = 2,9$ (2,8; 3) мм. Для значений других исследуемых показателей ($d_{\min}$, h , g) АБ ВАСЧ, принадлежащих лицам разного пола, значимых отличий обнаружено не было. Также обнаружено: величины (Ме

(95% ДИ)) D ($D = 3,8$ (3,7; 4) мм), $d_{\max}$ ($d_{\max} = 3,2$ (3,1; 3,4) мм) и $d_{\min}$ ($d_{\min} = 2,2$ (2,1; 2,4) мм) АС составляющих АБ входящих в состав ВАСЧ лиц 2-го периода зрелого возраста значимо ($p \leq 0,013$) больше, чем у лиц пожилого возраста: $D = 3,2$ (3,1; 3,3) мм, $d_{\max} = 2,5$ (2,4; 2,8) мм и $d_{\min} = 1,6$ (1,5; 1,8) мм. Для значений других исследуемых показателей (g и h) АБ ВАСЧ, принадлежащих лицам разных возрастных групп, значимых отличий обнаружено не было. Установлено наличие значимых ($p \leq 0,034$) отличий между величинами исследуемых показателей АС входящих в состав ВАСЧ левой и правой венечных артерий. Значения D , $d_{\max}$, $d_{\min}$, g и h заметно больше у АС составляющих левую венечную артерию сердца человека. Величина коэффициента асимметрии дочерних ветвей свидетельствует о том, что АБ входящие в состав левой венечной артерии сердца более «симметричны», чем в состав правой венечной артерии.

Обсуждение

Морфометрия ВАСЧ является важным направлением современной теоретической и практической кардиологии, т.к. она позволяет лучше понять патогенез ишемической болезни сердца. По данным автора работы [2] получено максимальное значение $D - 5$ мм, минимальное – 0,1 мм. Наиболее часто встречающейся величиной диаметра является 1 мм, что отличается от среднего значения 0,05 мм. Значения медианы $g=0,48$ и $h=1,05$. Имеется смещение распределения величин диаметров в сторону меньших значений. Приведенные в настоящей работе результаты морфометрии подтверждают ранее установленные закономерности и могут являться свидетельством правильности выбранной методики проведения исследования.

Одним из ключевых аспектов исследования АБ ВАСЧ является анализ половых и возрастных особенностей т.к. эти параметры оказывают значительное влияние на структуру и возможно функциональные характеристики венечных артерий, что может быть использовано для улучшения персонализированных подходов к диагностике и лечению ишемической болезни сердца [14; 20].

В работе [27] приведены результаты исследования 167 русел ВАСЧ: 109 мужчин $60,61 \pm 10,85$ лет и 58 женщин $64,28 \pm 10,19$ лет. Обнаружили, что средние диаметры венечных артерий (левой и правой) составили $2,87 \pm 0,37$ мм; $4,12 \pm 0,68$ мм – левой венечной; $2,26 \pm 0,41$ мм – левой нисходящей; $2,14 \pm 0,43$ мм – левой огибающей; $2,95 \pm 0,60$ мм – правой венечной артерии. Для мужчин эти значения составили $2,88 \pm 0,37$ мм – венечные артерии (левая и правая); $4,11 \pm 0,71$ мм - левой венечной; $2,30 \pm 0,42$ мм - левой

нисходящей; $2,13 \pm 0,44$ мм – левой огибающей; $2,96 \pm 0,60$ мм – правой венечной артерии. А для женщин эти значения составили $2,86 \pm 0,37$ мм – венечные артерии (левая и правая); $4,14 \pm 0,63$ мм – левой венечной; $2,19 \pm 0,39$ мм – левой нисходящей; $2,18 \pm 0,42$ мм – левой огибающей; $2,93 \pm 0,60$ мм – правой венечной артерии. Не было обнаружено значимых различий в среднем общем диаметре и средних диаметрах отдельных венечных артерий между мужчинами и женщинами.

В работе [9] приведены несколько иные данные. На основании морфометрии 83 ангиограмм (60 мужчин и 10 женщин) определено, что внутренний диаметр левой венечной артерии равен $4,5 \pm 0,5$ мм, передней нисходящей – $3,7 \pm 0,4$ мм, правой венечной артерии – от $3,9 \pm 0,6$ до $2,8 \pm 0,5$ мм, левой огибающей – от $3,4 \pm 0,5$ до $4,2 \pm 0,6$ мм. У женщин диаметр эпикардиальных артерий был меньше, чем у мужчин. Установлена связь между величиной начального диаметра и общей длиной артерии. Значение диаметра просвета не связано с возрастом или извилистостью артерии, но значительно увеличивается среди мужчин с гипертрофией левого желудочка или дилатационной кардиомиопатией.

Пол является важным фактором, влияющим на морфометрию коронарных артерий. Исследования показывают, что мужчины имеют больший диаметр коронарных артерий по сравнению с женщинами. Например, средний диаметр левой передней нисходящей артерии составил $1,81 \pm 0,28$ мм для мужчин и $1,70 \pm 0,26$ мм для женщин ($p < 0,0001$) [23]. Аналогичные различия наблюдались и для других венечных артерий, таких как огибающая артерия и правая коронарная артерия. Эти данные согласуются с гипотезой о том, что величина площади поверхности тела связана с размерами сосудов: у мужчин площадь поверхности тела значимо ($p < 0,0001$) больше ($1,9 \pm 0,2$ м²) чем у женщин $1,7 \pm 0,3$ м². Однако, эти гендерные различия исчезают у пациентов старше 65 лет, что указывает на изменение характера поражений ВАСЧ с возрастом [26]. Приведенные данные согласуются с полученными нами результатами морфометрии ВАСЧ.

Авторами работы [21] были проанализированы результаты морфометрии 18 венечных артерий, включая левую переднюю нисходящую ($n = 19$) у 7 пациентов, левую огибающую ($n = 8$) у 3 пациентов и правую венечную артерию ($n = 23$) у 8 пациентов. Установлено, что в месте отхождения венечных артерий их внутренний диаметр составлял $3,08 \pm 0,43$ мм.

В работе [1] показано, что для правой венечной артерии в начальном и среднем отделе величины внутреннего диаметра варьируют от 5 до 4 мм; для задней межжелудочковой – от 3,2 до 1,8 мм; для левой венечной – от

5,1 до 3,8 мм; для передней межжелудочковой - от 4,2 до 2,5 мм; для огибающей - от 3,2 до 2,5 мм; для латеральной - от 2,3 до 2,6 мм. Статистически значимые различия присущи показателям большинства изученных сосудов в таких сериях исследования, как возраст, форма сердца, форма телосложения. Сравнительная характеристика внутреннего диаметра для каждой из исследованных артерий свидетельствует о том, что в сравниваемых группах отдельных серий существенных различий нет.

В фундаментальной работе Лежниной О.Ю. [5] выявлена выраженная возрастная изменчивость коронарного русла с преимущественным уменьшением значений общего просвета, доли суммарного продольного сечения и коэффициента расширения у пожилых людей по сравнению со вторым периодом зрелого возраста. Установлена вариабельность коронарного русла при различных вариантах ветвлений венечных артерий в норме, проявляющаяся в превышении общего просвета ветвей правой венечной артерии при правовенечном варианте в обоих возрастных периодах, левой венечной артерии – у людей второго периода зрелого возраста при левовенечном варианте, а в пожилом возрасте – на сердцах с равномерным вариантов ветвления.

Накопленный фактический материал нуждается в теоретическом осмыслении. В этом смысле, большинство научных работ посвященных объяснению морфометрических закономерностей АБ ВАСЧ основаны на фундаментальном принципе биологии, описанном в 1926 году (закон Муггау С.Д.) и связывающим морфологию и функцию АБ [17]. В его основе лежит принцип «минимальной работы», необходимой для обеспечения оптимальной циркуляции крови – минимальных затрат энергии необходимой для преодоления вязкого трения при движении через АБ и материала для ее построения. Исследователи считали, что данный закон справедлив для системы ВАСЧ (эпикардальных и трансмуральных), структурным элементом, которых является АБ. Считается, что основной задачей АБ является транспорт крови [8]. Однако, это утверждение, по всей видимости, верное для проксимальных сегментов ВАСЧ, контрастирует с перфузирующими сосудами дистального отдела, где быстрое увеличение площади поперечного сечения (т.е. показателя увеличения общего диаметра, суммы диаметров всех АС одного уровня (поколения)) способствует замедлению кровотока и эффективному субстратному обмену [13; 16].

Uyilings Н.В.М. в своей статье [24] приводит расчетные данные о том, что величина коэффициент ветвления у «оптимальных» («нормальных») АБ должна находиться в пределах $1,10 \leq \eta \leq 1,26$. Относительное количе-

ство АБ, удовлетворяющих данному критерию «оптимальности», составляет 19% от общего количества исследованных АБ ВАСЧ. Также было установлено, что относительное количество «оптимальных» АБ, в соответствии с критерием Uytings H.B.M., в составе ВАСЧ первой группы - лица мужского пола (20%), второго периода зрелого возраста (20%), русло левой венечной артерии (20%) больше, чем в составе второй группы - лица женского пола (18%), пожилого возраста (16%) и русло правой венечной артерии (16%). Формально получается, что АБ ВАСЧ входящие в состав 1-й группы более «оптимальны», чем АБ ВАСЧ, составляющие 2-ю группу, если следовать закону Murray C.D. Однако, трудно представить себе работу структуры на 76-80% состоящей из «неоптимальных» структурно-функциональных единиц. Это ставит под сомнение универсальность закона Murray C.D.

Действительно авторы работ [3, 4] приводят убедительные свидетельства, того, что АБ кроме проведения крови еще выполняют функции ее распределения и опоры т.е. составляют мягкий скелет органа. Следует также отметить, что в большинстве исследований в качестве морфометрической характеристики АБ рассматривают только соотношения внутренних диаметров АС ее составляющих и не учитывают длины АС. Однако, судить о гемодинамике внутри АБ и других ее вышеперечисленных функциях, не зная длин АС неправильно. Это, в определенной степени, объясняет приведенные в предыдущих исследованиях морфометрические данные.

Заключение

В ходе исследования путем ретроспективного анализа рентгенограмм ВАСЧ лиц разного пола, второго периода зрелого и пожилого возраста установлен ряд морфометрических закономерностей соотношений внутренних диаметров АС составляющих АБ. Представленные данные свидетельствуют о необходимости дальнейших морфометрических исследований ВАСЧ, ревизии закона Murray C.D. и разработки универсальной объединяющей теории строения и функционирования АБ.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Информация о спонсорстве. Данное исследование выполнено при поддержке «Ректорские гранты для молодых кандидатов наук и аспирантов» (грантополучатель: Сергиенко А.А., 2025 г.).

Список литературы

1. Горячева, И. А. (2012). *Вариантная анатомия венечных артерий и их основных ветвей у взрослого человека* [Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук]. Санкт-Петербург. 22 с. EDN: <https://elibrary.ru/QIJCIB>
2. Зенин, О. К. (2005). *Морфофункциональные принципы организации артериального русла большого круга кровообращения* [Диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук]. Донецк. 468 с.
3. Зенин, О. К., Оверко, В. С., Дмитриев, А. В., & Милтых, И. С. (2021). Особенности гемодинамики в структурно-различных внутриорганных артериальных бифуркациях сердца человека, выявляемые с помощью численного моделирования. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(2), 11–31. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-2-11-31>. EDN: <https://elibrary.ru/XXEIBW>
4. Кафаров, Э. С., Дмитриев, А. В., Зенин, О. К., Муйземнек, А. Ю., & Хвастунов, И. С. (2020). Влияние формы различных по структуре типов артериальных дихотомий почки на их биомеханические свойства. *Морфология*, 157(2–3), 96. EDN: <https://elibrary.ru/VVKGpz>
5. Лежнина, О. Ю. (2020). *Ангиоархитектоника коронарного русла сердца людей второго периода зрелого и пожилого возраста* [Диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук]. ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации. Волгоград. 339 с. EDN: <https://elibrary.ru/XYHWHX>
6. Эралиев, Т. К., Хелимский, Д. А., Бадоян, А. Г., & Крестьянинов, О. В. (2021). Бифуркационные поражения коронарного русла: современные техники эндоваскулярного лечения. *Патология кровообращения и кардиохирургия*, 25(2), 38–49. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2021-2-38-49>. EDN: <https://elibrary.ru/CBOUIL>
7. Arnett, D. K., et al. (2019). ACC/AHA guideline on the primary prevention of cardiovascular disease: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines. *Journal of the American College of Cardiology*, 74(10), e177–e232. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000677>
8. Dhungana, A., Buradi, A., Dahal, P., & Bora, B. J. (2023). Impact of bifurcation and bifurcation angle on the hemodynamics of coronary arteries. B S. Bhattacharyya, S. Verma, & A. R. Harikrishnan (Eds.), *Fluid mechanics and fluid power (Vol. 3). FMFP 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (с. 55–64). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6270-7_6
9. Dodge, J. T., Brown, B. G., Bolson, E. L., & Dodge, H. T. (1992). Lumen diameter of normal human coronary arteries: Influence of age, sex, anatomic variation,

- and left ventricular hypertrophy or dilation. *Circulation*, 86, 232–246. <https://doi.org/10.1161/01.cir.86.1.232>
10. Fuenzalida, J. J. V., et al. (2024). Anatomical variants of the origin of the coronary arteries: A systematic review and meta-analysis of prevalence. *Diagnostics*, 14, 1458. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14131458>. EDN: <https://elibrary.ru/WPKJII>
 11. Gharleghi, R., et al. (2025). Assessing left main bifurcation anatomy and haemodynamics as a potential surrogate for disease risk in suspected coronary artery disease without stenosis. *Scientific Reports*, 15(1), 254. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73490-w>. EDN: <https://elibrary.ru/PCGTOL>
 12. Gitmez, M., & Mumcu, A. (2024). Quantitative analysis of right coronary artery morphology by digital subtraction angiography. *Medicine Science*, 13(1), 159–164. <https://doi.org/10.5455/medscience.2023.12.239>. EDN: <https://elibrary.ru/LYIBNP>
 13. Kassab, G. S. (2005). Functional hierarchy of coronary circulation: Direct evidence of a structure-function relation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 289(6), H2559–H2565. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00561.2005>
 14. Lima Dos Santos, C. C., et al. (2023). The influence of sex, age, and race on coronary artery disease: A narrative review. *Cureus*, 15(10), e47799. <https://doi.org/10.7759/cureus.47799>. EDN: <https://elibrary.ru/VFTNGL>
 15. Malik, T. F., & Tivakaran, V. S. (2022). *Percutaneous transluminal coronary angioplasty: An overview*. StatPearls Publishing. PMID: 30571038.
 16. Menon, K., et al. (2024). Personalized coronary and myocardial blood flow models incorporating CT perfusion imaging and synthetic vascular trees. *npj Imaging*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.1038/s44303-024-00014-6>. EDN: <https://elibrary.ru/IJMNSW>
 17. Murray, C. D. (1926). The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries. *The Journal of General Physiology*, 9(6), 835–841. <https://doi.org/10.1085/jgp.9.6.835>
 18. Namani, R., Lanir, Y., Lee, L. C., & Kassab, G. S. (2020). Overview of mathematical modeling of myocardial blood flow regulation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 318(4), H966–H975. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00563.2019>. EDN: <https://elibrary.ru/SWKCPB>
 19. Neumann, F. J., et al. (2019). ESC/EACTS guidelines on myocardial revascularization. *European Heart Journal*, 40(2), 87–165. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy394>. EDN: <https://elibrary.ru/FJGHSH>
 20. Nouraei, H., et al. (2025). Variations of the extent of obstructive coronary artery disease among Canadian immigrants. *Journal of the American Heart Association*, 14(9), e037534. <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.037534>. EDN: <https://elibrary.ru/ZWYYPV>
 21. Sinha, A.-M., et al. (2006). Multidetector-row computed tomography vs. angiography and intravascular ultrasound for the evaluation of the diameter of proximal

- coronary arteries. *International Journal of Cardiology*, 110(1), 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2005.07.011>
22. Taylor, D. J., et al. (2024). A systematic review and meta-analysis of Murray's Law in the coronary arterial circulation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 327(1), H182–H190. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00142.2024>. EDN: <https://elibrary.ru/IFGHNH>
23. Urbanowicz, T., et al. (2021). Gender differences in coronary artery diameters and survival results after off-pump coronary artery bypass (OPCAB) procedures. *Journal of Thoracic Disease*, 13(5), 2867–2873. <https://doi.org/10.21037/jtd-20-3356>. EDN: <https://elibrary.ru/XJNUCC>
24. Uylings, H. B. M. (1977). Optimization of diameters and bifurcation angles in lung and vascular tree structures. *Bulletin of Mathematical Biology*, 39(5), 509–520. <https://doi.org/10.1007/BF02461198>
25. Vidhale, D., et al. (2024). Variation in the branching pattern of the coronary artery: A systematic review on anatomical branching variation. *Research in Cardiovascular Medicine*, 13(3), 67–74. https://doi.org/10.4103/rcm.rcm_30_22. EDN: <https://elibrary.ru/SAMRDZ>
26. Wong, J. J., Hong, R., Teo, L. L. Y., Tan, R. S., & Koh, A. S. (2024). Atherosclerotic cardiovascular disease in aging and the role of advanced cardiovascular imaging. *npj Cardiovascular Health*, 1, 11. <https://doi.org/10.1038/s44325-024-00012-y>. EDN: <https://elibrary.ru/KFOSJL>
27. Zhou, F.-F., et al. (2017). Coronary artery diameter is inversely associated with the severity of coronary lesions in patients undergoing coronary angiography. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 43, 1247–1257. <https://doi.org/10.1159/000481765>

References

1. Goryacheva, I. A. (2012). *Variant anatomy of the coronary arteries and their main branches in adults* [Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Medical Sciences]. Saint Petersburg. 22 p. EDN: <https://elibrary.ru/QIJCIB>
2. Zenin, O. K. (2005). *Morphofunctional principles of the organization of the arterial bed of the systemic circulation* [Dissertation for the degree of Doctor of Medical Sciences]. Donetsk. 468 p.
3. Zenin, O. K., Overko, V. S., Dmitriev, A. V., & Milytkh, I. S. (2021). Features of hemodynamics in structurally different intraorgan arterial bifurcations of the human heart detected by numerical modeling. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(2), 11–31. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-2-11-31>. EDN: <https://elibrary.ru/XXEIWB>
4. Kafarov, E. S., Dmitriev, A. V., Zenin, O. K., Muizemnek, A. Yu., & Khvastunov, I. S. (2020). The influence of the shape of structurally different types of arterial di-

- chotomies of the kidney on their biomechanical properties. *Morphology*, 157(2–3), 96. EDN: <https://elibrary.ru/VVKGPZ>
5. Lezhnina, O. Yu. (2020). *Angioarchitectonics of the coronary bed of the heart in people of the second period of adulthood and old age* [Dissertation for the degree of Doctor of Medical Sciences]. Volgograd State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation. Volgograd. 339 p. EDN: <https://elibrary.ru/XYHWXH>
 6. Eraliev, T. K., Khelimsky, D. A., Badoian, A. G., & Krestyaninov, O. V. (2021). Bifurcation lesions of the coronary bed: Modern techniques of endovascular treatment. *Pathology of Blood Circulation and Cardiac Surgery*, 25(2), 38–49. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2021-2-38-49>. EDN: <https://elibrary.ru/CBOUIL>
 7. Arnett, D. K., et al. (2019). ACC/AHA guideline on the primary prevention of cardiovascular disease: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines. *Journal of the American College of Cardiology*, 74(10), e177–e232. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000677>
 8. Dhungana, A., Buradi, A., Dahal, P., & Bora, B. J. (2023). Impact of bifurcation and bifurcation angle on the hemodynamics of coronary arteries. In S. Bhattacharyya, S. Verma, & A. R. Harikrishnan (Eds.), *Fluid mechanics and fluid power (Vol. 3). FMFP 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 55–64). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6270-7_6
 9. Dodge, J. T., Brown, B. G., Bolson, E. L., & Dodge, H. T. (1992). Lumen diameter of normal human coronary arteries: Influence of age, sex, anatomic variation, and left ventricular hypertrophy or dilation. *Circulation*, 86, 232–246. <https://doi.org/10.1161/01.cir.86.1.232>
 10. Fuenzalida, J. J. V., et al. (2024). Anatomical variants of the origin of the coronary arteries: A systematic review and meta-analysis of prevalence. *Diagnostics*, 14, 1458. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14131458>. EDN: <https://elibrary.ru/WPKJII>
 11. Gharlegghi, R., et al. (2025). Assessing left main bifurcation anatomy and haemodynamics as a potential surrogate for disease risk in suspected coronary artery disease without stenosis. *Scientific Reports*, 15(1), 254. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73490-w>. EDN: <https://elibrary.ru/PCGTOL>
 12. Gitmez, M., & Mumcu, A. (2024). Quantitative analysis of right coronary artery morphology by digital subtraction angiography. *Medicine Science*, 13(1), 159–164. <https://doi.org/10.5455/medscience.2023.12.239>. EDN: <https://elibrary.ru/LYIBNP>
 13. Kassab, G. S. (2005). Functional hierarchy of coronary circulation: Direct evidence of a structure-function relation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 289(6), H2559–H2565. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00561.2005>

14. Lima Dos Santos, C. C., et al. (2023). The influence of sex, age, and race on coronary artery disease: A narrative review. *Cureus*, 15(10), e47799. <https://doi.org/10.7759/cureus.47799>. EDN: <https://elibrary.ru/VFTNGL>
15. Malik, T. F., & Tivakaran, V. S. (2022). *Percutaneous transluminal coronary angioplasty: An overview*. StatPearls Publishing. PMID: 30571038.
16. Menon, K., et al. (2024). Personalized coronary and myocardial blood flow models incorporating CT perfusion imaging and synthetic vascular trees. *npj Imaging*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.1038/s44303-024-00014-6>. EDN: <https://elibrary.ru/IJMNSW>
17. Murray, C. D. (1926). The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries. *The Journal of General Physiology*, 9(6), 835–841. <https://doi.org/10.1085/jgp.9.6.835>
18. Namani, R., Lanir, Y., Lee, L. C., & Kassab, G. S. (2020). Overview of mathematical modeling of myocardial blood flow regulation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 318(4), H966–H975. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00563.2019>. EDN: <https://elibrary.ru/SWKCPB>
19. Neumann, F. J., et al. (2019). ESC/EACTS guidelines on myocardial revascularization. *European Heart Journal*, 40(2), 87–165. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy394>. EDN: <https://elibrary.ru/FJGHSH>
20. Nouraei, H., et al. (2025). Variations of the extent of obstructive coronary artery disease among Canadian immigrants. *Journal of the American Heart Association*, 14(9), e037534. <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.037534>. EDN: <https://elibrary.ru/ZWYYPV>
21. Sinha, A.-M., et al. (2006). Multidetector-row computed tomography vs. angiography and intravascular ultrasound for the evaluation of the diameter of proximal coronary arteries. *International Journal of Cardiology*, 110(1), 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2005.07.011>
22. Taylor, D. J., et al. (2024). A systematic review and meta-analysis of Murray's Law in the coronary arterial circulation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 327(1), H182–H190. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00142.2024>. EDN: <https://elibrary.ru/IFGHNH>
23. Urbanowicz, T., et al. (2021). Gender differences in coronary artery diameters and survival results after off-pump coronary artery bypass (OPCAB) procedures. *Journal of Thoracic Disease*, 13(5), 2867–2873. <https://doi.org/10.21037/jtd-20-3356>. EDN: <https://elibrary.ru/XJNUCC>
24. Uyilings, H. B. M. (1977). Optimization of diameters and bifurcation angles in lung and vascular tree structures. *Bulletin of Mathematical Biology*, 39(5), 509–520. <https://doi.org/10.1007/BF02461198>
25. Vidhale, D., et al. (2024). Variation in the branching pattern of the coronary artery: A systematic review on anatomical branching variation. *Research in Cardiovascu-*

- lar Medicine*, 13(3), 67–74. https://doi.org/10.4103/rcm.rcm_30_22. EDN: <https://elibrary.ru/SAMRDZ>
26. Wong, J. J., Hong, R., Teo, L. L. Y., Tan, R. S., & Koh, A. S. (2024). Atherosclerotic cardiovascular disease in aging and the role of advanced cardiovascular imaging. *npj Cardiovascular Health*, 1, 11. <https://doi.org/10.1038/s44325-024-00012-y>. EDN: <https://elibrary.ru/KFOSJL>
27. Zhou, F.-F., et al. (2017). Coronary artery diameter is inversely associated with the severity of coronary lesions in patients undergoing coronary angiography. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 43, 1247–1257. <https://doi.org/10.1159/000481765>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Дмитриев Андрей Викторович, д-р мед. наук, заведующий отделением рентгенэндоваскулярной хирургии

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака»

Российская Федерация

пр. Ленинский, 47, г. Донецк, ДНР, 283045, Российская Федерация

info@iursdn.ru

Сергиенко Анна Альбертовна, аспирант кафедры «Анатомия человека»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет»

ул. Красная, 40, г. Пенза, 440026, Российская Федерация

anya.gurieva00@mail.ru

Милтых Илья Сергеевич, магистрант

Университет Палермо (Università degli Studi di Palermo)

Палермо, Италия

contact@miltykh.com

Зенин Олег Константинович, д-р мед. наук, профессор кафедры «Анатомия человека»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет»

ул. Красная, 40, г. Пенза, 440026, Российская Федерация

zen.oleg@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Dmitriev, Dr. Sc. (Medicine), Head of the Department of Endovascular Surgery

V.K. Gusak Institute of Emergency and Reconstructive Surgery

47, Leninskiy pr., Donetsk, 283045, Russian Federation

info@iursdn.ru

SPIN-code: 2999-1326

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0753-7586>

Scopus Author ID: 57299237600

Anna A. Sergienko, Postgraduate

Penza State University

40, Krasnaya Str., Penza, 440026, Russian Federation

anya.gurieva00@mail.ru

SPIN-code: 9391-0899

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1380-8767>

Ilia S. Miltykh, Graduate student

University of Palermo

Palermo, Italy

contact@miltykh.com

SPIN-code: 9363-6873

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9130-3255>

ResearcherID: AFO-0934-2022

Scopus Author ID: 57299786900

Oleg K. Zenin, Dr. Sc. (Medicine), Professor of Human anatomy

Penza State University

40, Krasnaya Str., Penza, 440026, Russian Federation

SPIN-code: 3159-1346

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5447-1989>

ResearcherID: O-7965-2015

Scopus Author ID: 57198085128

Поступила 06.06.2025

После рецензирования 01.09.2025

Принята 07.09.2025

Received 06.06.2025

Revised 01.09.2025

Accepted 07.09.2025

Здравоохранение и профилактическая медицина / Public Health and Preventive Medicine

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1428](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1428)

EDN: [MYYUNR](https://www.edn.ru/YYUNR)

УДК 004.043:004.8:004.912:614.27.007:615.12



Формирование модели отклика на мультиканальные коммуникации в аптечной организации

А.С. Пантелеев¹, Ж.В. Мироненкова¹, Л.М. Габдулхакова²

¹Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Систематический сбор и анализ данных о потребителях является неотъемлемой частью целевого маркетинга, способствует повышению конкурентоспособности аптечных организаций на рынке и является актуальным.

Цель исследования – разработка алгоритмов при формировании модели отклика на мультиканальные коммуникации в аптечной организации.

Материалы и методы. Материалами исследования являлись истории транзакций потребителей из CRM-систем при покупках товаров в 1121 розничной аптечной организации, расположенных в 8 федеральных округах Российской Федерации, относящихся к аптечным сетям «Озерки», «Доктор Столетов», «Самсон-Фарма», «Супераптека», «Мосаптека» в 2018-2023 гг. Анализ коммуникаций потребителей, несклонных к прекращению покупок, проводился с учетом историй транзакций и данных участия в программах лояльности, предполагающих применение скидок и бонусов. Объем транзакций потребителей - не менее 5, интервал между покупками - в среднем не более 150 дней. Методы исследований: статистическое наблюдение, расчет средних величин, сегментирование, алгоритмы искусственного интеллекта (ML), прогнозирование, вероятностное распределение.

Результаты. Спрогнозированы максимальные коэффициенты вероятности отклика на СМС-сообщения (0,15), сообщения по электронной почте (0,07) и push-уведомления (0,01). Для СМС-сообщений и сообщений по электронной почте наиболее высокие усредненные показатели конверсий отклика в покупку CR наблюдались в воскресенье, уровня расходов потребителей LTV - в субботу; для

push-уведомлений - в воскресенье и пятницу соответственно. Усредненные показатели максимальных количеств коммуникаций с потребителями были выявлены для СМС-сообщений - в субботу, для сообщений по электронной почте и push-уведомлений - в среду.

Выявлены закономерности по оптимальным дням недели: для конверсии отклика в покупку в мультиканальных коммуникациях - воскресенье, для получения максимальных финансовых показателей - суббота, за исключением push-уведомлений (пятница). Наиболее результативным каналом для коммуникаций являлись СМС-сообщения, которые имели наилучшие соотношения между конверсией отклика в покупку и LTV. Ранее проведенное моделирование вероятности отклика потребителей по каналам коммуникаций с учетом дня недели позволило существенно улучшить показатели CR, LTV, количество посещений в выходные дни. СМС-сообщения, имевшие максимальный коэффициент вероятности отклика 0,15, остались наиболее результативным каналом для коммуникаций. Оптимизация каналов коммуникаций с потребителями по дням недели с акцентом на синхронизацию периодов максимальной активности с периодами наибольшей результативности может дать значительный рост ключевых показателей, более результативное использование маркетингового бюджета аптечной организации.

Ключевые слова: мультиканальные коммуникации; СМС-сообщения; электронная почта; push-уведомления; конверсия отклика в покупку CR; LTV; аптечная организация

Для цитирования. Пантелеев, А. С., МIRONENKOVA, Ж. В., & Габдулхакова, Л. М. (2026). Формирование модели отклика на мультиканальные коммуникации в аптечной организации. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 334–351. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1428>

Forming a model of response to multichannel communications in a pharmacy

A.S. Panteleev¹, J.V. Mironenkova¹, L.M. Gabdulkhakova²

¹St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University,
St. Petersburg, Russian Federation

²Bashkir State Medical University, Ufa, Russian Federation

Abstract

Background. Systematic collection and analysis of consumer data is an integral part of targeted marketing, contributes to increasing the competitiveness of pharmacy organizations in the market, and is relevant.

Purpose. Development of algorithms for creating a response model for multichannel communications in a pharmacy organization.

Materials and methods. The study materials included consumer transaction histories from CRM systems when purchasing goods from 1,121 retail pharmacy organizations located in 8 federal districts of the Russian Federation, which belong to the pharmacy chains Ozerki, Doctor Stoletov, Samson-Pharma, Superapteka, and Mosapteka in 2018-2023. The analysis of communications from consumers who are not inclined to stop shopping was conducted based on transaction histories and data from loyalty programs that offer discounts and bonuses. The volume of consumer transactions is at least 5, and the average interval between purchases is no more than 150 days. Research methods include statistical observation, calculation of average values, segmentation, artificial intelligence (ML) algorithms, forecasting, and probabilistic distribution.

Results. The maximum response rates for SMS messages (0.15), email messages (0.07), and push notifications (0.01) have been predicted. For SMS and email messages, the highest average conversion rates for CR and LTV were observed on Sunday, while for push notifications, they were observed on Sunday and Friday, respectively. The average maximum number of communications with consumers was identified for SMS messages on Saturday, and for email messages and push notifications on Wednesday.

The optimal days of the week have been identified: Sunday for converting responses into purchases in multichannel communications, and Saturday for achieving maximum financial results, with the exception of push notifications (Friday). The most effective communication channel was SMS messages, which had the best ratio between conversion rate and LTV. Previously, modeling the probability of consumer response by communication channel, taking into account the day of the week, significantly improved CR, LTV, and weekend visits. SMS messages, which had a maximum response probability coefficient of 0.15, remained the most effective communication channel. Optimizing communication channels with consumers by day of the week, with a focus on synchronizing periods of maximum activity with periods of greatest effectiveness, can lead to significant improvements in key performance indicators and more efficient use of the pharmacy organization's marketing budget.

Keywords: multichannel communications; SMS messages; email; push notifications; conversion of response into a purchase CR; LTV; pharmacy

For citation. Panteleev, A. S., Mironenkova, J. V., & Gabdulkhakova, L. M. (2026). Forming a model of response to multichannel communications in a pharmacy. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 334–351. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1428>

Введение

Фармацевтическая отрасль требует особого внимания к анализу больших массивов данных, на основе которых можно извлечь информацию, необходи-

мую для принятия обоснованных решений в целевом маркетинге [5; 6; 9; 17]. В аптечных организациях (АО) данные о покупках товаров аптечного ассортимента (ТАА) играют центральную роль, так как они формируют представление о текущих тенденциях рынка [8; 22; 24]. Сбор данных осуществляется с применением программно-аппаратных комплексов для автоматизации торговых операций (POS системы, Point of Sale), которые автоматически регистрируют каждую транзакцию в пунктах продаж ТАА [12; 16]. Данные о покупках дополняются информацией по покупкам на онлайн-платформах АО. Сбор данных о потребителях ТАА - ключевой этап в целевом маркетинге АО [1; 2; 5; 20]. Источниками информации служат различные каналы взаимодействия: при регистрации в программе лояльности, при оформлении заказов онлайн, при прямом общении в процессе покупки ТАА [23]. Анализ данных о потребителях помогает АО предлагать персонализированные решения, которые могут значительно увеличить уровень удовлетворенности потребителей и их вовлеченность [3; 4; 10; 11]. Научные исследования, направленные на формирование моделей целевого маркетинга на основе анализа предпочтений и поведения потребителей, помогают определять наиболее подходящие каналы коммуникации и моменты для проведения рекламных акций, что позволяет предвидеть и предотвращать возможный отток потребителей, предлагая им своевременно более выгодные условия покупок ТАА [7; 14; 21]. Систематический сбор и анализ больших массивов данных способствует повышению конкурентоспособности АО [13; 15; 18; 19]. Вышеизложенное обусловило актуальность проведенного нами комплексного исследования.

Цель исследования – разработка алгоритмов при формировании модели отклика на мультиканальные коммуникации в аптечной организации.

Материалы и методы

Материалами исследования являлись истории транзакций потребителей из CRM-систем при покупках товаров в 1121 розничной аптечной организации, расположенных в 8 федеральных округах Российской Федерации, относящихся к аптечным сетям «Озерки», «Доктор Столетов», «Самсон-Фарма», «Супераптека», «Мосаптека» в 2018-2023 гг. Данные аптечные сети входят в группу компаний «Эркафарм», которая включена в перечень системообразующих организаций Российской Федерации, являясь критической товаропроводящей инфраструктурой. Анализ коммуникаций потребителей, несклонных к прекращению покупок, проводился с учетом историй транзакций и данных участия в программах лояльности, предполагающих применение скидок и бонусов. Результативность коммуникаций АО с потребителями

рассчитывалась как показатель конверсии отклика на СМС-сообщения/сообщения по электронной почте/push-уведомления в покупку CR (conversion rate). Показатель конверсии отклика на СМС-сообщения/сообщения по электронной почте/push-уведомления в покупку рассчитан по формуле (2):

$$CR = \frac{m}{n} \quad (2), \quad \text{где } m - \text{число потребителей, совершивших покупку;} \\ n - \text{число потребителей, вовлеченных в маркетинговое взаимодействие (СМС-сообщения/сообщения по электронной почте/push-уведомления).}$$

Пожизненная ценность клиента (Lifetime Value, LTV) представляет собой показатель, отражающий совокупный доход, полученный АО от одного потребителя. LTV рассчитывался как произведение среднего чека, средней частоты покупок, средней продолжительности взаимодействия с потребителем.

Был проведен анализ зависимости конверсии отклика на мультимедийной коммуникации в покупку CR от уровня расходов потребителей LTV. Для проверки корректности прогноза рассчитана конверсия отклика на мультимедийной коммуникации по дням недели.

Анализ коммуникаций потребителей проводился с учетом историй транзакций и данных участия в программах лояльности, предполагающих применение скидок и бонусов. Объем транзакций - не менее 5, с интервалом между покупками - в среднем не более 150 дней. Сегментирование данных фактических средних денежных расходов потребителей на товары аптечного ассортимента по квартилям в 2024 г. было проведено таким образом, что к квартилю 1 (Q1, 5 значений) нами было отнесено ниже 25% данных, к квартилю 2 (Q2, 6 значений) - ниже 50% данных (медиана), к квартилю 3 (Q3, 6 значений) - ниже 75% данных, к квартилю 4 (Q4, 5 значений) - остальные данные. Коэффициент конверсии позволил оценить насколько эффективно мультимедийной коммуникации побуждали пользователей к покупке. Высокий коэффициент конверсии указывает на то, что маркетинговые кампании АО успешны, потребители положительно реагируют на сообщения и уведомления. Исследование проводилось среди потребителей, несклонных к прекращению покупок, в период в 2018-2024 гг. с целью формирования модели отклика на мультимедийной коммуникации.

Для проведения исследования были смоделированы с применением алгоритмов искусственного интеллекта расходы потребителей ТАА на 2024 г. на основе данных предыдущих периодов 2019-2023 гг. Точность прогноза рассчитана с учетом разделения данных по фактическим средним денежным расходам потребителей на ТАА ввиду разной степени предсказуемости прогноза и необходимости применять методы, учитывающие нелинейный

рост расходов в сегменте крупных расходов. Выбор наиболее результативных каналов коммуникаций осуществлялся путем моделирования сценариев взаимодействия, что способствовало росту конверсии отклика.

В ходе исследования для решения поставленной цели проведено моделирование вероятности отклика на мультиканальные взаимодействия. Проведен анализ прогнозируемых и фактических данных по объемам транзакций потребителей ТАА с учетом дня недели и часа отправки СМС-сообщения, сообщения по электронной почте, push-уведомления.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью специализированных компьютерных программ: данные по транзакциям были собраны из системы управления базами данных (СУБД) через sqlalchemy (sql server) - pd.read_sql; обработка и хранение данных осуществлялось в pd.read_feather; добавление данных проводилось через requests, selenium, urllib (+ BeautifulSoup); препроцессинг данных - с применением библиотеки pandas и numpy, difflib, pymystem3, sklearn, networkx, re, timezonefinder. Визуализация проводилась на базе plotly, seaborn, matplotlib, shap; моделирование осуществлялось на sklearn, xgboost, catboost, scipy и рекомендательные алгоритмы (implicit, lightfm, surprise).

Проведение исследования одобрено решением заседания группы компаний «Эркафарм». По результатам исследований в аптечных сетях ведущими специалистами подписаны акты внедрений результатов научной работы.

Результаты и обсуждение

В условиях повышенной конкуренции на фармацевтическом рынке продвижение ТАА с применением мультиканальных коммуникаций является необходимым инструментом повышения прибыли в аптечных организациях (АО). На базе данных о расходах потребителей за 2019-2023 г. для проведения маркетинговой кампании 2024 г. были рассмотрены варианты персонализированных предложений, направленных на интенсификацию взаимодействий с потребителями ТАА. Рассчитаны показатели, необходимые для выявления лучших параметров предложений и коммуникаций, а именно: канал коммуникации (СМС-сообщения, сообщения по электронной почте, push-уведомления) и время коммуникации (день недели + час отправки).

В ходе исследования для решения поставленной цели проведено моделирование вероятности отклика на мультиканальные взаимодействия, а также проанализированы расхождения в прогнозируемых и фактических результатах с учетом дня недели. На основе статистического анализа спрогнозировано, что для АО в любой день недели самым результативным каналом коммуникаций будут СМС-сообщения (максимальный коэффициент веро-

ятности отклика 0,15), далее в порядке снижения результативности - сообщения по электронной почте (0,07) и push-уведомления (0,01; Рисунок 1).

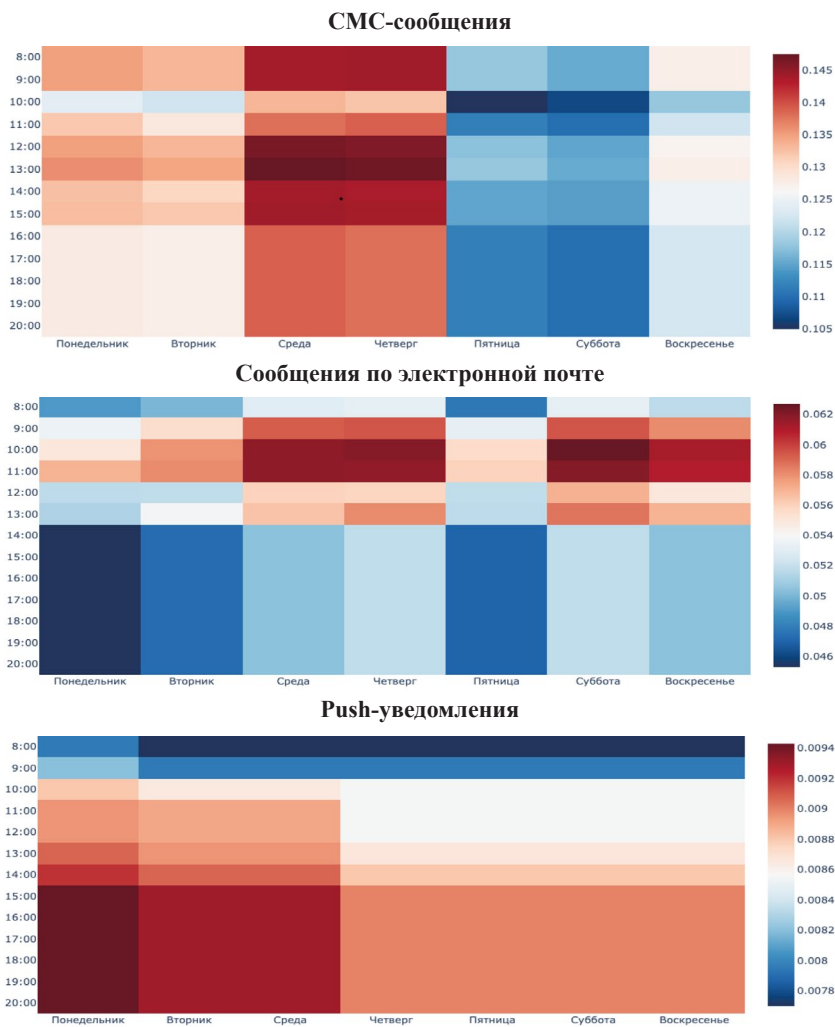


Рис. 1. Вероятностное распределение реакции пользователей по видам коммуникаций в зависимости от времени (день недели + час отправки)

Fig. 1. Probability distribution of user responses by communication type over time (day of the week + time of sending)

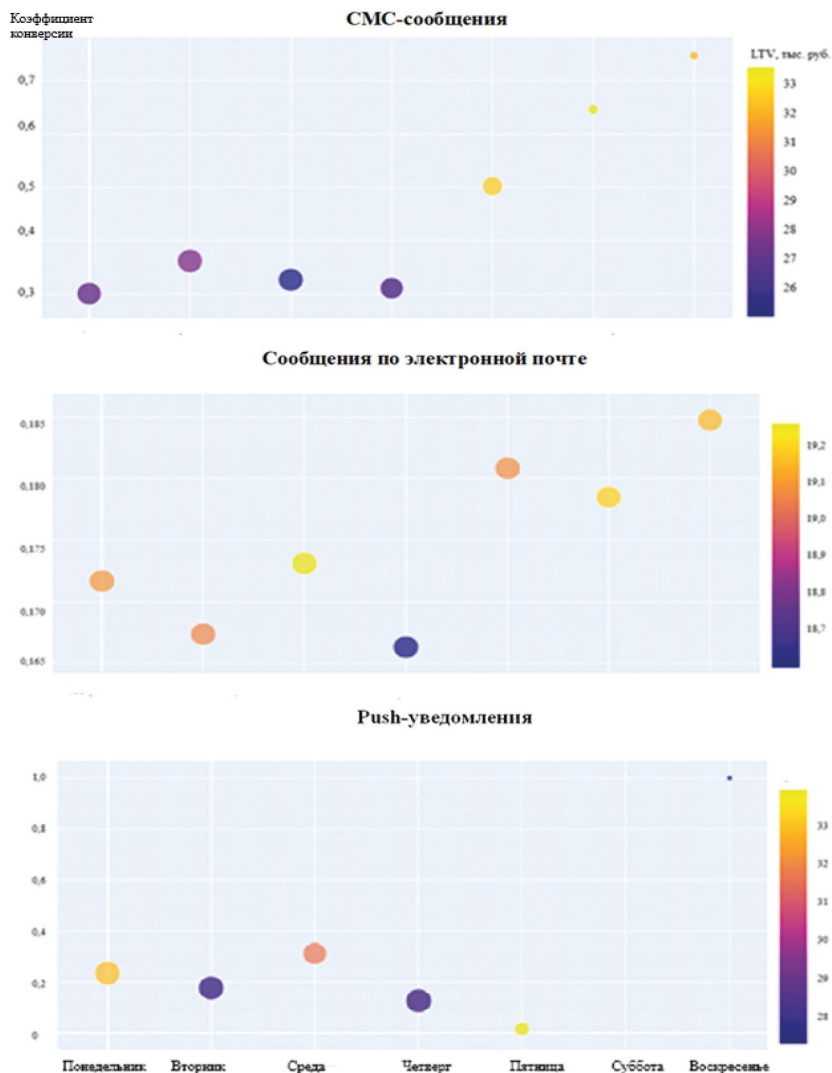


Рис. 2. Зависимость конверсии отклика на мультимедийные коммуникации в покупку (CR) от уровня расходов потребителей (LTV, тыс. руб.) по видам коммуникаций

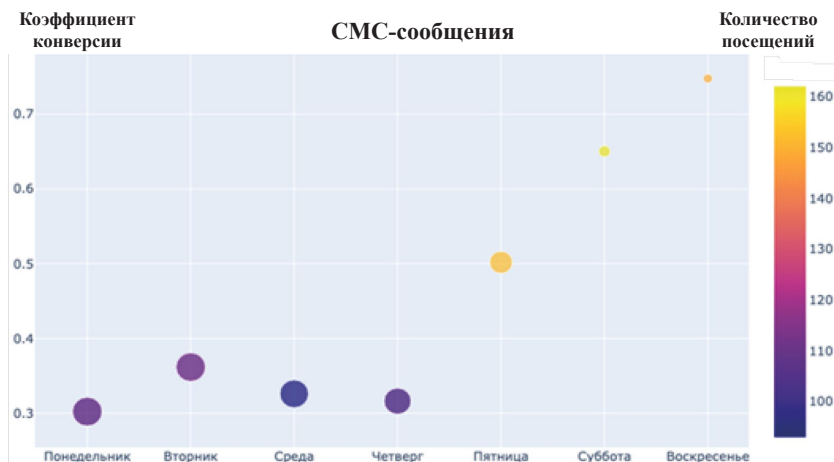
Fig. 2. Relationship between the conversion rate (CR) of responses to multichannel communications into purchases and the level of consumer spending (LTV, in thousands of rubles) by type of communication

Выявлены статистически значимые пики результативности для каждого канала коммуникации в зависимости от дня недели и часа отправлений. На основании этих данных был дан прогноз максимального отклика:

- для СМС-сообщений - в среду и четверг 13:00,
- для сообщений по электронной почте - в среду 9:00-11:00, четверг 9:00, субботу 9:00;
- для push-уведомлений - в понедельник 15:00-20:00.

В ходе исследования был проведен анализ зависимости конверсии отклика на мультикоммуникации в покупку CR от уровня расходов потребителей LTV по дням недели (Рисунок 2). Отметим, что на представленном Рисунке 2 величина круга имеет прямую зависимость от количества покупок в конкретный день недели, цвет круга отражает соответствие шкале LTV.

Эмпирическим путем было установлено, что при коммуникациях с потребителями наиболее высокие усредненные показатели конверсий отклика в покупку CR и уровня расходов потребителей LTV наблюдались в следующие дни недели. Для СМС-сообщений и сообщений по электронной почте: CR (0,75 и 0,18 соответственно) - в воскресенье, LTV (33,0 тыс руб. и 19,4 тыс руб.) - в субботу. Для push-уведомлений: CR (0,99) - в воскресенье, LTV (34,0 тыс руб.) - в пятницу. Если рассмотреть усредненные показатели максимальных количеств коммуникаций с потребителями ТАА, то они были выявлены в следующие дни недели (Рисунок 3). Для СМС-сообщений - в субботу (160 посещений), для сообщений по электронной почте и push-уведомлений - в среду (27,3 и 145 посещений соответственно).



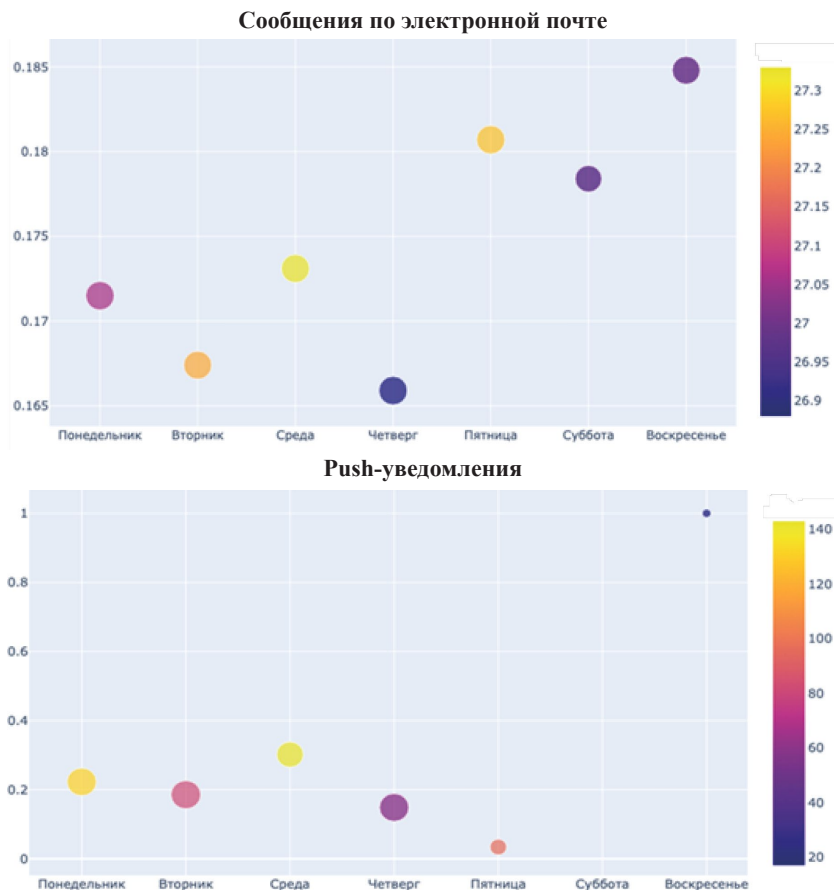


Рис. 3. Показатель конверсии отклика в визит по видам коммуникаций в зависимости от дня недели и количества посещений

Fig. 3. Conversion rate from response to visit by communication type, by day of the week and number of visits

В квартилях Q3 и Q4 средние абсолютные процентные ошибки прогноза составили 27,08% и 41,68%, что показало меньшую степень предсказуемости в области крупных расходов, необходимость применять методы, учитывающие нелинейный рост расходов.

В ходе комплексного исследования выявлены закономерности, которые позволили установить оптимальные дни недели: для конверсии

отклика в покупку в мультиканальных коммуникациях - воскресенье, для получения максимальных финансовых показателей - выходные дни. Наиболее результативным каналом для коммуникаций являлись СМС-сообщения, которые имели наилучшие соотношения между конверсией отклика в покупку и LTV. Ранее проведенное нами моделирование вероятности отклика потребителей ТАА по каналам коммуникаций с учетом дня недели (Рисунок 3) позволило существенно улучшить показатели CR, LTV, количество посещений в выходные дни. СМС-сообщения, имевшие максимальный коэффициент вероятности отклика 0,15, остались наиболее результативным каналом для коммуникаций. Несмотря на то, что push-уведомления характеризуются наименьшим значением конверсии отклика, они являются важным элементом маркетинговых стратегий ввиду своих возможностей:

- широкий охват потребителей ТАА в мессенджерах, социальных сетях, мобильных приложениях и на веб-сайтах;
- прочтение сообщения потребителем вне приложения или электронной почты;
- бесплатность отправления сообщений для АО;
- возможность настройки отправления сообщений по геолокации потребителя и времени.

Заключение

Выявлены закономерности по оптимальным дням недели: для конверсии отклика в покупку в мультиканальных коммуникациях - воскресенье, для получения максимальных финансовых показателей - суббота, за исключением push-уведомлений (пятница). Наиболее результативным каналом для коммуникаций являлись СМС-сообщения, которые имели наилучшие соотношения между конверсией отклика в покупку и LTV. Ранее проведенное моделирование вероятности отклика потребителей по каналам коммуникаций с учетом дня недели позволило существенно улучшить показатели CR, LTV, количество посещений в выходные дни. СМС-сообщения, имевшие максимальный коэффициент вероятности отклика 0,15, остались наиболее результативным каналом для коммуникаций. Оптимизация каналов коммуникаций с потребителями по дням недели с акцентом на синхронизацию периодов максимальной активности с периодами наибольшей результативности может дать значительный рост ключевых показателей, более результативное использование маркетингового бюджета аптечной организации.

Список литературы

1. Абрамов, В. И., & Чуркин, Д. А. (2022). Предиктивная аналитика взаимоотношений с клиентами как метод адаптации компании к изменениям и повышения ценности предложения. *Экономика, предпринимательство и право*, 12(6), 1709–1722. <https://doi.org/10.18334/epp.12.6.114842>. EDN: <https://elibrary.ru/GPPFPW>
2. Умаров, С. З., Голубенко, Р. А., Хорунжая, А. А., & др. (2025). Возможности аналитической платформы в области моделирования количественных параметров функционирования розничной аптеки. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, (2), 143–159. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-2-143-159>. EDN: <https://elibrary.ru/KYUGWK>
3. Гончар, А. А. (2023). Использование предиктивной аналитики для повышения эффективности бизнеса. *Актуальные исследования*, (50(180), Ч. IV), 22–46. EDN: <https://elibrary.ru/KNTPIY>
4. Кимадзе, М. И., & Кондратов, С. Ю. (2020). Проблемы формирования клиентоориентированной стратегии в онлайн-фармацевтической организации. *Азимут научных исследований: экономика и управление*, 9(1), 173–177. <https://doi.org/10.26140/anie-2020-0901-0042>. EDN: <https://elibrary.ru/UPOVKV>
5. Ковалева, Т. Г., & Саркисян, К. А. (2022). Анализ финансово-экономической деятельности аптечной организации «Еаптека». *Тенденции развития науки и образования*, (88(4)), 114–116. <https://doi.org/10.18411/trnio-08-2022-170>. EDN: <https://elibrary.ru/STYERA>
6. Кондрашов, А. А., Курашов, М. М., & Лоскутова, Е. Е. (2025). Исследование потенциала использования регрессионного анализа больших данных для оценки факторов, влияющих на стоимость фармацевтической помощи детям. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, (1), 65–80. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-65-80>. EDN: <https://elibrary.ru/UPMUQH>
7. Кротов, А. Д., & Яхонтова, И. М. (2023). Прогнозирование спроса на товары и услуги с использованием алгоритмов машинного обучения. *Проблемы развития науки и образования в эпоху модернизации*, 110–112. EDN: <https://elibrary.ru/ADQGWN>
8. Мамиев, О. А., Финогенов, Н. А., & Сологуб, Г. Б. (2020). Использование методов машинного обучения для решения задач прогнозирования суммы и вероятности покупки на основе данных электронной коммерции. *Моделирование и анализ данных: научный журнал*, 10(4), 31–40. <https://doi.org/10.17759/mda.2020100403>. EDN: <https://elibrary.ru/JGVTGL>
9. Небекин, Д. А., & Прокопенко, Н. Ю. (2020). Разработка системы поддержки принятия решений на базе аналитической платформы Loginom для эффективного управления маркетинговыми кампаниями. *Вестник Сыктывкарского*

- университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика, 2(35), 37–48. EDN: <https://elibrary.ru/HEYQKO>
10. Носырева, А. А., & Абрамов, В. И. (2021). Предиктивная аналитика — основа для цифровой трансформации компаний. *Актуальные проблемы экономики, учета, аудита и анализа в современных условиях*, 179–182. EDN: <https://elibrary.ru/YXVZUX>
 11. Пантелеев, А. С., Мироненкова, Ж. В., Умаров, С. З., & др. (2025). Разработка алгоритмов для построения модели потребительского поведения на фармацевтическом рынке. *Медико-фармацевтический журнал Пульс*, 27(4), 134–140. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2025-27-4-134-140>. EDN: <https://elibrary.ru/PUYNRU>
 12. Умаров, С. З., Мироненкова, Ж. В., & Хорунжая, А. А. (2023). Разработка динамических показателей фармацевтической деятельности на базе отечественной аналитической платформы. *Естественные и технические науки*, (1(176)), 151–162. EDN: <https://elibrary.ru/PHDTFB>
 13. Фозилова, М. М., Мухамедиева, Д. Т., & Хикматов, У. Н. (2021). Разработка модели анализа и прогнозирования потребностей рынка в лекарственных средствах. *Scientific progress*, 2(5), 382–388.
 14. Сикулер, Д. В. (2021). Ресурсы, предоставляющие данные для машинного обучения и проверки технологий искусственного интеллекта. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, (2(22)), 39–52. <https://doi.org/10.38028/ESI.2021.22.2.004>. EDN: <https://elibrary.ru/RCBUHR>
 15. Виничук, О. Ю., & Никулина, Т. А. (2023). Современные методы продвижения фармацевтических компаний на региональных фармацевтических рынках в условиях цифровизации бизнеса. *Вестник евразийской науки*, 15(3). <https://esj.today/PDF/77ECVN323.pdf>. EDN: <https://elibrary.ru/HCIRNK>
 16. Умаров, С. З., & Наркевич, К. И. (2018). Анализ интенсивности посетительского трафика в фармацевтическом ретейле с использованием элементов обработки больших данных (Big Date). *Ремедиум*, (1-2), 60–63. <https://doi.org/10.21518/1561-5936-2018-1-2-60-63>. EDN: <https://elibrary.ru/YTCEVO>
 17. Хусаинова, Г. И., & Мироненкова, Ж. В. (2009). Анализ современных информационных услуг, оказываемых фармацевтическим организациям Республики Татарстан. *Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология*, 2(3), 77. EDN: <https://elibrary.ru/NYDKKT>
 18. Афанасьева, Т. Г., Кушнир, А. Ю., Морковин, В. А., & др. (2025). Цифровой маркетинг как элемент продвижения аптечных организаций. *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, (1), 1–13. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-1-13>. EDN: <https://elibrary.ru/VUREAE>

19. Цыбовский, В. Л., & Горелова, Т. П. (2018). Проблемы формирования и функционирования ретейл-бизнеса в условиях цифровой экономики. *Вестник Академии*, (1), 10–17. EDN: <https://elibrary.ru/XMJSIX>
20. Черняков, А. Н. (2023). Обзор информационных платформ — источников наборов данных для построения моделей машинного обучения в розничной торговле. *Инновации и инвестиции*, (3), 218–223. EDN: <https://elibrary.ru/BPGNFY>
21. Li, J., Pan, S., Huang, L., & Zhu, X. (2019). A machine learning based method for customer behavior prediction. *Teh Vjesn*, 26(6), 1670–1676. <https://doi.org/10.17559/TV-20190603165825>
22. Mironenkova, Zh. V., Umarov, S. Z., Knysh, O. I., et al. (2023). Analysis of features of medication supply structure in the Russian Federation at the regional level. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(5), 473–487. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-5-952>. EDN: <https://elibrary.ru/EKDFPQ>
23. Kale, R., Bidwai, K., Maske, M., et al. (2022). Prediction of customer purchase intention using social media data. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 10–13. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-4003>
24. Zakharova, O., Lobuteva, A., Gribova, Ya., et al. (2024). The primary hyperparathyroidism and its complications: Substantiation of funding volume for hospital pharmacotherapy. *Electronic Journal of General Medicine*, 21(6), em616. <https://doi.org/10.29333/ejgm/15713>. EDN: <https://elibrary.ru/AZAIWC>

References

1. Abramov, V. I., & Churkin, D. A. (2022). Predictive analytics of customer relationship management as a method for company adaptation to changes and increasing the value of the offer. *Economics, Entrepreneurship and Law*, 12(6), 1709–1722. <https://doi.org/10.18334/epp.12.6.114842>. EDN: <https://elibrary.ru/GPPFPW>
2. Umarov, S. Z., Golubenko, R. A., Khorunzhaya, A. A., et al. (2025). Capabilities of the analytical platform in modeling quantitative parameters of retail pharmacy operations. *Current Problems of Healthcare and Medical Statistics*, (2), 143–159. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-2-143-159>. EDN: <https://elibrary.ru/KYUGWK>
3. Gonchar, A. A. (2023). Using predictive analytics to improve business efficiency. *Current Research*, (50(180), Pt. IV), 22–46. EDN: <https://elibrary.ru/KNTPIY>
4. Kimadze, M. I., & Kondratov, S. Yu. (2020). Issues in forming a customer-oriented strategy in an online pharmaceutical organization. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Management*, 9(1), 173–177. <https://doi.org/10.26140/anie-2020-0901-0042>. EDN: <https://elibrary.ru/UPOVKV>
5. Kovaleva, T. G., & Sarkisyan, K. A. (2022). Analysis of the financial and economic performance of the pharmacy organization “Eapteka”. *Trends in the De-*

- velopment of Science and Education*, (88(4)), 114–116. <https://doi.org/10.18411/tmio-08-2022-170>. EDN: <https://elibrary.ru/STYEPA>
6. Kondrashov, A. A., Kurashov, M. M., & Loskutova, E. E. (2025). Studying the potential of using regression analysis of big data to assess factors affecting the cost of pharmaceutical care for children. *Current Problems of Healthcare and Medical Statistics*, (1), 65–80. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-65-80>. EDN: <https://elibrary.ru/UPMUQH>
 7. Krotov, A. D., & Yakhontova, I. M. (2023). Forecasting demand for goods and services using machine learning algorithms. *Problems of Science and Education Development in the Era of Modernization*, 110–112. EDN: <https://elibrary.ru/AD-QGWN>
 8. Mamiev, O. A., Finogenov, N. A., & Sologub, G. B. (2020). Using machine learning methods to solve problems of predicting the amount and probability of purchase based on e-commerce data. *Modeling and Data Analysis: Scientific Journal*, 10(4), 31–40. <https://doi.org/10.17759/mda.2020100403>. EDN: <https://elibrary.ru/JGVT-GL>
 9. Nevekin, D. A., & Prokopenko, N. Yu. (2020). Development of a decision support system based on the Loginom analytical platform for effective marketing campaign management. *Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2(35), 37–48. EDN: <https://elibrary.ru/HEYQKO>
 10. Nosyreva, A. A., & Abramov, V. I. (2021). Predictive analytics as the basis for digital transformation of companies. *Current Issues of Economics, Accounting, Audit and Analysis in Modern Conditions*, 179–182. EDN: <https://elibrary.ru/YXVZUX>
 11. Panteleev, A. S., Mironenkova, Zh. V., Umarov, S. Z., et al. (2025). Development of algorithms for building a consumer behavior model in the pharmaceutical market. *Medical and Pharmaceutical Journal Pulse*, 27(4), 134–140. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2025-27-4-134-140>. EDN: <https://elibrary.ru/PUYNRU>
 12. Umarov, S. Z., Mironenkova, Zh. V., & Khorunzhaya, A. A. (2023). Development of dynamic indicators of pharmaceutical activities based on a domestic analytical platform. *Natural and Technical Sciences*, (1(176)), 151–162. EDN: <https://elibrary.ru/PHDTFB>
 13. Fozilova, M. M., Mukhamedieva, D. T., & Khikmatov, U. N. (2021). Development of a model for analyzing and forecasting market needs for medicines. *Scientific Progress*, 2(5), 382–388.
 14. Sikuler, D. V. (2021). Resources providing data for machine learning and verification of artificial intelligence technologies. *Information and Mathematical Tech-*

- nologies in Science and Management*, (2(22)), 39–52. <https://doi.org/10.38028/ESI.2021.22.2.004>. EDN: <https://elibrary.ru/RCBUHR>
15. Vinichuk, O. Yu., & Nikulina, T. A. (2023). Modern methods for promoting pharmaceutical companies in regional pharmaceutical markets in the context of business digitalization. *Bulletin of Eurasian Science*, 15(3). <https://esj.today/PDF/77ECVN323.pdf>. EDN: <https://elibrary.ru/HCIRNK>
 16. Umarov, S. Z., & Narkevich, K. I. (2018). Analysis of visitor traffic intensity in pharmaceutical retail using big data processing elements. *Remedium*, (1–2), 60–63. <https://doi.org/10.21518/1561-5936-2018-1-2-60-63>. EDN: <https://elibrary.ru/YTCEVO>
 17. Khusainova, G. I., & Mironenkova, Zh. V. (2009). Analysis of modern information services provided to pharmaceutical organizations in the Republic of Tatarstan. *Pharmacoeconomics. Modern Pharmacoeconomics and Pharmacoepidemiology*, 2(3), 77. EDN: <https://elibrary.ru/NYDKKT>
 18. Afanasyeva, T. G., Kushnir, A. Yu., Morkovin, V. A., et al. (2025). Digital marketing as an element of promoting pharmacy organizations. *Current Problems of Healthcare and Medical Statistics*, (1), 1–13. <https://doi.org/10.24412/2312-2935-2025-1-1-13>. EDN: <https://elibrary.ru/VUREAE>
 19. Tsybovsky, V. L., & Gorelova, T. P. (2018). Problems of formation and functioning of retail business in the digital economy. *Bulletin of the Academy*, (1), 10–17. EDN: <https://elibrary.ru/XMJSIX>
 20. Chernyakov, A. N. (2023). Review of information platforms as data sources for building machine learning models in retail trade. *Innovations and Investments*, (3), 218–223. EDN: <https://elibrary.ru/BPGNFY>
 21. Li, J., Pan, S., Huang, L., & Zhu, X. (2019). A machine learning based method for customer behavior prediction. *Teh Vjesn*, 26(6), 1670–1676. <https://doi.org/10.17559/TV-20190603165825>
 22. Mironenkova, Zh. V., Umarov, S. Z., Knysh, O. I., et al. (2023). Analysis of features of medication supply structure in the Russian Federation at the regional level. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(5), 473–487. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-5-952>. EDN: <https://elibrary.ru/EKDFPQ>
 23. Kale, R., Bidwai, K., Maske, M., et al. (2022). Prediction of customer purchase intention using social media data. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 10–13. <https://doi.org/10.48175/IJARSC-4003>
 24. Zakharova, O., Lobuteva, A., Gribova, Ya., et al. (2024). The primary hyperparathyroidism and its complications: Substantiation of funding volume for hospital pharmacotherapy. *Electronic Journal of General Medicine*, 21(6), em616. <https://doi.org/10.29333/ejgm/15713>. EDN: <https://elibrary.ru/AZAIWC>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**Пантелеев Антон Сергеевич**, аспирант*Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет**ул. Профессора Попова, 14А, г. Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация**anton.panteleev@spspu.ru***Мироненкова Жанна Викторовна**, доктор фармацевтических наук, профессор, профессор кафедры медицинского и фармацевтического товароведения
*Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет**ул. Профессора Попова, 14А, г. Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация**shanna.mironenkova@pharminnotech.com***Габдулхакова Ляйсан Марсовна**, кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры фармации*Башкирский государственный медицинский университет**ул. Ленина, 3, Республика Башкортостан, г. Уфа, 450008, Российская Федерация**lmgabdulkhakova@bashgmu.ru***DATA ABOUT THE AUTHORS****Anton S. Panteleev**, Postgraduate Student of the Department of Medical and Pharmaceutical Commodity Science*St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University**14A, Professor Popov Str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation**anton.panteleev@spspu.ru**SPIN-code: 8368-0310**ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0232-6156>**Researcher ID: NSU-7204-2025***Zhanna V. Mironenkova**, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor, Professor of the Department of Medical and Pharmaceutical Commodity Science*St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University**14A, Professor Popov Str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation**shanna.mironenkova@pharminnotech.com*

SPIN-code: 2508-9006

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1029-093X>

Researcher ID: HNP-3052-2023

Scopus Author ID: 16413774900

Laysan M. Gabdulkhakova, PhD in Pharmacy, Associate Professor of the Department of Pharmacy

Bashkir State Medical University

3, Lenin Str., Ufa, 450008, Russian Federation

lmgabdulkhakova@bashgmu.ru

SPIN-code: 7478-9822

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1294-3976>

Поступила 05.10.2025

После рецензирования 30.10.2025

Принята 03.11.2025

Received 05.10.2025

Revised 30.10.2025

Accepted 03.11.2025

Здравоохранение и профилактическая медицина / Public Health and Preventive Medicine

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1748](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1748)

EDN: [NEOVIO](https://edn.ru/NEOVIO)

УДК 614.256:34.04



Деятельность смешанных медицинских комиссий и проведение военно-врачебной экспертизы: организационно-правовые основы взаимодействия

П.Ю. Наумов^{1,2}, И.В. Холиков^{3,4}

¹ФГКУЗ «Главный военный клинический госпиталь войск национальной гвардии Российской Федерации», Балашиха, Российская Федерация

²ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

³ФГНИУ «Институт законодательства и сравнительного правоведения при Правительстве Российской Федерации», Москва, Российская Федерация

⁴ФГКВОВ ВО «Военный университет имени князя Александра Невского» Минобороны России, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Вопросы оказания своевременной и качественной медицинской помощи участникам вооруженных конфликтов, их медицинское обследование и освидетельствование для определения наличия (отсутствия) заболеваний (состояний) – задача, возлагаемая международным гуманитарным правом на все стороны такого конфликта. В названных целях статьей 112 Женевской Конвенции от 12 августа 1949 года об обращении с военнопленными предписано создание и функционирование смешанных медицинских комиссий, которые могли бы решать задачи оценки состояния здоровья военнопленных. Также приложением II к данной Конвенции утверждено Положение о смешанных медицинских комиссиях. При этом, как показывает опыт современных вооруженных конфликтов, как правило, создание и функционирование смешанных медицинских комиссий в соответствии с международно-правовыми предписаниями является скорее благим пожеланием, чем нормой, которую используют стороны вооруженного конфликта. Для разрешения вопросов своевременного и полного медицинского освидетельствования военнопленных необходимо не только устоявшееся международно-правовое регулирование, но и новые подходы, позволяющие обеспечить право на охрану

здоровья, медицинскую помощь и репатриацию по состоянию здоровья, а также получение иных социальных гарантий и компенсаций раненым и больным, побывавшим в плену.

Цель. Целью исследования является раскрытие основ и особенностей деятельности смешанных медицинских комиссий, образуемых на период вооруженного конфликта, и той гипотезы, что их отдельные функции в перспективе могут выполнять военно-врачебные комиссии как органы, осуществляющие проведение военно-врачебной экспертизы.

Материалы и методы. Раскрытие необходимого теоретического и эмпирического материала по проблеме исследования, разрешение выявленных авторами противоречий, достижение цели и решение задач исследования потребовали применения соответствующей методологии, обоснованной в рамках современной научной рациональности. К такой методологии относятся системный, сравнительно-правовой и комплексный подходы, а также функциональный, диалектический, дедуктивный, формально-правовой и догматические анализы, приемы обобщения научной информации, ее синтеза, классификации, идентификации и оценки.

Результаты. В работе удалось обобщить правовые, организационные и функциональные основы деятельности смешанных медицинских комиссий, создаваемых на период вооруженного (военного) конфликта. Обосновано, что в современных условиях, когда противоречия и разногласия между государствами – участниками вооруженного конфликта не позволяют им достичь договоренности о создании смешанных медицинских комиссий и организации их деятельности, адекватной альтернативой этому видится возложение отдельных их функций на военно-врачебные комиссии. Осуществить это возможно по причине того, что военно-врачебные комиссии, осуществляющие военно-врачебную экспертизу, действуют законодательно и функционально независимо от военно-административного руководства. Подобный подход является одним из путей разрешения противоречия между потребностью международного сообщества в гуманном отношении к военнопленным, предоставлении им необходимой медицинской помощью, реализации права на медицинское освидетельствование и объективной невозможностью создания смешанных медицинских комиссий в условиях современного военного (вооруженного) конфликта.

Ключевые слова: вооруженный конфликт; смешанные медицинские комиссии; лечение; увечья; ранения; травмы; контузии; комбатанты; военно-врачебные комиссии; военно-врачебная экспертиза; военный плен; репатриация

Для цитирования. Наумов, П. Ю., & Холиков, И. В. (2026). Деятельность смешанных медицинских комиссий и проведение военно-врачебной экспертизы: организационно-правовые основы взаимодействия. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 352–372. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1748>

Activities of mixed medical commissions and conducting military medical examination: organizational and legal basics of interaction

P.Yu. Naumov^{1,2}, I.V. Kholikov^{3,4}

*¹Main military clinical hospital of the National Guard troops
of the Russian Federation, Balashikha, Russian Federation*

*²National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine,
Moscow, Russian Federation*

*³Institute of Legislation and Comparative Law under the Government
of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation*

⁴Prince Alexander Nevsky Military University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. The issues of providing timely and high-quality medical care to participants in armed conflicts, their medical examination and certification to determine the presence (absence) of diseases (conditions) is a task imposed by international humanitarian law on all parties to such a conflict. For these purposes, Article 112 of the Geneva Convention of 12 August 1949 relative to the Treatment of Prisoners of War prescribes the creation and functioning of mixed medical commissions that could solve the problems of assessing the health of prisoners of war. This Convention also approved the provision on mixed medical commissions. At the same time, as the experience of modern armed conflicts shows, as a rule, the creation and functioning of mixed medical commissions is more a pious wish than a norm used by the parties to an armed conflict. In order to resolve the issues of timely and complete medical examination of prisoners of war, it is necessary not only to have established international legal regulation, but also new approaches that will ensure the right to health protection, medical care and repatriation for health reasons, as well as to receive other social guarantees and compensation for the wounded and sick who were in captivity.

Purpose. The aim of the work is to reveal the foundations and features of the activities of mixed medical commissions formed during an armed conflict and that their individual functions in the future can be performed by military medical commissions, as bodies that carry out military medical examinations.

Materials and methods. Disclosure of the necessary theoretical and empirical material on the research problem, resolution of the contradictions identified by the author, achievement of the goal and solution of the research tasks required the use of the corresponding methodology, which is justified within the framework of modern scientific rationality. Such methodology includes systemic, comparative legal and complex approaches, as well as functional, dialectical, deductive, formal legal and dogmatic anal-

yses, methods of generalization of scientific information, its synthesis, classification, identification and evaluation.

Results. The work managed to generalize the legal, organizational and functional bases of the activities of mixed medical commissions created for the period of armed (military) conflict. It is substantiated that in modern conditions, when contradictions and disagreements between the states participating in the armed conflict do not allow them to reach an agreement on the creation of mixed medical commissions and the organization of their activities, an adequate alternative to this seems to be the assignment of some of their functions to military medical commissions. This can be done due to the fact that military medical commissions that carry out military medical examination, establish a causal relationship, act legislatively and functionally independently of the military-administrative leadership. Such an approach is one of the ways to resolve the contradiction between the need of the international community for a humane attitude to prisoners of war, providing them with the necessary medical care, realizing the right to a medical examination and the objective impossibility of creating mixed medical commissions in the conditions of a modern military (armed) conflict.

Keywords: armed conflict; mixed medical commissions; treatment; injuries; wounds; trauma; contusions; combatants; military medical commissions; military medical examination; military captivity; repatriation

For citation. Naumov, P. Yu., & Kholikov, I. V. (2026). Activities of mixed medical commissions and conducting military medical examination: organizational and legal basics of interaction. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 352–372. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1748>

Введение

Несмотря на общую разработанность в структуре международного гуманитарного права вопросов, касающихся правового режима военного плена, статуса военнопленных, правовое положение смешанных медицинских комиссий по освидетельствованию раненых и больных из числа военнопленных, а также возможность медицинского обследования и освидетельствования их военно-врачебными комиссиями остаются до настоящего времени без должной организационно-медицинской и военно-правовой концептуализации в современном научном познании.

При этом наблюдаемые сегодня многочисленные вооруженные (военные) конфликты в различных регионах мира и очевидная социально-политическая неспособность их эффективно предотвращать ставит вопросы подготовки новых решений в рамках установленного международно-правового режима [30].

Проблемы и способы оказания своевременной и качественной медицинской помощи участникам вооруженных конфликтов в требуемом (установленном) объеме, их медицинское обследование и освидетельствование для определения наличия (отсутствия) заболеваний (состояний) – задача, возлагаемая международным гуманитарным правом на все стороны такого конфликта. Для её решения статьёй 112 Женевской Конвенции об обращении с военнопленными предписано создание и функционирование смешанных медицинских комиссий, которые могли бы решать задачи оценки состояния здоровья военнопленных в целях решения вопросов их последующей репатриации. Также данной Конвенцией утверждено соответствующее Положение о смешанных медицинских комиссиях.

Как показывает опыт современных вооруженных (военных) конфликтов, как правило, создание и функционирование смешанных медицинских комиссий по международно-правовым предписаниям является скорее благим пожеланием, чем нормой, которую используют стороны вооруженного конфликта. Для разрешения вопросов своевременного и полного медицинского освидетельствования военнопленных необходимо не только установившееся международно-правовое регулирование, но и новые подходы, позволяющие обеспечить право медицинскую помощь и репатриацию по состоянию здоровья, а также получение иных социальных гарантий и компенсаций раненым и больным, находящимся (побывавшим) в плену [39].

Деятельность смешанных медицинских комиссий – это тот вопрос, в котором сталкиваются максимально общие нормы (в данном случае нормы международного гуманитарного права, регулирующие режим военного плена) и конкретный человек – участник вооруженного (военного) конфликта (комбатант), которого необходимо освидетельствовать после его попадания в плен и при его нахождении в плену. Это свидетельствует об актуальности научных разработок в данной сфере и их социальной значимости для действий конкретных людей и должностных лиц в реальной социальной жизни и при решении ежедневно возникающих задач медицинского обеспечения.

В качестве положительного примера реализации международно-правовых норм можно отметить, что в период проведения специальной военной операции, по информации Главного военно-медицинского управления Минобороны России, в нашей стране функционирует соответствующая смешанная медицинская комиссия, выполняющая функции по медицинскому освидетельствованию и оценке состояния здоровья военнопленных, для решения вопросов о репатриации раненых и больных военнослужащих

на родину. Возглавляет данную комиссию главный хирург Минобороны России. В деятельности комиссии также принимают участие представители Международного комитета Красного Креста. Об этом ранее заявлял заместитель начальника Главного военно-медицинского управления Минобороны России¹.

Методология исследования и краткий обзор литературы

Раскрытие необходимого теоретического и эмпирического материала по проблеме исследования, разрешение выявленных авторами противоречий, достижение цели и решение задач исследования потребовали применения и соответствующей методологии, которая является обоснованной в рамках современной научной рациональности. К такой методологии относятся системный, сравнительно-правовой и комплексный подходы, а также функциональный, диалектический, дедуктивный, формально-правовой и догматические анализы, приемы обобщения научной информации, её синтеза, классификации, идентификации и оценки.

Организационно-правовые основы деятельности смешанных медицинских комиссий, в отличие от военно-врачебных (врачебно-летных) комиссий, концептуальному анализу в научной литературе практически не подвергались. При этом в современном научном знании накоплен солидный массив научных разработок в области правового положения, медицинского и материального обеспечения лиц, находящихся в плену (попавших в плен, освобожденных из плена), и репатриации их по выявленным медицинским показаниям по итогам проведенного освидетельствования (А.Я. Аснис [2], М.М. Баранников [3], В.А. Батырь [4-7], Л.И. Вавулинская [10], Н.А. Заневская [11; 12], А.В. Кудашкин [15], А.Л. Кузьминых [17], Н.М. Маркдорф [19], Л.М. Спиридонова [33], А.В. Тихонов [34], С.С. Яковлев [45]).

Военно-врачебная (врачебно-летная) экспертиза, производимая специально уполномоченными органами – военно-врачебными (врачебно-летными) комиссиями в Вооруженных Силах, иных войсках, воинских формированиях и органах являлась предметом изучения для ученых и практиков из разных областей на страницах научных и научно-практических изданий (И.В. Бухтияров [8], В.С. Вовкодав [35], А.В. Ганишев [1; 9], О.В. Дамаскин [36], А.В. Дацко [14; 40], К.В. Жданов [37], А.И. Землин [13; 24], С.А. Кузьмин [16], В.В. Куликов [18], С.С. Меметов [20; 21],

¹ В Российской Федерации работает комиссия по оценке состояния здоровья украинских военнопленных // <https://tass.ru/obschestvo/22411735?ysclid=m624mgfe626759613> [Электронный ресурс] (дата обращения: 10.12.2024).

В.Г. Миронов [22], И.Л. Мызников [23], В.А. Сидоренко [31], А.А. Согийянен [32], А.Л. Чаплюк [41], Д.А. Чернов [42], Ю.К. Чурилов [43], В.А. Шаповалов [44]).

Теоретическая ориентация настоящей работы также функционально была направлена на уже известные научные разработки в области правового регулирования производства военно-врачебной экспертизы и деятельности военно-врачебных комиссий [26; 27; 29; 38].

Основная часть

Основы деятельности смешанных медицинских комиссий в период вооруженного конфликта установлены статьей 112 Женевской Конвенции об обращении с военнопленными. В указанной статье Конвенции определена обязанность по созданию этих комиссий, определен их состав и решаемые задачи, а также имеется отсылочная норма на приложение II к Конвенции, которым утвержден основной статусный документ в области организации, функций и особенностей деятельности названных комиссий – Положение о смешанных медицинских комиссиях (далее также – Положение).

Последовательное, комплексное и системное познание организации и нормативно-процессуальных основ деятельности смешанных медицинских комиссий и рассмотрения такового в ракурсе их взаимосвязи с органами военно-врачебной экспертизы (в основном с военно-врачебными комиссиями) предполагает изучение тех норм, в которых раскрывается состав, функции, полномочия, юридические последствия и действие вынесенных заключений во времени, пространстве и по кругу лиц. Для решения такой задачи необходимо подвергнуть комплексному и сравнительно-правовому исследованию предписания Положения о смешанных медицинских комиссиях, об организации и осуществлении их деятельности, правах, обязанностях, ответственности и юридических последствиях принимаемых ими решениях по результатам освидетельствования раненых и больных военнопленных.

Состав смешанных медицинских комиссий определяется в количестве из трех членов, двое из которых – представители нейтральных стран, а один – от стороны (страны), держащей в плену военнопленного. Функции председателя во всех случаях выполняет представитель нейтральной страны (статья 1 Положения). Нейтральные члены назначаются представителями Международного комитета Красного Креста на основании соглашения со страной, согласившейся быть покровительницей в конфликте по соответствующему ходатайству властей страны, держащей военнопленного в плену (статья 2 Положения).

Статьи 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9 Положения содержат в себе требования о порядке и способах назначения состава смешанной медицинской комиссии, в том числе необходимого количества заместителей председателя комиссии и её членов (в том числе врача-хирурга и врача-терапевта).

В соответствии со статьей 10 Положения о смешанных медицинских комиссиях, они производят медицинское освидетельствование всех военнопленных, перечисленных в статье 113 Женевской Конвенции об обращении с военнопленными, и принимают большинством голосов решения об их репатриации, исключении из числа репатриированных или об отсрочке решения до последующего освидетельствования.

Предписания статьи 11 Положения о смешанных медицинских комиссиях содержат в себе требования об обязательном уведомлении (в месячный срок), о принятом комиссией решении, держащей в плену державы, державы-покровительницы и Международного комитета Красного Креста. Решение комиссии в обязательном порядке также доводится до освидетельствуемого военнопленного с выдачей соответствующего свидетельства, форма которого утверждена Женевской Конвенцией от 12 августа 1949 года об обращении с военнопленными.

С правоприменительной и гуманитарно-международной точки зрения, ключевой является статья 12 Положения о смешанных медицинских комиссиях, согласно которой решения смешанной медицинской комиссии подлежат обязательному исполнению в течение трех месяцев со дня, когда властям держащей в плену страны стало известно о принятом решении по результатам освидетельствования.

Статья 14 Положения о смешанных медицинских комиссиях обязывает данные комиссии посещать каждое место содержания военнопленных не реже одного раза в шесть месяцев для проведения при необходимости соответствующего медицинского освидетельствования и решения вопросов содержания в плену.

Таким образом, основными характеристиками смешанных медицинских комиссий является обязательность их создания в режиме ведения вооруженного (военного) конфликта, наличие правоприменительных функций и соответствующих властных полномочий, вытекающих из требований международно-правовых документов, их относительная независимость от властей страны, держащей в плену военнопленного. Также содержательными характеристиками смешанной медицинской комиссии являются профессионализм и междисциплинарность, связанные с тем, что в состав комиссии входят профессиональные врачи, как правило, име-

ющие разные медицинские специальности. Экспертный характер деятельности смешанной медицинской комиссии связан с необходимостью квалифицированной оценки состояния здоровья содержащихся в плену лиц и вынесения на этой основе решения, основанного на результатах всестороннего медицинского освидетельствования.

Экспертная деятельность в России многообразна и включает в себя множество видов осуществляемых экспертиз в целях подтверждения (опровержения) обстоятельств, событий и фактов, а также причинно-следственной (причинной) связи происходящих с ними изменений (в том числе в состоянии здоровья). В структуре экспертной деятельности важное место занимают медицинские экспертизы, одной из которых является военно-врачебная экспертиза [25].

Военно-врачебная экспертиза – самостоятельный вид медицинской экспертизы, проводимой очно (в отдельных, только законодательно определенных, случаях – заочно) в мирное и военное время в Вооруженных Силах России (иных войсках, воинских формированиях и органах) военно-врачебными (врачебно-летными) комиссиями в отношении военнослужащих, сотрудников и иных лиц с целью определения категории годности к военной службе (службе), установления (определения) причинной связи и разрешения иных вопросов [28].

Во исполнение части 2 статьи 61 Федерального закона «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» Постановлением Правительства Российской Федерации от 4 июля 2013 г. № 565 «Об утверждении Положения о военно-врачебной экспертизе» утверждено Положение о военно-врачебной экспертизе, определяющее основные аспекты ее осуществления [24].

В свете предмета исследования теоретическому и нормативно-правовому обоснованию подлежат обстоятельства, в соответствии с которыми имеется возможность возложения функций, определенных международно-правовыми документами для выполнения смешанными медицинскими комиссиями на органы (комиссии), уполномоченные на проведение военно-врачебной экспертизы.

Во-первых, возложение данных функций допускает статья 13 Положения о смешанных медицинских комиссиях, согласно которой держащая в плену страна при невозможности назначения смешанной медицинской комиссии по правилам, определенным статьями 1, 2, 3, 4, 5 и 8 Положения, с согласия державы-покровительницы имеет право создать медицинскую комиссию с возложением на неё тех же функций, что и на смешанную ме-

дицинскую комиссию. Наделение этими функциями военно-врачебных комиссий в данном аспекте будет соответствовать принципам правовой определенности, независимости и объективности.

Во-вторых, это связано с тем, что входящий в состав военно-врачебных комиссий военно-медицинский персонал в силу положений норм международного гуманитарного права не является комбатантами, обладает особым правовым статусом, функциями и полномочиями при оказании медицинской помощи участникам вооруженных конфликтов и иным лицам (статьи 19 Женевской Конвенции об улучшении участи раненых и больных в действующих армиях от 12 августа 1949 года, статья 33 Женевской Конвенции об обращении с военнопленными от 12 августа 1949 года, статья 8, часть 2 статьи 9, статьи 12, 13, 14, 16 Дополнительного протокола к Женевским Конвенциям от 12 августа 1949 года, касающегося защиты жертв международных вооруженных конфликтов (Протокол I)).

Кроме того, международно-правовые требования к врачебному составу смешанных медицинских комиссий во многом схожи с нормативно-правовыми требованиями к врачебному составу военно-врачебных комиссий, они совпадают по специальностям и направления деятельности (в обеих комиссиях должны быть представлены специалисты по хирургии и терапии).

В-третьих, деятельность военно-врачебных комиссий связана с определенным уровнем автономности и независимости по отношению к командованию воинских частей (подразделений), несмотря на то что они состоят, как правило, из действующих военнослужащих (сотрудников) или работников военно-медицинских организаций. Эта автономность и независимость связаны с тем, что в силу норм, имеющих в статье 61 Федерального закона «Об основах охраны здоровья граждан», Уставе внутренней службы Вооруженных Сил Российской Федерации и Положении о военно-врачебной экспертизе, военно-врачебные комиссии не подчинены командирам (начальникам) воинских частей (организаций). При этом заключения военно-врачебной экспертизы являются обязательными для исполнения должностными лицами на территории Российской Федерации. В силу пунктов 1–3, 4–8, 50 и 51 Положения о военно-врачебной экспертизе, военно-врачебные комиссии, её проводящие, не подчинены воинским властям, не подотчетны командирам воинских частей (организаций, учреждений) или руководителям военно-медицинских организаций и выносят решения самостоятельно, коллегиально и большинством голосов членов комиссии, присутствующих на её заседании. Также в силу статьи 359 Устава внутренней службы Вооруженных Сил Российской Федерации,

рекомендации врача (фельдшера) о частичном или полном освобождении военнослужащего от исполнения обязанностей подлежат обязательному выполнению должностными лицами.

На органы военно-врачебной экспертизы (военно-врачебные (врачебно-летные) комиссии военно-медицинских (медицинских) организаций) могут быть возложены функции смешанных медицинских комиссий при объективной невозможности создать (образовать) последние, о чем в обязательном порядке должны быть уведомлены уполномоченные представители Международного комитета Красного Креста. В этом случае на военно-врачебные комиссии возлагаются задачи по медицинскому обследованию и освидетельствованию раненых и больных из числа военнопленных с целью выдвижения предложений об их репатриации (с обязательным уведомлением заинтересованных лиц (в том числе Международного комитета Красного Креста) и выдачей свидетельства о репатриации по установленному образцу), исключении из числа репатриированных или об отсрочке решения до последующего освидетельствования по медицинским показаниям.

Заключение

В исследовании установлено, что деятельность смешанных медицинских комиссий, которые предусмотрены статьей 112 Женевской конвенции об обращении с военнопленными, не становилась предметом обширного научного исследования и системно-правового обобщения, особенно в ракурсе медицинского обследования и освидетельствования в сложных условиях, когда имеется необходимость и в медицинском освидетельствовании в рамках военно-врачебной экспертизы. Проведенная в настоящей статье работа данное противоречие снимает и представляет научному сообществу результаты развернутого анализа деятельности смешанных медицинских комиссий, как в ракурсе непосредственной реализации установленных полномочий, так и в ракурсе делегирования их функций на органы военно-врачебной экспертизы.

Так необходимость медицинского обследования и освидетельствования раненых и больных из числа военнопленных (особенно перед репатриацией или при их репатриации) детерминирует интерес научного и экспертного сообщества к рассмотрению возможности использования военно-врачебных комиссий для проведения указанного обследования и освидетельствования в рамках военно-врачебной экспертизы. Сделать это целесообразно и при возможном участии международных организаций.

Вектором дальнейшего научного поиска является продолжение обоснования необходимости конкретного закрепления функций военно-врачебных комиссий государств – участников вооруженного конфликта по проведению военно-врачебной экспертизы, медицинского обследования и медицинского освидетельствования раненых и больных военнопленных в международно-правовых документах и выработки соответствующих совместных правоприменительных решений. Еще одним путем совершенствования нормативных правовых актов в области фиксации заболеваний и состояний участников вооруженных конфликтов является установление соответствующего правового регулирования во внутригосударственных нормах права, регулирующих производство военно-врачебной экспертизы (например, введение норм, регулирующих медицинское освидетельствование военнопленных военно-врачебными комиссиями (вместо смешанных медицинских комиссий) в Положение о военно-врачебной экспертизе).

Список литературы

1. Абрамов, А. В., & Ганишев, А. В. (2023). Опыт проведения военно-врачебной экспертизы в условиях вооруженного конфликта. *Медицинский вестник МВД*, 123(2), 2–5. EDN: <https://elibrary.ru/NRZLYW>
2. Аснис, А. Я., & Хазиев, Ш. Н. (2016). Судебные экспертизы на Нюрнбергском процессе. *Теория и практика судебной экспертизы*, (4), 38–45. EDN: <https://elibrary.ru/XEPUSJ>
3. Баранников, М. М., & Харитонов, С. С. (2024). О медицинском обеспечении при призыве на военную службу по мобилизации: правовой аспект. *Право в Вооруженных Силах — Военно-правовое обозрение*, (8), 50–55. EDN: <https://elibrary.ru/NKVKYM>
4. Батырь, В. А. (2024). Женевская конвенция об улучшении участи раненых, больных и лиц, потерпевших кораблекрушение. *Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия»*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/CDGUFD>
5. Батырь, В. А. (2024). Военнопленный. *Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия»*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/EJBJJR>
6. Батырь, В. А. (2024). Женевская конвенция об обращении с военнопленными. *Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия»*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/DXTIQC>
7. Батырь, В. А. (2024). Больные и раненые. *Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия»*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/OLYPIV>
8. Бухтияров, И. В., Холиков, И. В., Большакова, В. М., & Наумов, П. Ю. (2023). Опыт концептуализации военных аспектов медицинского права (обсужде-

- ние главы 14 учебника «Медицинское право России», ответственный ред. А. А. Мохов, изд-во «Проспект», 2022, — материалы дискуссии). *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>
9. Ганишев, А. В. (2024). Анализ категорий годности к службе сотрудников органов внутренних дел, Росгвардии, государственной противопожарной службы, страдающих артериальной гипертензией и достигших предельного возраста пребывания на службе. *Медицинский вестник МВД*, 129(2), 70–73. https://doi.org/10.52341/20738080_2024_129_2_70. EDN: <https://elibrary.ru/GSCPUU>
 10. Вавулинская, Л. И. (2014). Медицинское обеспечение иностранных военнопленных в Карело-Финской ССР в 1944–1949 гг. *Клио*, (2), 85–89. EDN: <https://elibrary.ru/RWUTKV>
 11. Заневская, Н. А., & Холиков, И. В. (2020). Обязательства государств по передаче находящихся в их распоряжении сведений о военнослужащих, погибших в период вооруженного конфликта. *Военное право*, (4), 220–228.
 12. Заневская, Н. А., & Холиков, И. В. (2019). Международно-правовая регламентация обращения с телами военнослужащих, погибших в условиях вооруженного конфликта. *Военное право*, (4), 285–291. EDN: <https://elibrary.ru/TAXTRL>
 13. Землин, А. И., Наумов, П. Ю., & Шепель, Р. Н. (2024). Ценности здравоохранения на языке права: критические размышления об этических и правовых основах стандартов медицинской сортировки в российской военно-медицинской службе. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 23(4), 115–120. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-4023>. EDN: <https://elibrary.ru/KSLWJM>
 14. Крайнюков, П. Е., Дацко, А. В., Погосов, Н. В., et al. (2024). Военно-врачебная экспертиза и особенности определения причин инвалидности у военнослужащих (судебная практика). *Военно-медицинский журнал*, 345(12), 10–15. https://doi.org/10.52424/00269050_2024_345_12_10. EDN: <https://elibrary.ru/EYVBCH>
 15. Кудашкин, А., & Холиков, И. (2023). Опыт концептуализации специальных военных операций в современном праве. *Пути к миру и безопасности*, (1), 31–47. <https://doi.org/10.20542/2307-1494-2023-1-31-47>. EDN: <https://elibrary.ru/NUQKWL>
 16. Кузьмин, С. А., Вовк, О. И., Солодовников, В. В., & Григорьева, Л. К. (2021). Роль военно-врачебной экспертизы в обеспечении безопасности жизнедеятельности воинских коллективов. *Безопасность жизнедеятельности*, (1), 14–17. EDN: <https://elibrary.ru/WJXCXNZ>
 17. Кузьминых, А. Л. (2023). Череповецкий лагерь для военнопленных № 158 (1942–1948 гг.): структура, состав контингента, производственная деятельность. *Historia Provinciae — журнал региональной истории*, 7(4), 1405–1477. <https://doi.org/10.23859/2587-8344-2023-7-4-7>. EDN: <https://elibrary.ru/IMKIHV>

18. Куликов, В. В., Дворянчиков, Н. А., & Ядчук, В. Н. (2010). Осуществление надзора за военно-врачебной экспертизой. *Вестник Росздравнадзора*, (S1), 36–37. EDN: <https://elibrary.ru/LAFIWD>
19. Маркдорф, Н. М. (2012). Медико-санитарное обеспечение иностранных военнопленных и интернированных в лагерях и рабочих батальонах Западной Сибири: 1943–1950 гг. *Вестник Омского университета*, (3), 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/PGKSWN>
20. Меметов, С. С., Потапов, Н., Мутева, Т. А., & Якушев, А. А. (2015). О независимой медицинской экспертизе. *Вестник Всероссийского общества специалистов по медико-социальной экспертизе, реабилитации и реабилитационной индустрии*, (3), 6–9. EDN: <https://elibrary.ru/VKPPXF>
21. Меметов, С. С., Силенко, Л. В., Погосян, Г. Э., & Потапов, В. Н. (2017). Медицинская экспертиза: Состояние, перспективы, проблемы. *Вестник Всероссийского общества специалистов по медико-социальной экспертизе, реабилитации и реабилитационной индустрии*, (2), 5–9. EDN: <https://elibrary.ru/YRMOTO>
22. Миронов, В. Г., Макиев, Р. Г., Миронов, И. В., et al. (2024). Особенности контузионной взрывной травмы в современных боевых условиях: этиопатогенез, клиника, военно-врачебная экспертиза. *Российская оториноларингология*, 23(6), 125–136. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2024-6-125-136>. EDN: <https://elibrary.ru/QYCSAL>
23. Мызников, И. Л., Устименко, Л. И., Трофимова, А. Ю., & Бурцев, Н. Н. (2013). Военно-врачебная экспертиза призывников и ее качество. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*, (3), 32–36.
24. 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>
25. 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>
26. 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>
27. Наумов, П. Ю., Шепель, Р. Н., & Холиков, И. В. (2023). Оказание военнослужащим первичной медико-санитарной помощи: правовое регулирование и про-

- блемные аспекты. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 22(S9), 46–56. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3885>. EDN: <https://elibrary.ru/DSONXG>
28. Наумов, П. Ю., Холиков, И. В., & Солдатов, С. К. (2024). Концептуализация понятия «военно-врачебная экспертиза» в междисциплинарном контексте. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(1), 422–445. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-1071>. EDN: <https://elibrary.ru/DOFVTM>
29. Наумов, П. Ю., Холиков, И. В., & Утюганов, А. А. (2024). Правовые вопросы соблюдения врачебной тайны при проведении военно-врачебной (врачебно-лётной) экспертизы. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 58(6), 108–116. <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2024-58-6-108-116>. EDN: <https://elibrary.ru/НКATHU>
30. 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>
31. Сидоренко, В. А. (2016). Военно-врачебная экспертиза в органах внутренних дел Российской Федерации. *Медицинский вестник МВД*, (4), 2–3. EDN: <https://elibrary.ru/WFEDDH>
32. Согияйнен, А. А., Щепин, В. О., Тельнова, Е. А., & Чичерин, Л. П. (2017). Актуальные правовые и организационные проблемы лицензирования военно-врачебной экспертизы. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*, 25(5), 290–294. <https://doi.org/10.18821/0869-866X-2017-25-5-290-294>. EDN: <https://elibrary.ru/ZXPDAAD>
33. Спиридонова, Л. М. (2018). Раненые и больные продолжали числиться в составе армии. Система военно-медицинского обеспечения в Пензенской губернии (1914–1917 гг.). *Военно-исторический журнал*, (10), 16–22. EDN: <https://elibrary.ru/XZUEIX>
34. Тихонов, А. В. (2016). Организация медицинской помощи военнопленным в Калужской и Тульской губерниях в годы Первой мировой войны. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: История*, (1), 109–120.
35. Холиков, И. В., & Вовкодав, В. С. (2017). Человеческий фактор безопасности полётов: военно-правовые аспекты. *Военное право*, (6), 177–179.
36. Холиков, И. В., & Дамаскин, О. В. (2018). Проблемные вопросы правовой регламентации врачебно-лётной экспертизы в России. *Представительная власть — XXI век: законодательство, комментарии, проблемы*, (3), 10–13. EDN: <https://elibrary.ru/YWUKDX>
37. Холиков, И. В., & Жданов, К. В. (2015). Оказание помощи Гвинейской Республике в борьбе с эпидемией геморрагической лихорадки Эбола. *Военно-медицинский журнал*, (2), 93–95. EDN: <https://elibrary.ru/WCBFTZ>
38. Холиков, И. В., Шафалинов, В. А., Волгин, А. Р., & Яковлев, С. В. (2007). Деятельность сил и средств медицинской службы в условиях ликвидации

- последствий чрезвычайной ситуации (Опыт работы российского военно-медицинского контингента в Республике Индонезия). *Военно-медицинский журнал*, 328(3), 10–13. EDN: <https://elibrary.ru/HZPHKZ>
39. Холиков, И. В., & Наумов, П. Ю. (2024). Трансляция знаний и критерии научности: концепты современной теории военного права. *Государство и право*, (1), 100–116. <https://doi.org/10.31857/S1026945224010101>. EDN: <https://elibrary.ru/LQLFNW>
40. Храпылина, Л. П., Дацко, А. В., Корякин, С. В., & Кабалин, А. П. (2019). О профессиональном стандарте специалиста по военно-врачебной экспертизе. *Медицинский вестник МВД*, (6), 7–15. EDN: <https://elibrary.ru/XAMAAZ>
41. Чаплук, А. Л., Бровкин, С. Г., Кальманов, А. С., & Булавин, В. В. (2015). Проблемы военно-врачебной экспертизы военнослужащих, страдающих хронической обструктивной болезнью легких. *Военно-медицинский журнал*, 336(2), 15–21. EDN: <https://elibrary.ru/WCBFHR>
42. Чернов, Д. А., Свигло, Д. Ч., Лятос, И. А., & Новоселецкий, В. А. (2017). Организация и проведение военно-врачебной экспертизы граждан, обучающихся по программам подготовки офицеров запаса на военных кафедрах и военных факультетах. *Военная медицина*, (4), 6–8.
43. Чурилов, Ю. К., Чаплук, А. Л., Бровкин, С. Г., & Вовкодав, В. С. (2018). Из истории военно-врачебной экспертизы в России. *Военно-медицинский журнал*, 339(4), 69–77. EDN: <https://elibrary.ru/YWYANC>
44. Шаповалов, В. А. (2016). Особенности проведения военно-врачебной экспертизы в Республике Крым. *Медицинский вестник МВД*, (4), 4–6.
45. Яковлев, С. С., Холиков, И. В., & Батырь, В. А. (2000). О медико-юридических аспектах международного гуманитарного права (к 190-летию со дня рождения Н. И. Пирогова). *Военно-медицинский журнал*, 321(11), 47–51. EDN: <https://elibrary.ru/ZBKNIL>

References

1. Abramov, A. V., & Ganishev, A. V. (2023). Experience in conducting military medical examination under armed conflict conditions. *Medical Bulletin of the Ministry of Internal Affairs*, 123(2), 2–5. EDN: <https://elibrary.ru/NRZLYW>
2. Asnis, A. Ya., & Khaziev, Sh. N. (2016). Forensic examinations at the Nuremberg trials. *Theory and Practice of Forensic Science*, (4), 38–45. EDN: <https://elibrary.ru/XEPUSJ>
3. Barannikov, M. M., & Kharitonov, S. S. (2024). On medical support during conscription for military service under mobilization: A legal aspect. *Law in the Armed Forces — Military Legal Review*, (8), 50–55. EDN: <https://elibrary.ru/NKVKYM>
4. Batyr, V. A. (2024). Geneva Convention for the Amelioration of the Condition of the Wounded, Sick and Shipwrecked. *Scientific and Educational Portal “Great Russian Encyclopedia”*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/CDGUFD>

5. Batyr, V. A. (2024). Prisoner of war. *Scientific and Educational Portal "Great Russian Encyclopedia"*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/EJBJJR>
6. Batyr, V. A. (2024). Geneva Convention relative to the Treatment of Prisoners of War. *Scientific and Educational Portal "Great Russian Encyclopedia"*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/DXTIQC>
7. Batyr, V. A. (2024). The sick and the wounded. *Scientific and Educational Portal "Great Russian Encyclopedia"*, (2). EDN: <https://elibrary.ru/OLYPIV>
8. Bukhtiyarov, I. V., Kholikov, I. V., Bolshakova, V. M., & Naumov, P. Yu. (2023). Experience in conceptualizing the military aspects of medical law (discussion of Chapter 14 of the textbook "Medical Law of Russia", editor-in-chief A. A. Mokhov, Prospect Publishing House, 2022 — discussion materials). *Occupational Medicine and Industrial Ecology*, 63(1), 67–73. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-1-67-73>. EDN: <https://elibrary.ru/FWIGUF>
9. Ganishev, A. V. (2024). Analysis of fitness categories for service among employees of the internal affairs bodies, the National Guard, and the State Fire Service suffering from arterial hypertension and having reached the maximum age for service. *Medical Bulletin of the Ministry of Internal Affairs*, 129(2), 70–73. https://doi.org/10.52341/20738080_2024_129_2_70. EDN: <https://elibrary.ru/GSCPUU>
10. Vavulinskaya, L. I. (2014). Medical support for foreign prisoners of war in the Karelo-Finnish SSR in 1944–1949. *Clio*, (2), 85–89. EDN: <https://elibrary.ru/RWUTKV>
11. Zanevskaya, N. A., & Kholikov, I. V. (2020). Obligations of states to transfer information held about military personnel who died during an armed conflict. *Military Law*, (4), 220–228.
12. Zanevskaya, N. A., & Kholikov, I. V. (2019). International legal regulation of the treatment of the bodies of military personnel who died under armed conflict conditions. *Military Law*, (4), 285–291. EDN: <https://elibrary.ru/TAXTRL>
13. Zemlin, A. I., Naumov, P. Yu., & Shepel, R. N. (2024). Healthcare values in the language of law: Critical reflections on the ethical and legal foundations of medical triage standards in the Russian military medical service. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 23(4), 115–120. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-4023>. EDN: <https://elibrary.ru/KSLWJM>
14. Kraynyukov, P. E., Datsko, A. V., Pogosov, N. V., et al. (2024). Military medical examination and specifics of determining the causes of disability among military personnel (judicial practice). *Military Medical Journal*, 345(12), 10–15. https://doi.org/10.52424/00269050_2024_345_12_10. EDN: <https://elibrary.ru/EYBCHF>
15. Kudashkin, A., & Kholikov, I. (2023). Experience in conceptualizing special military operations in modern law. *Paths to Peace and Security*, (1), 31–47. <https://doi.org/10.20542/2307-1494-2023-1-31-47>. EDN: <https://elibrary.ru/NUQKWL>

16. Kuzmin, S. A., Vovk, O. I., Solodovnikov, V. V., & Grigorieva, L. K. (2021). The role of military medical examination in ensuring the life safety of military units. *Life Safety*, (1), 14–17. EDN: <https://elibrary.ru/WJCNXZ>
17. Kuzminykh, A. L. (2023). Cherepovets prisoner of war camp No. 158 (1942–1948): Structure, contingent composition, and production activities. *Historia Provinciae — Journal of Regional History*, 7(4), 1405–1477. <https://doi.org/10.23859/2587-8344-2023-7-4-7>. EDN: <https://elibrary.ru/IMKIHV>
18. Kulikov, V. V., Dvoryanchikov, N. A., & Yachuk, V. N. (2010). Oversight of military medical examination. *Bulletin of Roszdravnadzor*, (S1), 36–37. EDN: <https://elibrary.ru/LAFIWD>
19. Markdorf, N. M. (2012). Medical and sanitary support for foreign prisoners of war and internees in camps and work battalions in Western Siberia: 1943–1950. *Bulletin of Omsk University*, (3), 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/PGKSWN>
20. Memetov, S. S., Potapov, N., Muteva, T. A., & Yakushev, A. A. (2015). On independent medical examination. *Bulletin of the All-Russian Society of Specialists in Medical and Social Expertise, Rehabilitation, and the Rehabilitation Industry*, (3), 6–9. EDN: <https://elibrary.ru/VKPPXF>
21. Memetov, S. S., Silenko, L. V., Pogosyan, G. E., & Potapov, V. N. (2017). Medical examination: Status, prospects, and problems. *Bulletin of the All-Russian Society of Specialists in Medical and Social Expertise, Rehabilitation, and the Rehabilitation Industry*, (2), 5–9. EDN: <https://elibrary.ru/YRMOTO>
22. Mironov, V. G., Makiev, R. G., Mironov, I. V., et al. (2024). Features of concussive blast injury in modern combat conditions: Etiopathogenesis, clinical presentation, and military medical examination. *Russian Otorhinolaryngology*, 23(6), 125–136. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2024-6-125-136>. EDN: <https://elibrary.ru/QYCSAL>
23. Myznikov, I. L., Ustimenko, L. I., Trofimova, A. Yu., & Burtsev, N. N. (2013). Military medical examination of conscripts and its quality. *Problems of Social Hygiene, Healthcare, and History of Medicine*, (3), 32–36.
24. Naumov, P. Yu., Bolshakova, V. M., Zemlin, A. I., & Kholikov, I. V. (2021). Conceptual aspects of conducting medical examinations when appealing in court against conclusions based on the results of military medical examination. *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>
25. Naumov, P. Yu., & Kholikov, I. V. (2023). Characteristics of the legal framework for conducting military medical examination in the troops of the National Guard 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>
26. Naumov, P. Yu., Baranova, N. N., Kholikov, I. V., & Kuptsov, S. A. (2023). Comprehensive study of the legal foundations and problematic issues of providing first aid

- to military personnel. *Disaster Medicine*, (3), 57–64. <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2023-3-57-64>. EDN: <https://elibrary.ru/LQLOAC>
27. 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>
28. Naumov, P. Yu., Kholikov, I. V., & Soldatov, S. K. (2024). Conceptualization of the term “military medical examination” in an interdisciplinary context. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(1), 422–445. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-1071>. EDN: <https://elibrary.ru/DOFVTM>
29. Naumov, P. Yu., Kholikov, I. V., & Utyuganov, A. A. (2024). Legal issues of maintaining medical confidentiality during military medical (flight medical) examination. *Aerospace and Environmental Medicine*, 58(6), 108–116. <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2024-58-6-108-116>. EDN: <https://elibrary.ru/HKATHU>
30. 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>
31. Sidorenko, V. A. (2016). Military medical examination in the internal affairs bodies of the Russian Federation. *Medical Bulletin of the Ministry of Internal Affairs*, (4), 2–3. EDN: <https://elibrary.ru/WFEDDH>
32. Sogiyaynen, A. A., Shchepin, V. O., Telnova, E. A., & Chicherin, L. P. (2017). Current legal and organizational problems of licensing military medical examination. *Problems of Social Hygiene, Healthcare, and History of Medicine*, 25(5), 290–294. <https://doi.org/10.18821/0869-866X-2017-25-5-290-294>. EDN: <https://elibrary.ru/ZXPDA>
33. Spiridonova, L. M. (2018). The wounded and sick continued to be listed as part of the army: The military medical support system in the Penza Governorate (1914–1917). *Military Historical Journal*, (10), 16–22. EDN: <https://elibrary.ru/XZUEIX>
34. Tikhonov, A. V. (2016). Organization of medical care for prisoners of war in the Kaluga and Tula governorates during the First World War. *Bulletin of Tver State University. Series: History*, (1), 109–120.
35. Kholikov, I. V., & Vovkodav, V. S. (2017). Human factor in flight safety: Military legal aspects. *Military Law*, (6), 177–179.
36. Kholikov, I. V., & Damaskin, O. V. (2018). Problematic issues of legal regulation of flight medical examination in Russia. *Representative Power — XXI Century: Legislation, Comments, Problems*, (3), 10–13. EDN: <https://elibrary.ru/YWUKDX>
37. Kholikov, I. V., & Zhdanov, K. V. (2015). Assistance to the Republic of Guinea in combating the Ebola hemorrhagic fever epidemic. *Military Medical Journal*, (2), 93–95. EDN: <https://elibrary.ru/WCBFTZ>

38. Kholikov, I. V., Shafalinov, V. A., Volgin, A. R., & Yakovlev, S. V. (2007). Activities of medical service forces and assets in emergency response (Experience of the Russian military medical contingent in the Republic of Indonesia). *Military Medical Journal*, 328(3), 10–13. EDN: <https://elibrary.ru/HZPHKZ>
39. Kholikov, I. V., & Naumov, P. Yu. (2024). Knowledge translation and criteria of scientific rigor: Concepts of modern military law theory. *State and Law*, (1), 100–116. <https://doi.org/10.31857/S1026945224010101>. EDN: <https://elibrary.ru/LQLFNW>
40. Khrapylina, L. P., Datsko, A. V., Koryakin, S. V., & Kabalin, A. P. (2019). On the professional standard for a specialist in military medical examination. *Medical Bulletin of the Ministry of Internal Affairs*, (6), 7–15. EDN: <https://elibrary.ru/XAMAAZ>
41. Chaplyuk, A. L., Brovkin, S. G., Kalmanov, A. S., & Bulavin, V. V. (2015). Problems of military medical examination for military personnel suffering from chronic obstructive pulmonary disease. *Military Medical Journal*, 336(2), 15–21. EDN: <https://elibrary.ru/WCBFHR>
42. Chernov, D. A., Sviglo, D. Ch., Lyatos, I. A., & Novoseletsky, V. A. (2017). Organization and conduct of military medical examination of citizens studying under reserve officer training programs at military departments and military faculties. *Military Medicine*, (4), 6–8.
43. Churilov, Yu. K., Chaplyuk, A. L., Brovkin, S. G., & Vovkodav, V. S. (2018). From the history of military medical examination in Russia. *Military Medical Journal*, 339(4), 69–77. EDN: <https://elibrary.ru/YWYANC>
44. Shapovalov, V. A. (2016). Features of conducting military medical examination in the Republic of Crimea. *Medical Bulletin of the Ministry of Internal Affairs*, (4), 4–6.
45. Yakovlev, S. S., Kholikov, I. V., & Batyr, V. A. (2000). On the medical and legal aspects of international humanitarian law (to the 190th anniversary of the birth of N. I. Pirogov). *Military Medical Journal*, 321(11), 47–51. EDN: <https://elibrary.ru/ZBKHIL>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Наумов Петр Юрьевич, кандидат педагогических наук, помощник начальника госпиталя по правовой работе – начальник отделения правового обеспечения; старший научный сотрудник отдела научно-стратегического развития первичной медико-санитарной помощи
ФГКУЗ «Главный военный клинический госпиталь войск национальной гвардии Российской Федерации»; ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации
Вишняковское шоссе, влад. 101, микрорайон Никольско-Архангельский, г. Балашиха, Московская область, 143914, Российская Федерация; Петрове-ригский переулок, 10, стр. 3, г. Москва, 101990, Российская Федерация
petr.naumov.777@mail.ru

Холиков Иван Владимирович, доктор юридических наук, профессор, главный научный сотрудник центра международного права и сравнительно-правовых исследований, профессор кафедры международного права; профессор 25 кафедры

*ФГНИУ «Институт законодательства и сравнительного правоведения при Правительстве Российской Федерации»; ФГКВОУ ВО «Военный университет имени князя Александра Невского» Минобороны России
ул. Большая Черемушкинская, 34, г. Москва, 117218, Российская Федерация;
ул. Большая Садовая, 14, г. Москва, 123001, Российская Федерация
iv_kholik@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Petr Y. Naumov, Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Head of the Hospital for Legal Work – Head of the Legal Support Department; Senior Researcher, Department of Scientific and Strategic Development of Primary Health Care
Main military clinical hospital of the National Guard troops of the Russian Federation; National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine

101, Vishnyakovskoye highway, Nikolsko-Arkhangelsky microdistrict, Balashikha, Moscow region, 143914, Russian Federation; 10/3, Petroverigsky Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation

petr.naumov.777@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2875-2322>

SPIN-code: 2750-3053

Ivan V. Kholikov, Doctor of Law, Professor, Chief Researcher, Center for International Law and Comparative Legal Studies, Professor, Department of International Law; Professor, Department 25

Institute of Legislation and Comparative Law under the Government of the Russian Federation; Prince Alexander Nevsky Military University

34, Bolshaya Cheremushkinskaya Str., Moscow, 117218, Russian Federation; 14, Bolshaya Sadovaya Str., Moscow, 123001, Russian Federation

iv_kholik@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0421-5829>

SPIN-code: 7311-5596

Поступила 15.04.2025

После рецензирования 17.05.2025

Принята 21.05.2025

Received 15.04.2025

Revised 17.05.2025

Accepted 21.05.2025

Здравоохранение и профилактическая медицина / Public Health and Preventive Medicine

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1377](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1377)EDN: [OCJLVZ](https://www.edn.ru/OCJLVZ)

УДК 618.145-07-08



Эффективность гормональной и негормональной терапии при аномальном маточном кровотечении: фокус на безопасность и качество жизни

Т.В. Панина, А.Н. Сулима

*Ордена Трудового Красного Знамени Медицинский институт
им. С. И. Георгиевского ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
им. В. И. Вернадского», Симферополь, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Аномальное маточное кровотечение (АМК) является одной из самых распространенных проблем в практике врача акушера-гинеколога, существенно влияющего на качество жизни женщин репродуктивного возраста. Актуальность АМК характеризуется расширенным списком этиологических факторов и их потенциальным негативным влиянием на физическое, эмоциональное и социальное составляющие здоровья пациенток. АМК приводят к развитию железодефицитной анемии и снижают качество жизни женщин, что обуславливает социальную и клиническую значимость этих проблем.

Цель исследования. Проанализировать и обобщить результаты исследований, посвященных эффективности гормональной и негормональной терапии при АМК и оценить ее влияние на безопасность и качество жизни пациенток с учетом возраста, причины кровотечения, а также баланса пользы и риска лекарственных препаратов.

Материалы и методы. В поисковых базах eLIBRARY.ru, КиберЛенинка, Web of Science, Scopus, PubMed/MEDLINE отбирали статьи за период 1990–2024 гг., посвященные эффективности гормональной и негормональной терапии при АМК и ее влияние на безопасность и качество жизни пациенток по ключевым словам: «аномальное маточное кровотечение», «гормональная терапия», «негормональное лечение», «безопасность», «качество жизни», «abnormal uterine bleeding», «hormonal therapy», «non-hormonal treatment», «safety», «quality of life». Для исключения пропуска подходящих статей методологический фильтр не применялся. Включены полнотекстовые источники и обзоры литературы по изучаемой темати-

ке, исключены статьи, прямо не относящиеся к тематике гормональной и негормональной терапии при АМК. Чтобы избежать включения в литературный обзор дублирующихся публикаций, в случае обнаружения двух статей одних и тех же авторов, был изучен период исследования каждого автора, и, если даты совпадали, выбирали самую последнюю по дате публикацию.

Результаты. В настоящее время для лечения АМК используются как медикаментозные, так и оперативные методы лечения. Медикаментозная терапия подразделяется на негормональную и гормональную. Выбор препаратов обусловлен выраженностью симптоматики, репродуктивными планами женщины и другими факторами. Важно отметить, что хирургическое вмешательство, хотя и может быть необходимым в некоторых случаях, однако не должно рассматриваться как единственный способ решения проблемы. Понимание этих аспектов является важным для формирования правильного подхода к лечению.

Выводы. АМК, бесспорно, является сложной клинической проблемой, требующей индивидуализированного подхода к диагностике и лечению. Ключевым аспектом эффективного менеджмента АМК является комплексный подход, учитывающий не только медицинские, но и социально-экономические аспекты этого состояния.

Ключевые слова: аномальное маточное кровотечение; гормональная терапия; негормональное лечение; безопасность; качество жизни; научный обзор

Для цитирования. Панина, Т. В., & Сулима, А. Н. (2026). Эффективность гормональной и негормональной терапии при аномальном маточном кровотечении: фокус на безопасность и качество жизни. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 373–387. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1377>

Efficacy of hormonal and non-hormonal therapy for abnormal uterine bleeding: focus on safety and quality of life

T.V. Panina, A.N. Sulima

*Order of the Labor Red Banner Medical institute named after: S. I. Georgievsky
of V. I. Vernadsky CFU, Simferopol, Russian Federation*

Abstract

Background. Abnormal uterine bleeding (AUB) is one of the most common problems in the practice of an obstetrician-gynecologist, significantly affecting the quality of life of women of reproductive age. The relevance of AUB is characterized by an extended list of etiological factors and their potential negative impact on the physical, emotional and social components of patients' health. AUB leads to the development of

iron deficiency anemia and reduces the quality of life of women, which determines the social and clinical significance of these problems.

Purpose. To analyze and summarize the results of studies on the effectiveness of hormonal and non-hormonal therapy for AUB and to assess its impact on the safety and quality of life of patients taking into account age, cause of bleeding, as well as the balance of benefits and risks of drugs.

Materials and methods. The search databases eLIBRARY.ru, CyberLeninka, Web of Science, Scopus, PubMed/MEDLINE were used to select articles for the period 1990–2024 devoted to the effectiveness of hormonal and non-hormonal therapy for AUB and its impact on the safety and quality of life of patients using the keywords: “abnormal uterine bleeding”, “hormonal therapy”, “non-hormonal treatment”, “safety”, “quality of life”. No methodological filter was used to exclude the omission of suitable articles. Full-text sources and literature reviews on the topic under study were included, articles that were not directly related to the topic of hormonal and non-hormonal therapy for AUB were excluded. To avoid including duplicate publications in the literature review, in the event of two articles by the same authors being found, the period of each author’s study was studied, and if the dates coincided, the most recent publication was selected.

Results. Currently, both drug and surgical methods of treatment are used to treat AMC. Drug therapy is divided into non-hormonal and hormonal. The choice of drugs is determined by the severity of symptoms, the woman’s reproductive plans and other factors. It is important to note that surgery, although it may be necessary in some cases, should not be considered the only way to solve the problem. Understanding these aspects is important for forming the right approach to treatment.

Conclusion. AUB is undoubtedly a complex clinical problem that requires an individualized approach to diagnosis and treatment. The key aspect of effective AMC management is an integrated approach that takes into account not only medical but also socio-economic aspects of this condition.

Keywords: abnormal uterine bleeding; hormonal therapy; non-hormonal treatment; safety; quality of life; scientific review

For citation. Panina, T. V., & Sulima, A. N. (2026). Efficacy of hormonal and non-hormonal therapy for abnormal uterine bleeding: focus on safety and quality of life. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 373–387. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1377>

Введение

Общепринято, что оценка нормального менструального цикла основана на нескольких ключевых характеристиках: частота, продолжительность, регулярность, объем, наличие межменструальных и дополнительных

внеплановых кровянистых выделений [4; 7]. Аномальное маточное кровотечение (АМК) представляет собой комплексную гинекологическую патологию, характеризующуюся отклонениями от физиологической нормы по параметрам регулярности, частоты, объема кровопотери и продолжительности. Эта патология также включает межменструальные кровотечения [1; 7].

Нормальная менструация характеризуется периодичностью в 21-45 дней, продолжительностью менее 8 дней и колебания временных рамок цикла в пределах 7 дней [3]. Важно заметить, что типичное менструальное кровотечение отрицательно сказывается на качестве жизни женщины. Для объективной оценки объема менструальной кровопотери используется шкала Higham J. M. и соавт. (2005), которая позволяет определить интенсивность кровотечения на основе количества использованных средств гигиены и степени их наполнения [18]. На изменения менструального цикла влияет большое количество факторов - эмоции, настроение, стресс, нарушения сна, колебания веса и другие.

Актуальность АМК характеризуется расширенным списком этиологических факторов и их потенциальным негативным влиянием на физическое, эмоциональное и социальное составляющие здоровья пациенток. АМК приводят к развитию железодефицитной анемии и снижают качество жизни женщин, что обуславливает социальную и клиническую значимость этих проблем. В обзоре проанализированы и обобщены результаты исследований, посвященные эффективности гормональной и негормональной терапии при АМК и ее влияние на безопасность и качество жизни пациенток. В настоящее время для лечения АМК используются как медикаментозные, так и оперативные методы лечения. Медикаментозная терапия подразделяется на гормональную, включая комбинированные оральные контрацептивы, прогестины, а также негормональные подходы, такие как транексамовая кислота и нестероидные противовоспалительные препараты (НПВС). Выбор препаратов обусловлен выраженностью симптоматики, репродуктивными планами женщины и другими факторами. Изучена современная специальная медицинская литература, представленная в электронных библиотеках eLibrary и КиберЛенинка, базе данных медико-биологических публикаций PubMed.

Цель исследования. Оценить эффективность гормональной и негормональной терапии при аномальном маточном кровотечении в аспекте на безопасность и качество жизни.

Материалы и методы

В настоящем обзоре, на основании анализа специальной отечественной и зарубежной литературы, размещенной в электронных библиотеках eLibrary и КиберЛенинка, базе данных медико-биологических публикаций PubMed, проанализированы и обобщены результаты исследований, посвященные эффективности гормональной и негормональной терапии при АМК и ее влияние на безопасность и качество жизни пациенток. Показана необходимость дифференцированного подхода к выбору терапии с учетом возраста, причины кровотечения, а также баланса пользы и риска лекарственных препаратов.

Результаты и их обсуждение

Классификация АМК по системе PALM-COEIN (PALM-COEIN system of AUB classification). АМК классифицируется на хроническую и острую формы. Хроническое АМК определяется как аномальное кровотечение по объему, регулярности и/или длительности, и в свою очередь наблюдается обычно в течение последних 6 месяцев. Острое АМК характеризуется однократным эпизодом интенсивного кровотечения, требующего немедленного медицинского вмешательства.

Международная федерация гинекологии и акушерства (FIGO) разработала классификацию причин АМК, всем известную как PALM-COEIN [4; 7; 20].

Первая часть (PALM) характеризует структурные образования: Р (полип), А (аденомиоз), L (лейомиома), М (малигнизация/злокачественное новообразование), а вторая (COEIN) – неструктурные: Со (коагулопатия), О (дисфункция овуляции), Е (патология эндометрия), I (ятрогенные факторы), а также те, которые не были классифицированы другим способом – N (неклассифицированная). Чаще всего у пациентки могут отмечаться одновременно несколько причин возникновения АМК, что затрудняет диагностику и лечение.

Система PALM-COEIN позволяет систематизировать менеджмент АМК, учитывая разнообразие этиологических факторов и возможные комбинации. Это способствует более точной диагностике и персонализированному подходу к терапии, что крайне важно для эффективного лечения данного состояния [18].

Современные методы диагностики АМК (Modern methods of AUB diagnosing). Непосредственно диагностика АМК требует комплексного подхода, учитывающего разнообразие этиологических факторов и инди-

видуальных особенностей каждой пациентки. Постоянное развитие доказательной медицины и внедрение в ее сферы разнообразных инноваций способствует совершенствованию диагностических методов, что, в свою очередь, улучшает качество жизни женщин с АМК [22].

Гематологические обследования включают общий анализ крови, который считается обязательным и основным для первичной оценки состояния пациентки. Дополнительные исследования, такие как определение уровня ферритина, не рекомендованы как рутинная практика, однако могут быть назначены при наличии клинических показаний.

Биопсия эндометрия не является обязательной процедурой для всех женщин с АМК, но рекомендована лицам с высоким риском гиперплазии эндометрия или злокачественных новообразований. Именно биопсия считается методом диагностики первой линии у женщин в возрасте старше 40 лет. Также эта процедура рекомендована женщинам младше 40 лет, но с длительным влиянием эстрогенов (например, при ожирении или при том же синдроме поликистозных яичников), а также при неэффективности лечения или постоянном регулярно повторяющемся аномальном кровотечении [23].

В целом, современная диагностика АМК базируются также на использовании различных визуализационных методов исследования. УЗИ по-прежнему остается основным методом диагностики, благодаря его доступности, неинвазивности и информативности. Однако в некоторых случаях могут потребоваться дополнительные обследования и вмешательства такие как гистерорезектоскопия или магнитно-резонансная томография (МРТ) органов малого таза.

Согласно клиническим рекомендациям Французской национальной коллегии гинекологов и акушеров (CNGOF, 2023), женщинам с АМК, которые не получают гормональную терапию и имеют нормальные лабораторные показатели, необходимо дополнительно проводить диагностическую гистеросонографию. В случае сомнительных результатов УЗИ рекомендовано проведение гистероскопии или гистеросонографии для уточнения диагноза, особенно при подозрении на полипы или субмукозные миомы, как причины АМК.

Именно гистерорезектоскопия и гистеросонография, несмотря на их инвазивность, часто используются в амбулаторных условиях благодаря высокой диагностической ценности [15].

Влияние АМК на качество жизни женщины (The impact of AUB on the quality of women life). АМК оказывают сильное влияние на жизнь женщины, выходящее далеко за пределы чисто медицинских аспектов. Это со-

стояние играет также немаловажную роль и на социально-экономическое положение пациенток. С точки зрения физического состояния АМК может приводить к сильным длительным кровотечениям и дискомфорту. Особое место в патогенезе принадлежит высокой распространенности дефицита железа и железодефицитной анемии, ассоциированных с АМК, которые часто недооцениваются в клинической практике. Эти сопряженные с кровотечением состояния могут существенно ухудшать общее самочувствие женщины и ее трудоспособность.

Психологические последствия АМК также значительны. У лиц с АМК часто наблюдаются слабость и раздраженность, что может быть связано как с анемией, так и с общим влиянием кровотечений на качество жизни. Кроме того, АМК может приводить к снижению самооценки и ухудшению эмоционального состояния.

Нельзя не упомянуть о социальных аспектах влияния АМК. Это состояние может приводить возникновению внутренних конфликтов, к напряжению в межличностных отношениях, отрицательно сказываться на социальных связях и даже может спровоцировать социальную изоляцию из-за физических и психических симптомов. Женщины с АМК могут избегать многих видов активностей или ситуаций из-за страха непредсказуемого кровотечения.

Экономические последствия АМК для пациенток могут быть существенными. Они включают прямые затраты на средства гигиены и лечения, а также непосредственные затраты, связанные с потерей заработка из-за пропусков работы. Кроме того, АМК может негативно влиять на перспективы трудоустройства и карьерного роста, особенно в профессиях, где постоянное физическое присутствие крайне необходимо.

На общественном уровне экономические последствия АМК связаны с понижением производительности труда значительной части рабочей силы. Напоследок, не стоит забывать об экологических проблемах, коррелирующих с утилизацией средств гигиены, используемых при АМК.

Следовательно, в контексте современной системы здравоохранения важно рассматривать АМК не только как индивидуальную проблему женщин, а как состояние, влияющее на общество в целом. Именно поэтому такой существенный масштаб проблемы указывает на необходимость комплексного рассмотрения АМК с учетом всех аспектов влияния на жизнь женщин и общество в целом [24].

Стандарты терапии АМК: фокус на эффективность и безопасность (Standards of AUB therapy: focus on efficacy and safety). Лечение АМК

включает в себя фармакологические и хирургические методы, выбор которых зависит от этиологии, возраста пациентки и ее репродуктивных планов. Фармакологические методы представлены антифибринолитиками, нестероидными противовоспалительными препаратами (НПВП), комбинированными оральными контрацептивами (КОК), левоноргестрел-содержащей внутриматочной системой (ЛНГ-ВМС), агонистами гонадотропин-рилизинг гормона (ГнРГ). Хирургические методы подразумевают гистерорезектоскопию, абляцию эндометрия, эмболизацию маточных артерий и гистерэктомию [5; 14; 17; 21].

При обнаружении полипа как результата сочетанной гиперплазии эндометрия, в том числе в пери- и постменопаузе, рекомендовано его удаление с последующим патогистологическим исследованием, при этом полипэктомия с помощью гистерорезектоскопии является методом выбора, особенно у молодых женщин. В случае множественных полипов важно исключить злокачественные новообразования [2; 9; 13; 19].

Лечение АМК вследствие аденомиоза зависит от репродуктивных планов пациентки. У женщин, планирующих беременность, первой линией терапии является назначение прогестагенов в циклическом режиме. Агонисты ГнРГ могут использоваться в качестве второй линии терапии. У женщин, не планирующих беременность, может рассматриваться КОК (при необходимости в контрацепции), ЛНГ-ВМС и пролонгированный режим использования агонистов ГнРГ в сочетании с возвратной терапией препаратами для непрерывного режима менопаузальной гормонотерапии при лечении более 6 месяцев, а в случае неэффективности консервативной терапии, а также наличия противопоказаний к ней – трансвагинальная или лапароскопическая гистерэктомия [5; 27; 28].

При возникновении кровотечения вследствие субмукозной лейомиомы размером менее 4 см рекомендована гистероскопическая миомэктомия, в то время как в случае более крупных лейомиом показана лапароскопическая или трансабдоминальная миомэктомия. При интрамуральных лейомиомах применяют ЛНГ-ВМС, транексамовую кислоту, КОК или НПВП [12; 26].

ЛНГ-ВМС является средством первой линии лечения АМК, однако его эффективность составляет около 60%. При неэффективности ЛНГ-ВМС принимают гемостатические препараты (транексамовая кислота) и КОК. В случае неэффективности консервативной терапии также рассматривается хирургическое лечение [5; 25].

Купирование кровотечения, вызванного гиперплазией эндометрия, зависит от наличия атипии. При атипической гиперплазии показана ги-

стерэктомия. В случае гиперплазии без атипии первой линией терапии является ЛНГ-ВМС. При противопоказаниях к ЛНГ-ВМС используют оральные прогестины. КОК могут использоваться в качестве препаратов второй линии в сочетании с потребностями пациентки в контрацепции [11; 16].

При АМК, связанной с коагулопатиями, гиперпролактинемией рассматривается как гормональная, так и негормональная терапия после консультации с гематологом. В случае овуляторной дисфункции препаратами первой линии являются прогестины и КОК [6; 8].

Прогестины считаются первой линией лечения АМК, особенно при ановуляторных кровотечениях. Наибольшую эффективность показала ЛНГ-ВМС посредством уменьшения интенсивности менструальных кровотечений.

При выборе медикаментозной терапии следует оценивать безопасность, эффективность, индивидуальную непереносимость и экономическую рентабельность. Эффективность лечения следует оценивать каждые три месяца, а при неэффективности следует сразу же назначать альтернативный препарат выбора.

Гистерэктомия, как крайний метод лечения рассматривается только в случаях профузного персистирующего маточного кровотечения при сочетанной патологии эндометрия, не отвечающего на медикаментозную терапию, или при недостаточной эффективности предыдущих вмешательств. В случае, когда решено провести гистерэктомию, предпочтение следует отдавать лапароскопическому доступу как методу первой линии [1; 3; 10].

Заключение

АМК, бесспорно, является сложной клинической проблемой, требующей индивидуализированного подхода к диагностике и лечению. Ключевым аспектом эффективного менеджмента АМК является комплексный подход, учитывающий не только медицинские, но и социально-экономические аспекты этого состояния.

Междисциплинарный подход, включающий взаимодействие гинекологов, врачей ультразвуковой диагностики, репродуктологов, эндокринологов и психологов, играет ключевую роль в оптимизации исходов терапии АМК. Такой подход обеспечивает всестороннюю оценку состояния пациентки и позволяет разработать индивидуальную стратегию лечения, направленную на улучшение качества жизни и репродуктивного здоровья.

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

Информация о спонсорстве. Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Работа выполнена без спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Ищенко, А. И., Унанян, А. Л., Сидорова, И. С., Никитина, Н. А., & Чушков, Ю. В. (2021). *Акушерство и гинекология*. Медицинское информационное агентство. 1034 с.
2. Савельева, Г. М., Аполихина, И. А., Баранов, И. И., Сухих, Г. Т., & Серов, В. Н. (2019). *Акушерство и гинекология. Клинические рекомендации*. ГЭОТАР-Медиа. 719 с.
3. Савельева, Г. М., Сухих, Г. Т., Серов, В. Н., Радзинский, В. Е., & Манухин, И. Б. (2020). *Гинекология. Национальное руководство*. ГЭОТАР-Медиа. 1008 с.
4. Савельева, Г. М., Сухих, Г. Т., Серов, В. Н., Радзинский, В. Е., & Манухин, И. Б. (2022). *Гинекология. Национальное руководство*. ГЭОТАР. 1008 с.
5. Калинкина, О. Б. (2021). Эффективность внутриматочного контрацептива, содержащего левоноргестрел (Мирены) при терапии обильных менструальных кровотечений. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*, 23(7), 80–85. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-7-80-85>. EDN: <https://elibrary.ru/WUZDVK>
6. Министерство здравоохранения Российской Федерации. (2024). *Клинические рекомендации «Аменорея и олигоменорея»*. Получено 28 мая 2025 г. с https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/644_2
7. Министерство здравоохранения Российской Федерации. (2024). *Клинические рекомендации «Аномальные маточные кровотечения»*. Получено 28 мая 2025 г. с https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/645_2
8. Министерство здравоохранения Российской Федерации. (2016). *Клинические рекомендации «Гиперпролактинемия»*. Получено 28 мая 2025 г. с <https://diseases.medelement.com/disease/%D0%B3%D0%B8%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D1%8F-%D0%BA%D1%80-%D1%80%D1%84-2016/16719?ysclid=m52qzj7uj1202210544>
9. Министерство здравоохранения Российской Федерации. (2021). *Клинические рекомендации «Менопауза и климактерическое состояние у женщины»*. Получено 28 мая 2025 г. с https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/117_2
10. Радзинский, В. Е., Хамошина, М. Б., & Раевская, О. А. (2024). *Очерки эндокринной гинекологии*. StatusPraesens. 672 с.

11. Шестакова, И. Г., Хамошина, М. Б., Лебедева, М. Г., & Осьмакова, А. А. (2015). Терапевтические возможности левоноргестрел-выделяющей внутриматочной системы у женщин в перименопаузе. *Фарматека*, (3), 66–70. EDN: <https://elibrary.ru/TRSMKX>
12. O'Brien, S. H., Saini, S., Ziegler, H., Christian-Rancy, M., Ahuja, S., Hege, K., Savelli, S. L., & Vesely, S. K. (2019). An open-label, single-arm, efficacy study of tranexamic acid in adolescents with heavy menstrual bleeding. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 32(3), 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.jpbg.2019.01.009>
13. Singh, S., Best, C., Dunn, S., Leyland, N., & Wolfman, W. L. (2018). Abnormal uterine bleeding in pre-menopausal women. *Journal of Obstetrics and Gynaecology Canada*, 40(5), 391–415. <https://doi.org/10.1016/j.jogc.2018.03.007>
14. Achanna, K. S., & Nanda, J. (2022). Evaluation and management of abnormal uterine bleeding. *Medical Journal of Malaysia*, 77(3), 374–383.
15. Bazot, M., & Darāi, E. (2018). Role of transvaginal sonography and magnetic resonance imaging in the diagnosis of uterine adenomyosis. *Fertility and Sterility*, 109, 389–397.
16. Lethaby, A., Wise, M. R., Weterings, M. A., Bofill Rodriguez, M., & Brown, J. (2019). Combined hormonal contraceptives for heavy menstrual bleeding. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2(2), CD000154. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD000154.pub3>. EDN: <https://elibrary.ru/LHJHXT>
17. Heikinheimo, O. (2017). The current status of hormonal therapies for heavy menstrual bleeding. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 40, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2017.01.001>
18. Higham, J. M., O'Brien, P. M., & Shaw, R. W. (1990). Assessment of menstrual blood loss using a pictorial chart. *British Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 97(8), 734–739. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0528.1990.tb16249.x>
19. Grubman, J., Mora, V., Nguyen, M., Ladwig, N., Chen, L. M., & Jacoby, V. (2023). Impact of abnormal uterine bleeding care in premenopausal patients prior to endometrial malignancy diagnosis. *Gynecologic Oncology Reports*, 50, 101292. <https://doi.org/10.1016/j.gore.2023.101292>. EDN: <https://elibrary.ru/AZSDBZ>
20. Jain, V., Munro, M. G., & Critchley, H. O. D. (2023). Contemporary evaluation of women and girls with abnormal uterine bleeding: FIGO Systems 1 and 2. *International Journal of Gynaecology and Obstetrics*, 162(Suppl. 2), 29–42. <https://doi.org/10.1002/ijgo.14946>. EDN: <https://elibrary.ru/QWFMKR>
21. Marnach, M. L., & Laughlin-Tommaso, S. K. (2019). Evaluation and management of abnormal uterine bleeding. *Mayo Clinic Proceedings*, 94(2), 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2018.12.012>

22. Munro, M. G. (2017). Practical aspects of the two FIGO systems for management of abnormal uterine bleeding in the reproductive years. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 40, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2016.09.011>
23. Munro, M. G., Critchley, H. O. D., & Fraser, I. S. (2019). The two FIGO systems for normal and abnormal uterine bleeding symptoms and classification of causes of abnormal uterine bleeding in the reproductive years: 2018 revisions. *International Journal of Gynaecology and Obstetrics*, 144(2), 237. <https://doi.org/10.1002/ijgo.12709>
24. Narice, B. F., Delaney, B., & Dickson, J. M. (2018). Endometrial sampling in low-risk patients with abnormal uterine bleeding: a systematic review and meta-synthesis. *BMC Family Practice*, 19(1), 135. <https://doi.org/10.1186/s12875-018-0817-3>. EDN: <https://elibrary.ru/MXDIQC>
25. Srivaths, L. V., Dietrich, J. E., Yee, D. L., Sangi-Haghpeykar, H., & Mahoney, D., Jr. (2015). Oral tranexamic acid versus combined oral contraceptives for adolescent heavy menstrual bleeding: A pilot study. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 28(4), 254–257. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2014.12.012>
26. Vannuccini, S., Petraglia, F., Carmona, F., Calaf, J., & Chapron, C. (2024). The modern management of uterine fibroids-related abnormal uterine bleeding. *Fertility and Sterility*, 122(1), 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2024.04.041>. EDN: <https://elibrary.ru/WXPIKM>
27. Whitaker, L., & Critchley, H. O. (2016). Abnormal uterine bleeding. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 34, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2015.11.012>
28. Wouk, N., & Helton, M. (2019). Abnormal uterine bleeding in premenopausal women. *American Family Physician*, 99(7), 435–443.

References

1. Ishchenko, A. I., Unanyan, A. L., Sidorova, I. S., Nikitina, N. A., & Chushkov, Yu. V. (2021). *Obstetrics and gynecology*. Meditsinskoe Informatsionnoe Agentstvo. 1034 p.
2. Savelyeva, G. M., Apolikhina, I. A., Baranov, I. I., Sukhikh, G. T., & Serov, V. N. (2019). *Obstetrics and gynecology: Clinical guidelines*. GEOTAR-Media. 719 p.
3. Savelyeva, G. M., Sukhikh, G. T., Serov, V. N., Radzinsky, V. E., & Manukhin, I. B. (2020). *Gynecology: National guidelines*. GEOTAR-Media. 1008 p.
4. Savelyeva, G. M., Sukhikh, G. T., Serov, V. N., Radzinsky, V. E., & Manukhin, I. B. (2022). *Gynecology: National guidelines*. GEOTAR. 1008 p.
5. Kalinkina, O. B. (2021). The efficacy of a levonorgestrel-releasing intrauterine system (Mirena) in the treatment of heavy menstrual bleeding. *Medical and Pharmaceutical Journal "Puls"*, 23(7), 80–85. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-7-80-85>. EDN: <https://elibrary.ru/WUZDVK>

6. Ministry of Health of the Russian Federation. (2024). *Clinical guidelines “Amenorrhea and oligomenorrhea”*. Retrieved May 28, 2025, from https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/644_2
7. Ministry of Health of the Russian Federation. (2024). *Clinical guidelines “Abnormal uterine bleeding”*. Retrieved May 28, 2025, from https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/645_2
8. Ministry of Health of the Russian Federation. (2016). *Clinical guidelines “Hyperprolactinemia”*. Retrieved May 28, 2025, from <https://diseases.medelement.com/disease/%D0%B3%D0%B8%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D1%8F-%D0%BA%D1%80-%D1%80%D1%84-2016/16719?ysclid=m52qzj7uj1202210544>
9. Ministry of Health of the Russian Federation. (2021). *Clinical guidelines “Menopause and the climacteric state in women”*. Retrieved May 28, 2025, from https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/117_2
10. Radzinsky, V. E., Khamoshina, M. B., & Raevskaya, O. A. (2024). *Essays on endocrine gynecology*. StatusPraesens. 672 p.
11. Shestakova, I. G., Khamoshina, M. B., Lebedeva, M. G., & Osmakova, A. A. (2015). Therapeutic potential of the levonorgestrel-releasing intrauterine system in perimenopausal women. *Farmateka*, (3), 66–70. EDN: <https://elibrary.ru/TRSMKX>
12. O'Brien, S. H., Saini, S., Ziegler, H., Christian-Rancy, M., Ahuja, S., Hege, K., Savelli, S. L., & Vesely, S. K. (2019). An open-label, single-arm, efficacy study of tranexamic acid in adolescents with heavy menstrual bleeding. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 32(3), 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.jpbg.2019.01.009>
13. Singh, S., Best, C., Dunn, S., Leyland, N., & Wolfman, W. L. (2018). Abnormal uterine bleeding in pre-menopausal women. *Journal of Obstetrics and Gynaecology Canada*, 40(5), 391–415. <https://doi.org/10.1016/j.jogc.2018.03.007>
14. Achanna, K. S., & Nanda, J. (2022). Evaluation and management of abnormal uterine bleeding. *Medical Journal of Malaysia*, 77(3), 374–383.
15. Bazot, M., & Daraï, E. (2018). Role of transvaginal sonography and magnetic resonance imaging in the diagnosis of uterine adenomyosis. *Fertility and Sterility*, 109, 389–397.
16. Lethaby, A., Wise, M. R., Weterings, M. A., Bofill Rodriguez, M., & Brown, J. (2019). Combined hormonal contraceptives for heavy menstrual bleeding. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2(2), CD000154. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD000154.pub3>. EDN: <https://elibrary.ru/LHJHXT>
17. Heikinheimo, O. (2017). The current status of hormonal therapies for heavy menstrual bleeding. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 40, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2017.01.001>

18. Higham, J. M., O'Brien, P. M., & Shaw, R. W. (1990). Assessment of menstrual blood loss using a pictorial chart. *British Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 97(8), 734–739. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0528.1990.tb16249.x>
19. Grubman, J., Mora, V., Nguyen, M., Ladwig, N., Chen, L. M., & Jacoby, V. (2023). Impact of abnormal uterine bleeding care in premenopausal patients prior to endometrial malignancy diagnosis. *Gynecologic Oncology Reports*, 50, 101292. <https://doi.org/10.1016/j.gore.2023.101292>. EDN: <https://elibrary.ru/AZSDBZ>
20. Jain, V., Munro, M. G., & Critchley, H. O. D. (2023). Contemporary evaluation of women and girls with abnormal uterine bleeding: FIGO Systems 1 and 2. *International Journal of Gynaecology and Obstetrics*, 162(Suppl. 2), 29–42. <https://doi.org/10.1002/ijgo.14946>. EDN: <https://elibrary.ru/QWFMKR>
21. Marnach, M. L., & Laughlin-Tommaso, S. K. (2019). Evaluation and management of abnormal uterine bleeding. *Mayo Clinic Proceedings*, 94(2), 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2018.12.012>
22. Munro, M. G. (2017). Practical aspects of the two FIGO systems for management of abnormal uterine bleeding in the reproductive years. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 40, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2016.09.011>
23. Munro, M. G., Critchley, H. O. D., & Fraser, I. S. (2019). The two FIGO systems for normal and abnormal uterine bleeding symptoms and classification of causes of abnormal uterine bleeding in the reproductive years: 2018 revisions. *International Journal of Gynaecology and Obstetrics*, 144(2), 237. <https://doi.org/10.1002/ijgo.12709>
24. Narice, B. F., Delaney, B., & Dickson, J. M. (2018). Endometrial sampling in low-risk patients with abnormal uterine bleeding: a systematic review and meta-synthesis. *BMC Family Practice*, 19(1), 135. <https://doi.org/10.1186/s12875-018-0817-3>. EDN: <https://elibrary.ru/MXDIQC>
25. Srivaths, L. V., Dietrich, J. E., Yee, D. L., Sangi-Haghpeykar, H., & Mahoney, D., Jr. (2015). Oral tranexamic acid versus combined oral contraceptives for adolescent heavy menstrual bleeding: A pilot study. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 28(4), 254–257. <https://doi.org/10.1016/j.jpag.2014.12.012>
26. Vannuccini, S., Petraglia, F., Carmona, F., Calaf, J., & Chapron, C. (2024). The modern management of uterine fibroids-related abnormal uterine bleeding. *Fertility and Sterility*, 122(1), 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2024.04.041>. EDN: <https://elibrary.ru/WXPIKM>
27. Whitaker, L., & Critchley, H. O. (2016). Abnormal uterine bleeding. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 34, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2015.11.012>
28. Wouk, N., & Helton, M. (2019). Abnormal uterine bleeding in premenopausal women. *American Family Physician*, 99(7), 435–443.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Панина Татьяна Витальевна, врач-ординатор кафедры акушерства, гинекологии и перинатологии № 1

*Ордена Трудового Красного Знамени Медицинский институт им. С. И. Георгиевского ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»
бул. Ленина, 5/7, г. Симферополь, , 295051, Российская Федерация
taniapanina11111@gmail.com*

Сулима Анна Николаевна, д.мед.н., профессор, профессор кафедры акушерства, гинекологии и перинатологии № 1

*Ордена Трудового Красного Знамени Медицинский институт им. С. И. Георгиевского ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»
бул. Ленина, 5/7, г. Симферополь, , 295051, Российская Федерация
gsulima@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tatyana V. Panina, Resident Physician of the Department of Obstetrics, Gynecology and Perinatology № 1

*Order of the Labor Red Banner Medical institute named after S. I. Georgievsky of V. I. Vernadsky CFU
5/7, Lenin Ave., Simferopol, 295051, Russian Federation
taniapanina11111@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1190-8367>*

Anna N. Sulima, Dr. Sci. (Med), Professor, Professor of the Department of Obstetrics, Gynecology and Perinatology № 1

*Order of the Labor Red Banner Medical institute named after S. I. Georgievsky of V. I. Vernadsky CFU
5/7, Lenin Ave., Simferopol, 295051, Russian Federation
gsulima@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2671-6985>*

Поступила 29.05.2025

После рецензирования 01.07.2025

Принята 08.07.2025

Received 29.05.2025

Revised 01.07.2025

Accepted 08.07.2025

Здравоохранение и профилактическая медицина / Public Health and Preventive Medicine

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1388](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1388)

EDN: [ONHQUEQ](https://edn.ru/ONHQUEQ)

УДК 614.2



Информационные технологии управления для решения прикладных задач внутреннего контроля качества наркологической службы региона

А.В. Ахохова^{1,2,3}, М.Х. Тлакадугова²,
М.Б. Хуламханова², А.М. Отарова², А.М. Атгоева², М.Р. Гоплачева²,
Д.А. Геляева², А.Р. Акубеков², С.Ю. Шоменова²

¹ООО Фирма «СЭМ», Нальчик, Российская Федерация

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
Нальчик, Российская Федерация

³Государственное бюджетное учреждение здравоохранения
«Республиканский клинический центр психиатрии и наркологии»
Минздрава КБР, Нальчик, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Поиск механизмов совершенствования и саморазвития субъектов управления антинаркотической политики, способных накапливать и использовать прошлый опыт, исследовать механизмы, лежащие в основе процессов развития и устойчивости, позволит получать синергетические эффекты, превышающие совокупный результат суммы слагающих его факторов.

Целью исследования является решение прикладных задач организации и управления процессами внутреннего контроля качества с использованием информационных технологий в наркологической службе региона для поиска единых подходов к оценке эффективности проводимых профилактических мероприятий.

Материалы и методы. Материалами исследования стали исследования отечественных и зарубежных ученых, связанных с системным анализом в разных отраслях деятельности. Поиск научных работ для анализа, посвященных изучаемой проблеме, проводился в базах данных Medline, Cochrane Controlled Trials Register и других. Выборка исследовательских статей осуществлялась

из электронных баз данных Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU и информационно-коммуникационной сети «Интернет» за период времени с 1999 по 2025 гг.

Результаты. Авторами сделано заключение, что согласованность целей и критериев оценки проводимых мероприятий стейкхолдерами в рамках внутреннего контроля качества обусловлена эффективным администрированием, организацией и управлением технологическими процессами в медицинской организации наркологического профиля посредством автоматизированного системного управления. Для решения комплекса задач, поставленных перед стейкхолдерами медицинской организации региона, необходимо создание единого информационного пространства, обеспечивающего создание автоматизированных рабочих мест для владельцев ресурсов, процессов и их операторов.

Единая корпоративная информационная среда в медицинской организации обеспечивает достижение целей, направленных на организацию и управление процессами внутреннего контроля качества медицинской помощи.

Эффективность управляемости процессов внутреннего контроля качества в медицинской организации может быть оценена на основе соблюдения принципов горизонтальной и вертикальной оптимизации (сжатия) процессов, а также централизации (децентрализации).

Заключение. Информационное пространство медицинской организации является оперативным полем для анализа текущей ситуации, корректировки плановых показателей и оценки адекватности модели оперативного, тактического, стратегического планирования управленческой деятельности.

Уровень оценки качества, определённый по результатам оперативного реагирования, позволит предположить возможности интеграции к непостоянным средам влияния, пересмотреть порядок информационного взаимодействия и повысить гармонизацию выполняемых операций. Изложенное способствует принятию стратегически верных решений, направленных на модернизацию существующих процессов или/и созданию новых моделей управления.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления; корпоративная информационная среда; синергетические эффекты; стейкхолдеры; антинаркотическая политика; наркологическая служба региона

Для цитирования. Ахохова, А. В., Тлакадугова, М. Х., Хуламханова, М. Б., Отарова, А. М., Агтоева, А. М., Гоплачева, М. Р., Геляева, Д. А., Акубеков, А. Р., & Шогенова, С. Ю. (2026). Информационные технологии управления для решения прикладных задач внутреннего контроля качества наркологической службы региона. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 388–413. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1388>

Information management technologies for solving applied problems of internal quality control in the regional drug addiction service

A.V. Akhokhova^{1,2,3}, M.Kh. Tlakadugova²,
M.B. Khulamkhanova², A.M. Otarova², A.M. Attoeva², M.R. Goplacheva²,
D.A. Gelyaeva², A.R. Akubekov², S.Yu. Shogenova²

¹*Firma SEM LLC, Nalchik, Russian Federation*

²*Kabardino-Balkarian State University*

named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russian Federation

³*Republican Clinical Center for Psychiatry and Narcology,
Nalchik, Russian Federation*

Abstract

Background. The search for mechanisms for improving and self-developing the subjects of anti-drug policy management, capable of accumulating and using past experience, exploring the mechanisms underlying the processes of development and sustainability, will allow obtaining synergistic effects exceeding the combined result of the sum of its constituent factors.

The aim of the study is to solve applied problems of organizing and managing internal quality control processes using information technologies in the regional narcological service to find common approaches to assessing the effectiveness of preventive measures.

Materials and methods. The study materials are the studies of domestic and foreign scientists associated with system analysis in various fields of activity. The search for scientific papers for analysis devoted to the problem under study was carried out in databases Medline, Cochrane Controlled Trials Register and others. The selection of research articles was carried out from electronic databases of the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU and the information and communication network “Internet” for the period from 1999 to 2025.

Results. The authors concluded that the consistency of the goals and criteria for assessing the activities carried out by stakeholders within the framework of internal quality control is due to effective administration, organization and management of technological processes in a medical organization of the narcological profile through automated system management. To solve a set of tasks set before the stakeholders of a regional medical organization, it is necessary to create a single information space that ensures the creation of automated workplaces for resource owners, processes and their operators.

A single corporate information environment in a medical organization ensures the achievement of goals aimed at organizing and managing internal quality control processes in medical care.

The efficiency of manageability of internal quality control processes in a medical organization can be assessed based on the principles of horizontal and vertical optimization (compression) of processes, as well as centralization (decentralization).

Conclusion. The information space of a medical organization is an operational field for analyzing the current situation, adjusting planned indicators and assessing the adequacy of the operational, tactical, strategic planning model of management activities. The level of quality assessment determined by the results of operational response will allow us to assume the possibilities of integration into non-permanent influence environments, revise the order of information interaction and increase the harmonization of operations performed. The above contributes to the adoption of strategically correct decisions aimed at modernizing existing processes or/and creating new management models.

Keywords: automated control systems; corporate information environment; synergistic effects; stakeholders; anti-drug policy; regional drug addiction service

For citation. Akhokhova A. V., Tlakadugova M. Kh., Khulamkhanova M. B., Otarova A. M., Attoeva A. M., Goplacheva M. R., Gelyaeva D. A., Akubekov A. R., Shogenova S. Yu. (2026). Information management technologies for solving applied problems of internal quality control in the regional drug addiction service. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 388–413. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1388>

Введение

Практическая реализация основных направлений Концепции государственной антинаркотической политики Российской Федерации [10; 11] осуществляется в рамках утвержденной Указом Президента РФ от 23 ноября 2020 г. № 733 Стратегии [7; 18; 20].

Решение стратегических задач антинаркотической политики и реализация мер по профилактике и раннему выявлению незаконного потребления наркотиков, их совершенствование возможно при консолидации усилий общества и субъектов системы профилактики на всех уровнях управления [1].

Формирование единой системы комплексной антинаркотической профилактической деятельности должно осуществляться на общих методологических основаниях и подходах к оценке ее эффективности [9], с созданием и внедрением системы информационных технологий управления, что можно назвать императивом системы обеспечения безопасности общества и государства.

Ключевое место медицинской организации (далее – МО) наркологического профиля региона, по мнению, авторов обусловлено множественностью взаимосвязей и зависимостей с субъектами системы профилактики наркотизма и является центром принятия решений [5; 16].

По мнению авторов, требования по обеспечению и повышению уровня организации оказания медицинской помощи возможно реализовать только полностью, консолидировав процессы оперативного руководства в целостной автоматизированной системе управления (далее – АСУ).

Регуляция задач внедрения строится на системном подходе к проектированию, идентификации ее элементов, в синтезе этапов жизненного цикла программного обеспечения в зависимости от вида деятельности: функциональной, информационной, программной, технической, организационной [19].

Успех реализации задач антинаркотической направленности в регионе определяется показателем уровня внедрения автоматизированного системного управления [6; 12]. АСУ ориентировано на сопровождение основных и вспомогательных технологических процессов комплексной работы и обеспечение автоматизации процессов стратегического, тактического, оперативного уровней управления в медицинской организации [13].

Поэтому консолидация системы многоуровневого управления в медицинской организации в условиях правовых, организационно-экономических и иных ограничений, направленных на повышение доступности и качества оказания наркологической помощи населению региона, предусматривает необходимость:

- согласования целей и критериев оценки проводимых антинаркотических мероприятий всеми субъектами профилактики в МО (стейкхолдеры);
- формулирование класса задач, способствующих осуществлению замысла;
- подведение итогов синтеза сведений (при направлении с нижнего на верхний уровень) или их дифференцировка (с верхнего на нижний уровень);
- обретение единого синергетического эффекта, который превосходит сумму эффектов отдельных субъектов профилактики.

Принимая во внимание вышеизложенное *целью настоящей статьи*, является решение прикладных задач организации и управления процессами внутреннего контроля качества с использованием информационных технологий в наркологической службе для поиска единых подходов к оценке эффективности проводимых профилактических мероприятий в регионе.

Согласованность целей и критериев оценки проводимых мероприятий стейкхолдерами в рамках внутреннего контроля качества обусловлена эффективным администрированием, организацией и управлением технологическими процессами в медицинской организации наркологического профиля посредством АСУ.

В определенном смысле складывается многоуровневая человеко-машинная система, которая выполняет задачи благодаря совместной работе программного обеспечения и сотрудников медицинской организации.

Поэтому для представления единого процесса с одной стороны необходимо понимание широты охвата состава всех стейкхолдеров, их требований по отношению к процессам наркопрофилактики, и между собой, с другой - техническими возможностями АСУ. Это потребует постоянного (циклического) повторения как отдельных шагов процесса, так и всего процесса интеграции в целом для нахождения оптимального соотношения ресурсов и потребностей.

Траекторию формирования единого процесса взаимодействия стейкхолдеров схематично можно представить в виде рис. 1.



Рис. 1. Идентификация, планирование, управление и контроль за процессами взаимодействия стейкхолдеров для создания АСУ
Fig. 1. Identification, planning, management, and monitoring of stakeholder interaction processes for the development of an automated control system

В контексте рассмотрения предмета исследования, *субъектами* профилактики являются врачи, заведующие структурными подразделениями, заместители главного врача и руководитель в пределах предоставленных им полномочий в медицинской организации наркологической службы региона.

Непрямыми *объектами* исследования являются – процессы, реализуемые субъектами системы профилактики, направленные на реализацию клинических рекомендаций, Критериев качества медицинской помощи [8], стандартов медицинской помощи посредством АСУ.

Основными *объектами* являются лица, наиболее подверженные риску вовлечения в незаконные потребление и оборот наркотических средств или психотропных веществ.

Для выстраивания архитектуры пользовательского приложения АСУ в рамках проведения внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности необходимо реализовать несколько этапов (шагов), которые позволят формализовать подходы и стандартизировать интерфейс для всех структурных подразделений МО, потенциальных стейкхолдеров.

Во-первых, необходимо признать и определить требования стейкхолдеров-субъектов, чьи действия (бездействия) окажут положительные или/и негативные эффекты на реализацию задач внутреннего контроля (рис. 2).

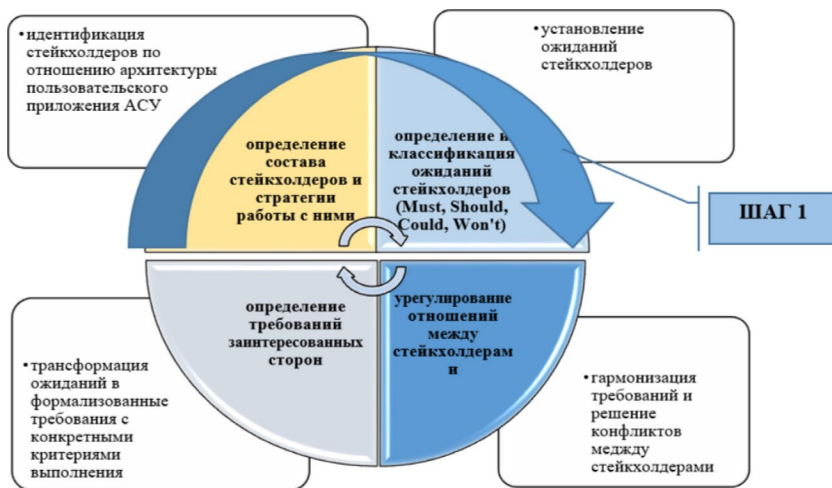


Рис. 2. Идентификация стейкхолдеров МО, участвующих в мероприятиях по наркопрофилактике в регионе с использованием АСУ

Fig. 2. Identification of MO stakeholders involved in drug prevention activities in the region using an automated control system

Вторым шагом является разделение ответственности и распределение руководящих ролей среди стейкхолдеров (рис. 3).

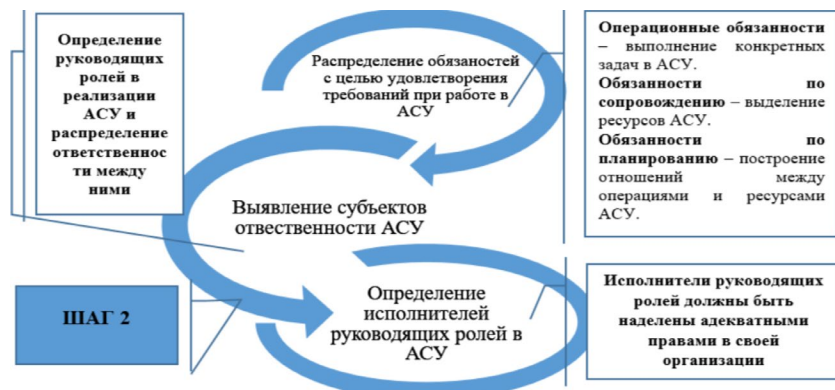


Рис. 3. Разделение ответственности и распределение ролей между стейкхолдерами МО с использованием АСУ

Fig. 3. Division of Responsibilities and Allocation of Roles Among MO Stakeholders Using an Automated Control System

Третьим шагом является определение и анализ рисков с их последующим распределением между исполнителями стейкхолдерами (рис. 4).

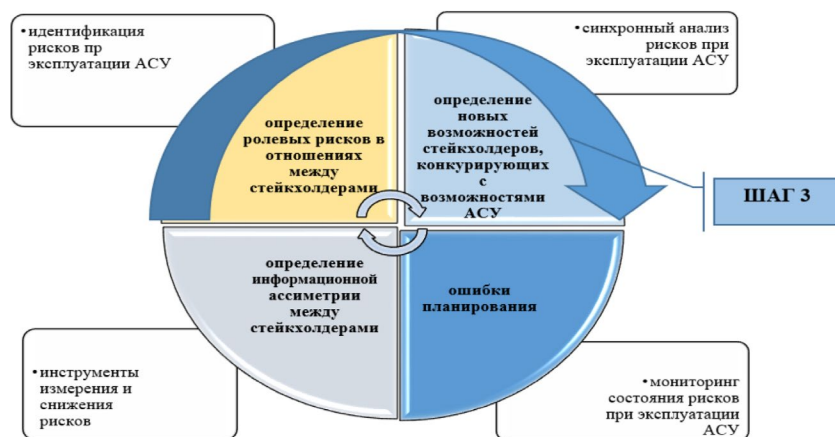


Рис. 4. Определение ролевых рисков и возможностей между стейкхолдерами МО с использованием АСУ

Fig. 4. Identification of role-based risks and opportunities among MO stakeholders using an automated control system

Четвертый заключительный шаг – построение взаимоотношений между исполнителями стейкхолдерами в АСУ (рис. 5).



Рис. 5. Построение взаимоотношений между стейкхолдерами МО с использованием АСУ

Fig. 5. Establishing Relationships Among MO Stakeholders Using an Automated Control System

Таким образом, представленный формальный подход определяет этапность развития и задает пути совершенствования АСУ посредством:

- анализа состава ролей стейкхолдеров для стратегирования задач,
- расстановки приоритетов «обязательно-желательно-неплохо бы иметь» (MoSCoW) [14] для категоризации требований,
- разделения ответственности и распределения ролей между стейкхолдерами,
- определения ролевых рисков и возможностей стейкхолдеров,
- построения взаимоотношений между стейкхолдерами.

Необходимо осознавать, что в ходе планирования, реализации, интеграции АСУ для стейкхолдеров МО, участвующих в мероприятиях, направленных на наркопрофилактику в субъекте, трансформации могут подвергаться все составляющие: роли, ожидания, критерии оценки, риски и др. Это неизбежно ведет к изменению стейкхолдерского состава, требований, ожиданий, отношений к друг другу и техническим возможностям АСУ. Данное обстоятельство потребует проведения текущих итераций, как

в отношении отдельных шагов процесса, так и всего процесса в целом в рамках развития постоянного цикла и совершенствования АСУ.

В итоге единый процесс совершенствования взаимоотношений стейкхолдеров АСУ можно представить схематично в виде цикла развития (рис. 6).

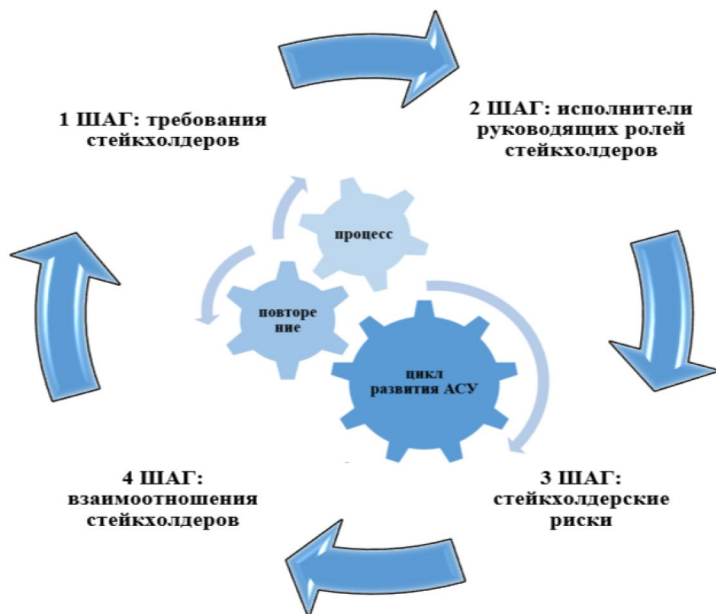


Рис. 6. Цикл процессов развития отношений стейкхолдеров в АСУ

Fig. 6. The Cycle of Stakeholder Relationship Development Processes in an Automated Control System

Для решения комплекса задач, поставленных перед стейкхолдерами МО региона необходимо единое информационное пространство, обеспечивающее автоматизированные рабочие места для врачей и аудиторов, уполномоченных по качеству.

Единая корпоративная информационная среда в МО обеспечивает достижение целей, направленных на организацию и управление процессами внутреннего контроля качества.

Функциональная, информационная, техническая, программная и организационная согласованность при интеграции АСУ предполагает совместимость организационно-экономических и технических объектов [8].

Ранее авторами [2] представлен региональный опыт реализации внутреннего контроля качества в медицинской организации по профилю «психиатрия и наркология», направленный на селективный поиск лучшего решения с помощью АСУ. Механизм реализации заключался в практическом воплощении веб-сервиса программной системы со стандартизированным интерфейсом «СИНЕРГИЯ V-1», оптимизирующего и автоматизирующего процессы анализа внутреннего контроля качества структурными подразделениями МО наркологического профиля региона.

Вместе с тем, исследователями отмечено [3], что построение эффективной системы документационного обеспечения может быть воспроизведено в любой медицинской организации, не зависимо от профиля, условий, вида и формы оказания медицинских услуг.

Стратегически важным является формирование корпоративной информационной среды управления в МО, которая предполагает целостность процессов сбора, хранения, обработки, преобразования, передачи и обновления информации с применением программного обеспечения и средств коммуникаций. С одной стороны, это открывает возможности адекватной оценки единства и фактического состояния МО в режиме реального времени, с другой – понимание потребности в ресурсах для текущего поддержания организационно-технологической модели управления организацией.

Информационное пространство МО становится оперативным полем в рамках которого реализуются разнообразные функции стейкхолдеров, корректируются показатели для текущего формирования адекватной модели для реализации показателей управленческой деятельности в рамках стратегического и тактического планирования.

В условиях перманентных изменений норм законодательной базы и непрерывно совершенствующихся технологических процессов управления в МО, пользовательский, антропоцентрический подход [4] становится приоритетным, что смещает акценты с «горизонтального» управления функциональными подразделениями, регулированием сквозными «вертикальными» процессами, объединяющих деятельность объекта в одно целое.

Отличительной особенностью корпоративных информационных систем является усовершенствование взаимосвязанных процессов в МО в целом, а не отдельных функций управления, что открывает и обеспечивает процессы обратной разработки (реверс-инжиниринга) на тактическом, оперативном и стратегическом уровнях.

Оперативность в решении задач на местах, *динамичность* изменений тактических планов, *адекватность* коммуникаций и *синхронизация*

выполняемых операций приводят к принятию *стратегически* верных решений, направленных на модернизацию существующих процессов или/и созданию новых моделей управления.

Для создания и реализации единой корпоративной информационной среды в МО изначально должны быть рассмотрены вопросы методического характера, которые последовательно будут предлагать решения задач управления с помощью интеграции АСУ (рис. 7).

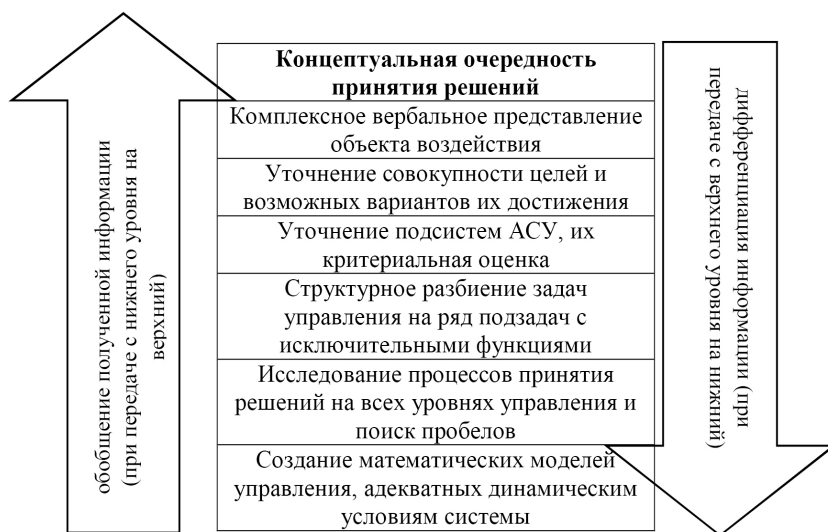


Рис. 7. Концептуальная очередность принятия решений при создании корпоративной среды в МО

Fig. 7. Conceptual sequence of decision-making in establishing a corporate environment at the Ministry of Defense

Эффективность управляемости процессов внутреннего контроля качества в МО может быть оценена на основе принципов горизонтальной и вертикальной оптимизации (уплотнения) процессов, а также централизации (децентрализации).

При горизонтальной оптимизации процессов каждая ступень осуществляется заведующим структурным подразделением МО (1 уровень контроля), т.е. совокупность нескольких управленческих процессов формируют одно многофункциональное автоматизированное рабочее место (АРМ), которое является составной единицей корпоративной среды МО.

Так, процессная оптимизация процессов оценки уровня качества лечения (далее - УКЛ) пациента на соответствие предъявляемым требованиям Клинических рекомендаций [15], стандартов, Критериев качества медицинской помощи [17] формально может быть представлена следующим образом (рис. 8).

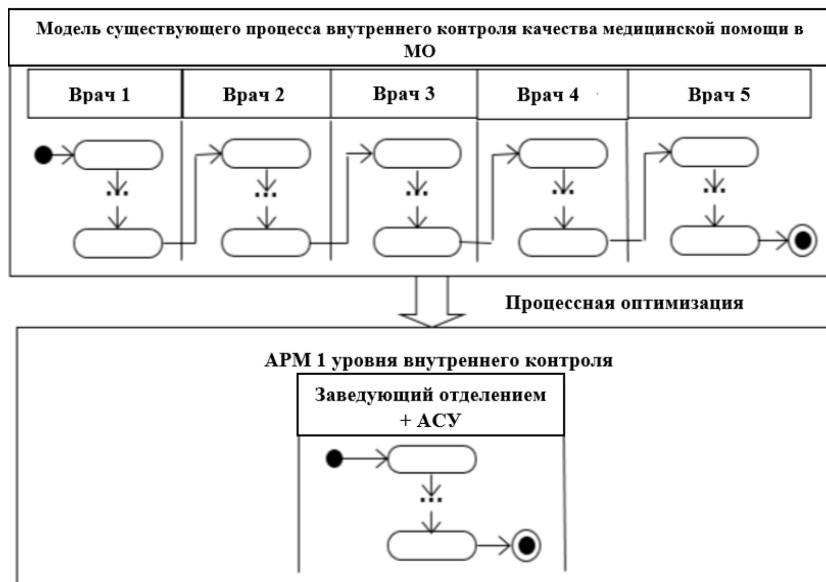


Рис. 8. Горизонтальная оптимизация процессов внутреннего контроля качества (АРМ 1 уровня)

Fig. 8. Horizontal Optimization of Internal Quality Control Processes (Level 1 Workstation)

Положительными результатами данного решения являются: уменьшение количества врачей, осуществляющих контроль; интенсификация выполнения процессов; снижение общего пула ошибок; повышение уровня персональной ответственности. Технологизация большинства операций в одном АРМ 1 позволяет аккумулировать выполнение множества разнообразных функций одним субъектом, что оптимизирует объем данных сокращая их избыточность.

Вертикальная оптимизация процессов включает формирование и регулирование выполнения процессов в функциональных узлах, где исполнитель должен согласовывать решения в сложившейся иерархической структуре соподчинения МО, но в итоге решение принимает самостоятельно (рис. 9).

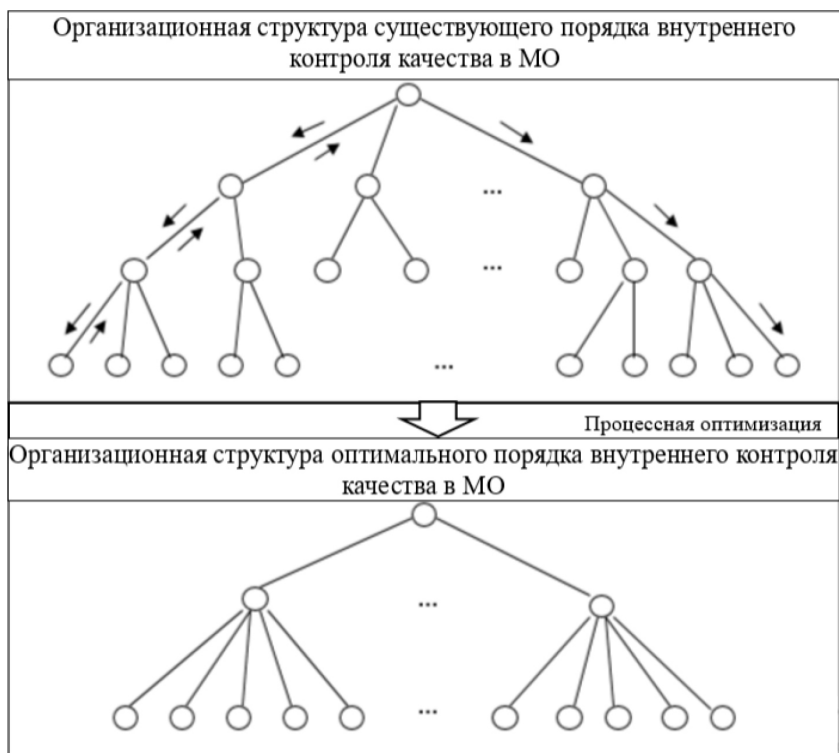


Рис. 9. Вертикальная оптимизация процессов внутреннего контроля качества (АРМ 1 уровня)

Fig. 9. Vertical Optimization of Internal Quality Control Processes (Level 1 Workstation)

«Вертикальная» рационализация процессов путем сжатия включает организацию и управление выполнения процессами двух- или трехуровневой архитектуры («пользователь-сервер») на основе АСУ, систем управления потоками работ и распределением баз данных.

Взаимодействие врачей МО осуществляется через базы данных, посредством которых осуществляется обмен информацией. Изменения отражаются в текущем режиме времени, постоянно и оказываются доступными для всех заинтересованных сторон системы управления качеством одновременно. АСУ обеспечивает управление потоками работ оперативно направляя результаты выполненных операций следующим соисполнителям (АРМ 2 уровня, заместитель главного врача).

Положительными эффектами такого последствия становится уменьшение: количества управленцев, временных издержек, стоимости; а также активизация процессов обратной реакции на запросы от потребителей услуг: пациента(ов), врача(ей), руководителя(ей).

Ранее исследователями [3] уже описана многоуровневая функциональная структура архитектуры программы ЭВМ АСУ «СИНЕРГИЯ V-1», которая открывает возможности иерархической оценки УКЛ: врача, заведующего отделением, структурного подразделения и медицинской организации в целом (рис. 10).



Рис. 10. Функциональная иерархическая структура оценки УКЛ с использованием программы ЭВМ АСУ «СИНЕРГИЯ V-1»

Fig. 10. Functional hierarchical structure for assessing the UCL using the “SYNERGY V-1” automated control system software.

Источник: составлено авторами по данным [2]

Комплексный централизованный/децентрализованный способ руководства процессами демонстрирует согласованность исполнения составных частей процесса территориально-распределенными структурными подразделениями МО на основе использования компонентной технологии программных интерфейсов (рис. 11).

Возможности смешанного подхода с одной стороны предполагают автономную работу структурных подразделений МО, с другой стороны,

координацию действий за счет возможности использования централизованных данных АСУ (нормативные правовые акты, справочники МКБ-10, номенклатуры медицинских услуг).



Рис. 11. Смешанный подход (централизованное/децентрализованное принятие решений) АСУ

Fig. 11. Hybrid Approach (Centralized/Decentralized Decision-Making) in an Automated Control System

Преимуществами децентрализации являются возможности оперативного принятия решений, оптимального контакта с исполнителями и др., централизация же способствует согласованности принятых решений.

Достоверность сведений, содержащихся в АСУ, достигается за счет установления единого источника данных и ответственных лиц за процессами оперативного и верного внесения информации, наравне с технологическими условиями контроля и обработки результатов. Единая точка контакта осуществляется на уровне уполномоченного лица по контролю за качеством оказания медицинской помощи (рис. 9), что обеспечивает оптимальность использования ресурсов и исполнения требований (пациента, сотрудника, руководства).

Изложенное демонстрирует, что современные корпоративные АСУ в МО обладают свойственными для них характеристиками, имеющими преимущества эксплуатации, связанными с:

1. *Архитектурной фрагментарностью* системы, и особенностями деятельности руководящего персонала в информационном пространстве единой базы данных; *масштабом* охвата составляющих элементов функциональности системы; обладанием способностями *адаптивной настройки* принимая во внимание специфику деятельности конкретной МО; спектром возможностей наделяющих владельцев процесса и пользователей *инструментальными ресурсами* для оптимизации и развития системы; поддержкой распределенных баз данных для информационного взаимодействия всех подразделений МО, независимо от места их нахождения.

2. *Величиной размаха*, определяющему перспективы адаптации к текущим изменениям в МО и факторам сред влияния, в частности к увеличению количества АРМ без понижения эффективности работы в целом.

3. *Многоуровневостью архитектуры* («пользователь-сервер»), которая помогает рационально распределять работу между пользовательской и серверной составляющими системы.

4. *Консолидацией и компонентностью* для синтеза элементов системы необходимой конфигурации и формирования функциональности, гарантирующей выполнения требований утвержденных стандартов.

5. *Взаимодействием с веб-сервисами*, которые обеспечивают свободный выход в Интернет и открытость системы за счёт одновременной эксплуатации программных продуктов разных разработчиков.

6. *Универсальностью*, открывающей возможности поддержания современных платформ, включающих операционные системы Windows Server и Linux, а также веб-серверы Apache и Nginx. и др.

7. *Аналитическими возможностями*.

Выводы

По мнению авторов, формирование автоматизированного системного управления должно проходить поэтапно. Идентификация, планирование, управление и контроль за процессами взаимодействия стейкхолдеров определяют траекторию формирования единого процесса их взаимодействия. Так как ролевые риски, ожидания, критерии оценки стейкхолдерского состава сопряжены с техническими возможностями АСУ, то необходимо проведение текущих итераций отдельных шагов и процессов в целом в рамках развития постоянного цикла и совершенствования АСУ.

Важным является корпоративность информационной организации менеджмента в медицинской организации, обеспечивающей целостность действий по накоплению, аккумулированию, обработке, преобразованию, обмену и актуализации данных с применением программных комплексов.

Информационное пространство МО становится оперативным полем для анализа текущей ситуации, корректировки плановых показателей и оценки адекватности модели оперативного, тактического, стратегического планирования управленческой деятельности.

Критерием эффективности управляемости процессами внутреннего контроля качества в медицинской организации является оценка принципов горизонтальной и вертикальной оптимизации (сжатия) процессов, а также централизации (децентрализации). Методологические сложности, отсутствие осознанного взаимодействия не только вертикального иерархического взаимодействия, но и межведомственного «горизонтального» сотрудничества способствуют преодолению инерции развития и получению синергии, саморазвития.

Автоматизированные системы управления в медицинских организациях имеют характерные ограничения, возможности и эффекты, которые порождают синергетические связи. Коллективные действия самостоятельных составляющих системы обеспечивают возрастание суммарного эффекта, превышающего общий объем эффектов, и их элементов, которые действуют самостоятельно.

Соблюдение этических стандартов. Данный вид исследования не требует прохождения экспертизы локальным этическим комитетом.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Алимбиев, С. А., & Пушкарев, А. Л. (2021). Основные подходы к совершенствованию профилактической деятельности в отношении незаконного потребления наркотических средств и психотропных веществ: опыт Чеченской Республики. *Вестник Уральского юридического института МВД России*, (4), 119–123. EDN: <https://elibrary.ru/NDGIIR>
2. Ахохова, А. В., Тлакадугова, М. Х., Вологиров, А. С., Каралкин, П. А., Польшина, В. И., Казьмина, Е. Н., Филькина, А. Н., Начоева, А. О., Мокаев, Р. С.,

- Дебаева, Д. Б., & Тлупова, А. А. (2025). Региональный опыт реализации внутреннего контроля качества в медицинской организации по профилю «Психиатрия и наркология»: селективный поиск лучшего решения (часть I). *Менеджер здравоохранения*, (6), 29–40. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2025-6-29-40>. EDN: <https://elibrary.ru/HESOOO>
3. Ахохова, А. В., Тлакадугова, М. Х., Бетуганов, Р. Р., [и др.]. (2025). Региональный опыт реализации внутреннего контроля качества в медицинской организации по профилю «Психиатрия и наркология»: селективный поиск лучшего решения (часть II). *Менеджер здравоохранения*, (7), 26–35. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2025-7-26-35>. EDN: <https://elibrary.ru/MNAGGU>
 4. Ахохова, А. В., Нахушева, З. Х., Чочаева, М. Ж., & Гадзаева, Т. Х. (2025). Дизайн-мышление как инструмент поиска антропоцентричных инсайтов для генерации и развития инноваций в здравоохранении. Часть II. *Менеджмент качества в медицине*, (1), 89–93. EDN: <https://elibrary.ru/FZXQZO>
 5. Баранов, А. А., Альбицкий, В. Ю., Терлецкая, Р. Н., & Зелинская, Д. И. (2014). Многоуровневая система оказания медицинской помощи детскому населению. *ВСП*, (2), 5–10. EDN: <https://elibrary.ru/SBUAIR>
 6. Бурова, К. А., Ким, А. В., & Ерина, М. Ю. (2023). Организация внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности. Проблемы и пути их решения. *Медицина: теория и практика*, 8(4), 18–28. <https://doi.org/10.56871/MTP.2023.65.62.002>. EDN: <https://elibrary.ru/GGAUUB>
 7. Васильева, М. К. (2022). Стратегия государственной антинаркотической политики и риски обеспечения антинаркотической безопасности. *Глаголь правосудия*, 1(27), 5–11. EDN: <https://elibrary.ru/CGNWQW>
 8. Волкова, В. Н., & Денисов, А. А. (2003). *Основы теории систем и системного анализа* (3-е изд.). Изд-во СПбГПУ. (В источнике указаны страницы 58–61 — уточните, если это фрагмент, а не диапазон для всего издания.)
 9. Жданова, Е. В., & Королькова, О. А. (2023). Основные подходы к осуществлению антинаркотической профилактической деятельности подразделениями по контролю за оборотом наркотиков территориальных органов МВД России на региональном уровне. *Научный портал МВД России*, (3), 94–101. EDN: <https://elibrary.ru/FNGOSR>
 10. Концепция государственной антинаркотической политики Российской Федерации (утв. Федеральной службой РФ по контролю за оборотом наркотиков 16 октября 2009 г.). Получено с <https://base.garant.ru/70607928/>
 11. Коробичина, Т. В. (2021). Качество и проблемы стратегического планирования в отдельных вопросах государственной антинаркотической политики Российской Федерации. В *Противодействие наркоугрозе на современном этапе:*

- правовой и социально-гуманитарный аспекты: Материалы Международного научно-практического семинара (с. 34–38). Сибирский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации. https://doi.org/10.51980/2021_3_34. EDN: <https://elibrary.ru/INGSIQ>
12. Кучин, Н. Е., & Тюков, Ю. А. (2023). Управление качеством в медицинской организации: оценочные категории формирования результативности внутреннего контроля. *Здоровье мегаполиса*, 4(1), 50–60. <https://doi.org/10.47619/2713-2617.zm.2023.v.4i1;50-60>. EDN: <https://elibrary.ru/CZZMDC>
 13. Кисикова, С. Д. (2015). Оперативное управление в медицинских учреждениях на основе комплексной медицинской информационной системы. *Journal of Health Development*, 2(15), 63–67. EDN: <https://elibrary.ru/DGMGLF>
 14. Клегг, Д., & Баркер, Р. (1994). *Метод кейса Fast-Track: подход RAD*. Addison-Wesley.
 15. Клинические рекомендации. Получено с <https://cr.minzdrav.gov.ru/clin-rec>
 16. Писарева, О. М. (2021). Модель целеполагания в многоуровневом государственном стратегическом управлении социально-экономическим развитием. (название журнала не указано), 1(92), 52–76. [https://doi.org/10.33293/1609-1442-2021-1\(92\)-52-76](https://doi.org/10.33293/1609-1442-2021-1(92)-52-76). EDN: <https://elibrary.ru/CKJOZG>
 17. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 10 мая 2017 г. № 203н «Об утверждении критериев оценки качества медицинской помощи». Получено с <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71575880/>
 18. Всемирная организация здравоохранения. (2016). *Руководство по национальной политике и стратегии в области качества: практический подход к разработке политики и стратегии в целях повышения качества медицинской помощи*. ISBN: 978-92-4-456556-8. Получено с <https://www.who.int/ru/publications/i/item/9789241565561>
 19. Сельма, Нама. (2021). Организация и механизм управления учреждений здравоохранения. *Инновации и инвестиции*, (8), 56–59. EDN: <https://elibrary.ru/PYOASG>
 20. Указ Президента РФ от 23 ноября 2020 г. № 733 «Об утверждении Стратегии государственной антинаркотической политики Российской Федерации на период до 2030 года». Получено с <https://base.garant.ru/74938781/>

References

1. Alimpiev, S. A., & Pushkarev, A. L. (2021). Main approaches to improving preventive activities regarding the illicit use of narcotic drugs and psychotropic substances: The experience of the Chechen Republic. *Bulletin of the Ural Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, (4), 119–123. EDN: <https://elibrary.ru/NDGIIR>

2. Akhokhova, A. V., Tlakadugova, M. Kh., Vologirov, A. S., Karalkin, P. A., Polshina, V. I., Kazmina, E. N., Filkina, A. N., Nachoeva, A. O., Mokaev, R. S., Debaeva, D. B., & Tlupova, A. A. (2025). Regional experience in implementing internal quality control in a medical organization in the field of “Psychiatry and Narcology”: A selective search for the best solution (Part I). *Healthcare Manager*, (6), 29–40. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2025-6-29-40>. EDN: <https://elibrary.ru/HESOOO>
3. Akhokhova, A. V., Tlakadugova, M. Kh., Betuganov, R. R., et al. (2025). Regional experience in implementing internal quality control in a medical organization in the field of “Psychiatry and Narcology”: A selective search for the best solution (Part II). *Healthcare Manager*, (7), 26–35. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2025-7-26-35>. EDN: <https://elibrary.ru/MNAGGU>
4. Akhokhova, A. V., Nakhushcheva, Z. Kh., Chochaeva, M. Zh., & Gadzaeva, T. Kh. (2025). Design thinking as a tool for identifying anthropocentric insights to generate and develop innovations in healthcare. Part II. *Quality Management in Medicine*, (1), 89–93. EDN: <https://elibrary.ru/FZXQZO>
5. Baranov, A. A., Albitsky, V. Yu., Terletskaya, R. N., & Zelinskaya, D. I. (2014). A multi-level system for providing medical care to the child population. *VSP*, (2), 5–10. EDN: <https://elibrary.ru/SBUAIR>
6. Burova, K. A., Kim, A. V., & Erina, M. Yu. (2023). Organization of internal quality control and safety of medical activities. Problems and ways to solve them. *Medicine: Theory and Practice*, 8(4), 18–28. <https://doi.org/10.56871/MTP.2023.65.62.002>. EDN: <https://elibrary.ru/GGAUUB>
7. Vasilieva, M. K. (2022). The strategy of the state anti-drug policy and risks to ensuring anti-drug security. *Glagol Pravosudiya*, 1(27), 5–11. EDN: <https://elibrary.ru/CGNWQW>
8. Volkova, V. N., & Denisov, A. A. (2003). *Fundamentals of systems theory and systems analysis* (3rd ed.). Publishing House of SPbSPU. (Note: the source mentions pages 58–61 – please clarify if this refers to a specific excerpt or to the entire edition.)
9. Zhdanova, E. V., & Korolkova, O. A. (2023). Main approaches to implementing anti-drug preventive activities by drug control units of territorial bodies of the Ministry of Internal Affairs of Russia at the regional level. *Scientific Portal of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, (3), 94–101. EDN: <https://elibrary.ru/FNGOSR>
10. Concept of the State Anti-Drug Policy of the Russian Federation (approved by the Federal Drug Control Service of the Russian Federation on October 16, 2009). Retrieved from <https://base.garant.ru/70607928/>
11. Korobitsina, T. V. (2021). Quality and problems of strategic planning in certain issues of the state anti-drug policy of the Russian Federation. In *Countering the Drug Threat at the Present Stage: Legal and Socio-Humanitarian Aspects: Proceedings*

- of the International Scientific and Practical Seminar* (pp. 34–38). Siberian Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation. https://doi.org/10.51980/2021_3_34. EDN: <https://elibrary.ru/INGSIQ>
12. Kuchin, N. E., & Tyukov, Yu. A. (2023). Quality management in a medical organization: Evaluation categories for forming the effectiveness of internal control. *Health of the Metropolis*, 4(1), 50–60. <https://doi.org/10.47619/2713-2617.zm.2023.v.4i1;50-60>. EDN: <https://elibrary.ru/CZZMDC>
 13. Kisikova, S. D. (2015). Operational management in medical institutions based on an integrated medical information system. *Journal of Health Development*, 2(15), 63–67. EDN: <https://elibrary.ru/DGMGLF>
 14. Clegg, D., & Barker, R. (1994). *The Fast-Track case method: The RAD approach*. Addison-Wesley.
 15. Clinical guidelines. Retrieved from <https://cr.minzdrav.gov.ru/clin-rec>
 16. Pisareva, O. M. (2021). Goal-setting model in multi-level state strategic management of socio-economic development. (*Journal title not specified*), 1(92), 52–76. [https://doi.org/10.33293/1609-1442-2021-1\(92\)-52-76](https://doi.org/10.33293/1609-1442-2021-1(92)-52-76). EDN: <https://elibrary.ru/CKJOZG>
 17. Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 203n dated May 10, 2017 “On approval of criteria for assessing the quality of medical care”. Retrieved from <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71575880/>
 18. World Health Organization. (2016). *National policy and strategy on quality: A practical approach to developing policy and strategy to improve the quality of healthcare*. ISBN: 978-92-4-456556-8. Retrieved from <https://www.who.int/ru/publications/item/9789241565561>
 19. Selma, Nama. (2021). Organization and mechanism of management of healthcare institutions. *Innovations and Investments*, (8), 56–59. EDN: <https://elibrary.ru/PYOASG>
 20. Decree of the President of the Russian Federation No. 733 dated November 23, 2020 “On approval of the Strategy of the State Anti-Drug Policy of the Russian Federation for the period up to 2030”. Retrieved from <https://base.garant.ru/74938781/>

ВКЛАД АВТОРОВ

Ахохова А.В., Тлакадугова М.Х., Хуламханова М.Б.: концепция и дизайн исследования, обзор литературы.

Тлакадугова М.Х., Отарова А.М., Геляева Д.А., Акубеков А.Р., Шогенова С.Ю.: сбор данных, анализ и интерпретация результатов.

Аттоева А.М., Гоплачева М.Р.: подготовка проекта рукописи.

Все авторы рассмотрели результаты и одобрили окончательный вариант рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Azis V. Akhokhova, Madina Kh. Tlakadugova, Milena B. Khulamkhanova: study concept and design, literature review.

Madina Kh. Tlakadugova, Alina M. Otarova, Darina A. Gelyaeva, Alim R. Akubekov, Sabina Yu. Shogenova: data collection, analysis and interpretation of results.

Aisha M. Attoeva, Milana R. Goplacheva: manuscript drafting.

All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ахохова Азис Владимировна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры общественного здоровья, здравоохранения и профилактической медицины; заместитель главного врача

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова»; ООО Фирма «СЭМ»

ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация; ул. Головки, 7а, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360017, Российская Федерация

Aza_stih@mail.ru

Тлакадугова Мадина Хажисмеловна, заведующая кафедрой нормальной и патологической анатомии человека

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова»

ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация

tla-madina@yandex.ru

Хуламханова Милена Борисбиевна, студентка

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова»

ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, Российская Федерация

mm.kh.yo@icloud.com

Отарова Алина Магомедовна, студентка

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова»

*ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация
alinaotarova3@gmail.com*

Аттоева Айша Муратовна, студентка

*ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени
Х.М. Бербекова»
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация
aisha.attoeva@icloud.com*

Гоплачева Милана Руслановна, студентка

*ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени
Х.М. Бербекова»
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация
milana.goplacheva@mail.ru*

Геляева Дарина Альбертовна, студентка

*ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени
Х.М. Бербекова»
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация
d.gelyaeva@icloud.com*

Акубеков Алим Русланович, студент

*ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени
Х.М. Бербекова»
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация
alim.akubekov@yandex.ru*

Шогенова Сабина Юрьевна, студентка

*ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени
Х.М. Бербекова»
ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика,
360004, Российская Федерация
Syushogenova@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Azis V. Akhokhova, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Public Health, Healthcare and Preventive Medicine; Deputy Chief Physician

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov; Firma SEM LLC 173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation; 7a, Golovko Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360017, Russian Federation

Aza_stih@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2370-9701>

SPIN-code: 8076-6544

Madina Kh. Tlakadugova, Head of the Department of Normal and Pathological Human Anatomy

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov 173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

tla-madina@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1329-6085>

Milena B. Khulamkhanova, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov 173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

mm.kh.yo@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4932-4274>

Alina M. Otarova, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov 173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

alinaotarova3@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5780-1384>

Aisha M. Attoeva, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov 173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

aisha.attoeva@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5925-0956>

Milana R. Goplacheva, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

milana.goplacheva@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1127-6383>

Darina A. Gelyaeva, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

d.gelyaeva@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7094-4859>

Alim R. Akubekov, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

alim.akubekov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1913-2860>

Sabina Yu. Shogenova, student

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

173, Chernyshevsky Str., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russian Federation

Syushogenova@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9318-1821>

Поступила 13.06.2025

После рецензирования 10.08.2025

Принята 07.09.2025

Received 13.06.2025

Revised 10.08.2025

Accepted 07.09.2025

Здравоохранение и профилактическая медицина / Public Health and Preventive Medicine

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1394](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1394)

EDN: [PSMHJU](https://www.edn.ru/PSMHJU)

УДК 613.6:615.9



Экспериментальная оценка эффективности биопрофилактического комплекса в условиях сочетанного действия хлорида кадмия и физической нагрузки

И.А. Минигалиева¹, Л.В. Шабардина¹, Р.Р. Сахаутдинова¹,
М.П. Сугункова^{1,2}, М.С. Унесихина¹, О.Г. Макеев²

¹ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики
и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Федеральной службы по надзору
в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Екатеринбург,
Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет»
Минздрава России, Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Уровень химической нагрузки остается стабильно высоким. Риск развития профессионально обусловленных заболеваний создается комплексным воздействием вредных производственных факторов, включая химическое загрязнение и тяжелую мышечную нагрузку. Повышение сопротивляемости организма такому воздействию важная задача для систем здравоохранения и экономики. Биологическая профилактика – один из перспективных способов решения этой задачи.

Цель – экспериментально обосновать эффективность биопрофилактического комплекса в условиях субхронической интоксикации хлоридом кадмия на фоне физической нагрузки в эксперименте на крысах.

Материалы и методы. Эксперимент проведен на крысах-самцах Wistar. Животные подвергались сочетанному действию хлорида кадмия и физической нагрузки, часть крыс – получала биопрофилактический комплекс (БПК). По окончании эксперимента оценивались гематологические, цитологические, гистологические, метаболомные показатели, а также коэффициент фрагментации ДНК. Статистическую обработку данных проводили с применением t-критерия Стьюдента ($p < 0,05$),

результаты метаболомного исследования подвергались дискриминантному и дисперсионному анализу ANOVA ($p < 0,05$).

Результаты. Анализ полученных данных выявил негативные сдвиги гематологических, цитологических, гистологических, метаболомных показателей, увеличение генетических aberrаций после воздействия изучаемых факторов, что обусловлено полисистемной токсичностью кадмия и неоднозначным влиянием физической нагрузки на процессы интоксикации. Большая часть выявленных нарушений была нивелирована применением БПК.

Заключение. Продемонстрированное протекторное действие БПК указывает на его потенциал в профилактике профессиональных патологий у лиц, подверженных сочетанному действию токсикантов и физических нагрузок.

Ограничение исследования. Экспериментальное исследование было проведено на лабораторных животных только одного биологического вида. Кадмий (в форме растворимой соли – хлорида кадмия) использовался только в одной концентрации, мышечная нагрузка – только одной интенсивности.

Ключевые слова: кадмий; физическая нагрузка; токсичность; биопрофилактика; крысы

Для цитирования. Минигалиева, И. А., Шабардина, Л. В., Сахаутдинова, Р. Р., Сутункова, М. П., Унесихина, М. С., & Макеев, О. Г. (2026). Экспериментальная оценка эффективности биопрофилактического комплекса в условиях сочетанного действия хлорида кадмия и физической нагрузки. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 414–439. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1394>

Experimental evaluation of effectiveness of a bioprophylactic complex administered during cadmium chloride exposure combined with physical exercise

I.A. Minigalieva¹, L.V. Shabardina¹, R.R. Sakhautdinova¹,
M.P. Sutunkova^{1,2}, M.S. Unesikhina¹, O.H. Makeyev²

¹*Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection
in Industrial Workers, Yekaterinburg, Russian Federation*

²*Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russian Federation*

Abstract

Background. The level of chemical load remains high. The risk of developing occupational diseases is posed by the combination of exposure to industrial hazards, including chemical pollution, and heavy muscle load. Increasing the body resistance to

such adverse impact is an important task for health care systems and the economy. Bioprophylaxis is one of the promising ways to solve this problem.

Purpose. To substantiate the effectiveness of a bioprophylactic complex administered during subchronic cadmium chloride exposure combined with physical exercise in an experiment on rats.

Materials and methods. The experiment was conducted on male Wistar rats. The animals were exposed to cadmium chloride and had physical exercise with some rats receiving a bioprophylactic complex (BPC). After exposure cessation, we assessed hematological, cytological, histological, and metabolic parameters, as well as the DNA fragmentation coefficient. The statistical data analysis was performed using the Student's *t*-test ($p < 0.05$); the results of the metabolomic study were subjected to discriminant analysis and the analysis of variance (ANOVA) ($p < 0.05$).

Results. Test results showed a number of negative post-exposure shifts in hematological, cytological, histological, and metabolomic parameters, as well as an increase in genetic aberrations related to the polysystemic toxicity of cadmium and the ambiguous effect of physical activity on poisoning. Most of the adverse effects were leveled by administration of the BPC.

Conclusion. The protective effect of BPC demonstrated in the experiment indicates its potential to prevent occupational diseases in individuals doing heavy work and being simultaneously exposed to toxicants.

Limitations of the study. The experimental study was conducted on laboratory animals of only one biological species. Cadmium (in the form of its soluble salt – cadmium chloride) was used only in one concentration while muscle load was of only one intensity.

Keywords: cadmium; physical exercise; toxicity; bioprophylaxis; rats

For citation. Minigalieva, I. A., Shabardina, L. V., Sakhautdinova, R. R., Sutunkova, M. P., Unesikhina, M. S., & Makeyev, O. H. (2026). Experimental evaluation of effectiveness of a bioprophylactic complex administered during cadmium chloride exposure combined with physical exercise. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 414–439. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1394>

Введение

Несмотря на развитие технологий, направленных на снижение химической нагрузки на работников промышленных отраслей, её уровень продолжает оставаться стабильно высоким. Загрязнение воздуха промышленных предприятий зачастую содержит большое количество соединений тяжелых металлов. Особенную опасность представляет кадмий и его соединения в связи с долгим периодом полувыведения из организма и выраженной полисистемной токсичностью, а также ввиду связи кадмия с риском воз-

никновения различных типов рака, что подтверждается многочисленными экспериментальными и эпидемиологическими данными [14].

Однако риск развития профессионально обусловленных заболеваний создается не только влиянием химической экспозиции, но и одновременным комплексным воздействием других производственных факторов: шум, вибрация, тяжелая мышечная нагрузка [21]. Такое сочетание может оказывать значительное воздействие как на токсикокинетику, так и на токсикодинамику поллютантов. Физическая нагрузка высокой интенсивности способна неоднозначно влиять на восприимчивость организма к токсическому действию [3], что обуславливает необходимость разработки подходов к повышению адаптационного потенциала организма к сочетанному действию токсикантов и факторов трудового процесса.

На сегодняшний день минимизация химической экспозиции и улучшение условий труда сохраняют свою значимость для систем здравоохранения и экономики. Биологическая профилактика – один из перспективных способов решения этой задачи. Включенные в биопротективный комплекс компоненты обладают многонаправленной активностью: усиливают естественные механизмы детоксикации, снижая внутреннюю дозу вредного вещества, нивелируют вызываемый поллютантами окислительный стресс и другие проявления интоксикации. Важной особенностью этих эффектов является их взаимосвязанность и синергизм, что обеспечивает усиление защитного действия при комплексном применении [6].

Цель исследования – экспериментально обосновать эффективность биопротективного комплекса в условиях субхронической интоксикации хлоридом кадмия на фоне физической нагрузки в эксперименте на крысах.

Материалы и методы

Эксперимент был проведен на половозрелых (3,5–4 мес.) крысах-самках линии Wistar, массой $312,36 \pm 2,65$ г (разброс по массе в пределах $\pm 10\%$). Животные содержались в специализированном помещении вивария при контролируемом микроклимате в соответствии с нормативными документами^{2,3}, для кормления использовался полнорационный комби-

² ГОСТ 33216-2014. Межгосударственный стандарт. Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. «Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами» от 9 ноября 2015 г.

³ РД-АПК 3.10.07.02-09. Рекомендательные документы «Методические рекомендации по содержанию лабораторных животных в вивариях научно-исследовательских институтов и учебных заведений» от 1 декабря 2009 г.

корм⁴, режим питания и питьевой режим был организован в свободном доступе⁵.

Для проведения исследования животные были разделены на 4 группы по 14 особей в каждой:

1. Группа «Cd+ФН» – подвергалась моделированию кадмиевой интоксикации посредством внутрибрюшинного введения 2,5-водного хлорида кадмия ($\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, кадмий хлористый 2,5 водн. ЧДА, ПО УфаХимПроект, ГОСТ 4330–76) в разовой дозе 0,77 мг/кг м.т. (1/30 ЛД₅₀); физическая нагрузка (ФН) моделировалась с использованием тредмила для крыс «TSE Treadmill System GmbH» («TSE Systems International Group», Германия), скорость 25 м/мин, 10 минут в день, 5 дней в неделю в течение 6 недель;
2. Группа «Cd+ФН+БПК» – на фоне сочетанного действия изучаемых факторов животные получали биопрофилактический комплекс (БПК).
3. Группа «БПК» – животные получали БПК с целью подтверждения его безопасности, а также инъекции физиологического раствора в объёме, эквивалентном раствору кадмия,
4. Группа «Контроль» – получала только физиологический раствор в том же объёме.

Перед началом эксперимента животные первой и второй групп прошли трёхнедельную адаптацию к тредмилу: ежедневно, в течение 5 дней (5 мин/день) осуществлялся ознакомительный бег с отключенной электро-стимуляционной площадкой, разгон осуществлялся от 8 м/мин до 22 м/мин на протяжении 3 недель (с шагом 3 м/мин).

Состав и дозировки компонентов БПК, а также форма в которой крысы получали добавку, представлены в таблице 1.

Перед выведением из эксперимента животных помещали в метаболические клетки для сбора мочи и дальнейшего проведения биохимического анализа. Выведение животных проводили методом декапитации под изофлурановым наркозом с последующей аутопсией и взвешиванием органов для регистрации массы в абсолютных величинах и в пересчёте на 100 грамм массы тела.

Кровь забирали для общего анализа на анализаторе MicroCC-20Plus (High Technology Inc, США), метаболомного анализа методом хроматомасс-спектрометрии (хроматограф Agilent 1290 Infinity II («Agilent Technologies Inc.», США)), биохимического и иммунологического иссле-

⁴ ГОСТ Р34566-2019

⁵ ГОСТ Р51232-98

дований рутинными методами и с использованием стандартных наборов, а также для выделения ДНК и проведения теста RAPD (случайная амплификация полиморфной ДНК) с помощью специализированных наборов реагентов GenElute (Sigma, Сент-Луис, Миссури, США). Содержание ДНК в образцах определялось спектрофотометрически (Ultraspec 1100 pro; Amersham Biosciences Ltd.: Amersham, Великобритания) по методике, описанной ранее [20]. Полученные данные метаболомного анализа обрабатывались в ПО Agilent MassHunter Workflow и Agilent MassHunter Navigator. Аннотацию метаболитов проводили по моноизотопной массе ($\text{ppm} < 10$), интенсивности изотопных пиков и библиотекам спектров фрагментации Human Metabolome Database [29] и LIPID MAPS [10] в ручном режиме.

Таблица 1.

Биопрофилактический комплекс, нацеленный на повышение устойчивости организма к вредным факторам производственного процесса на примере токсического действия кадмия на фоне физической нагрузки

Table 1. A bioprophylactic regimen designed to increase the body's resistance to harmful factors in the production process, using the example of the toxic effects of cadmium during physical exertion

№	Вещество	Дозировка на 1 животное
1	Глутамат натрия	1,5% раствор, с питьем, ок.160 мг
2	Пектин	с кормом, 200 мг
3	Глицин	с кормом, 12,5 мг
4	Ацетилцистеин	с кормом, 25 мг
5	Рутин	с кормом, 2,08 мг
6	Витамин С	с кормом, 2,08 мг
7	Витамин Д3	с кормом, 1,54 мкг
8	Витамин В6	с кормом, 0,41 мг
9	Витамин А	с кормом, 0,026 мг
10	Омега-3 ПНЖК	с кормом, 26,6 мг
11	Кальций	с кормом, 156 мг
12	Магний	с кормом, 4,1 мг
13	Селен	с кормом, 100 мкг

В окрашенных мазках крови проводился подсчёт доли ретикулоцитов и лейкограммы по общепринятой методике. Цитограммы печени и почек анализировали по тканевым отпечаткам с использованием светового микроскопа Carl Zeiss Primo Star на увеличении 100x и 1000x в соответствии с цитологическими критериями, подсчитывали 200 клеток с каждого мазка.

Гистоморфологическое исследование проводили по следующему алгоритму: после извлечения органы были помещены в нейтральный забуференный 10% формалин для фиксации, затем из них были вырезаны образцы толщиной около 4 мм, которые проводились по батарее изопропиловых спиртов, после парафинизировались и заливались в парафиновые блоки. Срезы толщиной 3-4 мкм, изготовленные на микротоме, окрашивались гематоксилином и эозином. Микроскопирование и морфометрические подсчеты проводили с использованием компьютерной программы Zen 3.0 при помощи светового микроскопа Carl Zeiss Primo Star.

Статистическую обработку данных проводили с применением t-критерия Стьюдента после проверки выборок на нормальность. Различия между среднегрупповыми значениями считали значимыми при $p < 0,05$. Результаты метаболомного исследования подвергались дискриминантному анализу. Данный вид анализа максимизирует различия между пробами, проецируя их на несколько компонент (векторов) в двумерном пространстве; позволяет оценить, насколько отличаются пробы в группах. Для более детального понимания был также проведен дисперсионный анализ ANOVA ($p < 0,05$).

Результаты

Оценка массовых показателей экспериментальных животных выявила в группах животных «Cd+ФН» и «Cd+ФН+БПК» статистически значимое увеличение относительных масс печени, почек и селезенки в сравнении с контрольными значениями (табл. 2).

Таблица 2.

Массовые показатели экспериментальных групп крыс ($\bar{X} \pm Sx$).

Table 2. Mass parameters of the experimental groups of rats ($\bar{X} \pm Sx$).

Показатель / Parameter	Группы экспериментальных животных / Experimental animal groups			
	Контроль / Control	Группы воздействия / Exposure groups		
		Cd + ФН / Cd + Run- ning	Cd + ФН + БПК / Cd + Running + BPC	БПК / BPC
Конечный вес животного, г	332.71 $\pm$ 4.61	333.00 $\pm$ 5.06	331.00 $\pm$ 3.60	334.21 $\pm$ 9.07
Прирост массы тела, %	7.92 $\pm$ 1.65	10.04 $\pm$ 1.78	5.13 $\pm$ 1.82	7.27 $\pm$ 2.35
Масса головного мозга, г/100г веса	0.6104 $\pm$ 0.0064	0.635 $\pm$ 0.013	0.6293 $\pm$ 0.0085	0.631 $\pm$ 0.019

Масса сердца, г/100г веса	0.327 ± 0.013	0.3243 ± 0.0070	0.3191 ± 0.0057	0.3512 ± 0.0075 ^{•○}
Масса печени, г/100г веса	2.460 ± 0.046	2.740 ± 0.028[*]	2.704 ± 0.051[*]	2.393 ± 0.024 ^{•○}
Масса селезенки, г/100г веса	0.1789 ± 0.0065	0.2104 ± 0.0069[*]	0.2143 ± 0.0090[*]	0.1676 ± 0.0030 ^{•○}
Масса почек, г/100г веса	0.5250 ± 0.0085	0.564 ± 0.013[*]	0.594 ± 0.017[*]	0.541 ± 0.011 [○]
Примечание: « [*] » - отличия от контрольной группы, « [•] » от группы Cd+ФН, « [○] » от группы Cd+ФН+БПК статистически значимые при p<0,05 по t-критерию Стьюдента.				

Результаты гематологического исследования продемонстрировали статистически значимое повышение числа лейкоцитов, моноцитов и лимфоцитов, сокращение показателей среднего содержания гемоглобина в эритроците, среднего объема эритроцита в группах, подверженных сочетанному действию факторов, при сопоставлении с контрольными показателями. В группе «Cd+ФН» отмечен рост ширины распределения тромбоцитов, числа эозинофилов, палочкоядерных нейтрофилов и процента ретикулоцитов в периферической крови. Применение БПК при сочетанном действии факторов позволило нормализовать большинство этих параметров, однако в этой группе было выявлено значительное повышение количества тромбоцитов и показателя тромбокрита (табл. 3).

Таблица 3.
Гематологические показатели экспериментальных групп крыс ($\bar{X} \pm Sx$).
Table 3. Hematological parameters of the experimental groups of rats ($\bar{X} \pm Sx$).

Table 3 - Показатель / Parameter	Группы экспериментальных животных / Experimental animal groups			
	Контроль / Control	Группы воздействия / Exposure groups		
		Cd + ФН / Cd + Run- ning	Cd + ФН + БПК / Cd + Running + BPC	БПК / BPC
Лейкоциты, 10 ⁶ /мл	1.80 ± 0.12	5.13 ± 0.39[*]	4.25 ± 0.36[*]	2.017 ± 0.083 ^{•○}
Эритроциты, 10 ¹² /мл	8.78 ± 0.22	8.96 ± 0.13	8.99 ± 0.13	8.66 ± 0.11
Гемоглобин, г/л	157.57 ± 3.26	154.71 ± 2.40	154.29 ± 2.20	157.64 ± 1.74
Гематокрит, %	23.86 ± 0.44	23.24 ± 0.35	23.36 ± 0.30	23.69 ± 0.39
Средний объем эритроцита, мкм ³	107.06 ± 0.90	103.64 ± 0.58[*]	103.93 ± 0.64[*]	108.39 ± 0.61 ^{•○}

Среднее содержание гемоглобина в 1 эритроците, 10^{12} г	35.68 ± 0.32	$34.50 \pm 0.24^*$	$34.33 \pm 0.19^*$	$35.82 \pm 0.22^{*\circ}$
Средняя концентрация гемоглобина в эритроците, г/л	666.46 ± 2.47	666.14 ± 3.26	661.00 ± 2.55	661.43 ± 3.06
Ширина распределения эритроцитов, %	11.057 ± 0.089	10.833 ± 0.071	$11.093 \pm 0.077^*$	$11.215 \pm 0.055^*$
Тромбоциты, 10^6 /мл	737.14 ± 45.87	823.86 ± 47.37	$945.23 \pm 31.78^{*\bullet}$	758.71 ± 40.37
Средний объём тромбоцита $\mu\text{м}^3$	11.92 ± 0.15	12.10 ± 0.13	$11.67 \pm 0.12^*$	11.840 ± 0.040
Тромбоцитрит, %	0.233 ± 0.012	0.247 ± 0.013	$0.2801 \pm 0.0076^{*\bullet}$	$0.226 \pm 0.012^\circ$
Ширина распределения тромбоцитов, %	22.89 ± 0.38	$24.01 \pm 0.29^*$	$22.48 \pm 0.27^*$	$22.35 \pm 0.39^*$
Нейтрофилы сегментоядерные, %	18.88 ± 3.40	10.75 ± 1.91	17.25 ± 4.04	19.88 ± 4.06
Моноциты, %	6.63 ± 0.84	5.50 ± 0.38	6.25 ± 1.13	6.38 ± 0.75
Лимфоциты, %	73.14 ± 2.74	79.13 ± 2.57	73.25 ± 5.36	69.75 ± 4.83
Эозинофилы, 10^6 /мл	0.0400 ± 0.0092	$0.095 \pm 0.015^*$	0.060 ± 0.011	$0.0323 \pm 0.0041^{*\circ}$
Нейтрофилы палочкоядерные, 10^6 /мл	0.0408 ± 0.0085	$0.142 \pm 0.011^*$	$0.099 \pm 0.015^{*\bullet}$	$0.0391 \pm 0.0022^{*\circ}$
Нейтрофилы сегментоядерные, 10^6 /мл	0.319 ± 0.046	0.57 ± 0.11	$1.05 \pm 0.29^*$	0.386 ± 0.072
Моноциты, 10^6 /мл	0.153 ± 0.026	$0.266 \pm 0.021^*$	$0.386 \pm 0.090^*$	$0.1406 \pm 0.0081^{*\circ}$
Лимфоциты, 10^6 /мл	1.57 ± 0.15	$4.29 \pm 0.37^*$	$3.10 \pm 0.39^*$	$1.31 \pm 0.13^{*\circ}$
Ретикулоциты периферической крови, %	1.314 ± 0.064	$1.608 \pm 0.065^*$	1.414 ± 0.084	$1.343 \pm 0.063^*$
Примечание: «*» - отличия от контрольной группы, « $\bullet$ » от группы Cd+ФН, « $\circ$ » от группы Cd+ФН+БПК статистически значимые при $p < 0,05$ по t-критерию Стьюдента.				

В ходе цитологического исследования тканевых отпечатков печени в группе «Cd+ФН» было выявлено снижение доли гепатоцитов на фоне увеличения дегенеративно измененных клеток и активации популяции Купферовских макрофагов. Анализ цитограммы почек этой группы показал сокращение процентного показателя клеток проксимальных и дистальных канальцев и рост доли дегенеративно измененных клеток данных отделов. Прием БПК значительно снизил выраженность этих патологических изменений (табл. 4).

Таблица 4.

Цитологические показатели внутренних органов экспериментальных крыс ($\bar{X} \pm Sx$)**Table 4.** Cytological parameters of the internal organs of experimental rats ($\bar{X} \pm Sx$)

Показатель / Parameter	Группы экспериментальных животных / Experimental animal groups			
	Кон- троль / Control	Группы воздействия / Exposure groups		
		Cd + ФН / Cd + Run- ning	Cd + ФН + БПК / Cd + Running + BPC	БПК / BPC
Зрелые лимфоциты, про- лимфоциты в отпечатке лимфоузлов, %	94.17 $\pm$ 0.31	94.67 $\pm$ 0.21	94.17 $\pm$ 0.31	93.40 $\pm$ 0.60
Клетки эпителия протоков в отпечатке печени, %	6.17 $\pm$ 0.31	5.50 $\pm$ 0.34	5.83 $\pm$ 0.31	6.50 $\pm$ 0.43
Гепатоциты в отпечатке пе- чени, %	82.50 $\pm$ 0.85	78.17 $\pm$ 0.70 *	80.83 $\pm$ 1.19	79.67 $\pm$ 1.02
Дегенеративно-измененные гепатоциты в отпечатке пе- чени, %	3.67 $\pm$ 0.42	6.00 $\pm$ 0.37 *	2.83 $\pm$ 0.48 •	4.33 $\pm$ 0.33 • ^o
Нейтрофилы в отпечатке печени, %	2.00 $\pm$ 0.37	2.83 $\pm$ 0.48	3.00 $\pm$ 0.37	3.17 $\pm$ 0.31 *
Эозинофилы в отпечатке печени, %	1.67 $\pm$ 0.21	2.20 $\pm$ 0.37	2.67 $\pm$ 0.33 *	2.00 $\pm$ 0.01
Купферовские макрофаги в отпечатке печени, %	1.67 $\pm$ 0.21	2.67 $\pm$ 0.21 *	2.17 $\pm$ 0.31	2.00 $\pm$ 0.37
Клетки проксимальных ка- нальцев в отпечатке почек, %	69.50 $\pm$ 1.73	60.60 $\pm$ 0.87 *	65.17 $\pm$ 1.30 •	66.33 $\pm$ 0.99 •
Дегенеративные клетки проксимальных канальцев в отпечатке почек, %	4.83 $\pm$ 0.31	9.83 $\pm$ 0.31 *	7.50 $\pm$ 0.43 •*	6.00 $\pm$ 0.58 •
Клетки дистальных каналь- цев в отпечатке почек, %	11.00 $\pm$ 0.63	9.17 $\pm$ 0.95	9.00 $\pm$ 0.32 *	9.50 $\pm$ 0.43
Дегенеративные клетки дистальных канальцев в отпечатке почек, %	4.50 $\pm$ 0.43	6.50 $\pm$ 0.43 *	6.50 $\pm$ 0.43 *	5.33 $\pm$ 0.42
Моноциты в отпечатке поч- ек, %	3.00 $\pm$ 0.37	3.67 $\pm$ 0.42	3.33 $\pm$ 0.33	3.17 $\pm$ 0.31

Примечание: «*» - отличия от контрольной группы, «•» от группы Cd+ФН, «o» от группы Cd+ФН+БПК статистически значимые при $p < 0,05$ по t -критерию Стьюдента.

Биохимические параметры крови и мочи экспонированных крыс не демонстрировали статистически значимых отклонений от контрольных значений, за исключением тенденции к снижению уровня глутатиона в группе «Cd+ФН» ($47,55 \pm 7,35$ против $65,20 \pm 11,47$ в контроле) и значимого повышения pH мочи в группе «Cd+ФН+БПК» ($7,75 \pm 0,13$ против $7,375 \pm 0,082$ в контроле).

В группах «Cd+ФН» и «Cd+ФН+БПК» установлено статистически значимое по сравнению с контролем увеличение коэффициента фрагментации геномной ДНК, однако в группе, дополнительно получавшей БПК, данный негативный эффект был снижен (табл. 5).

Таблица 5.

Коэффициент фрагментации геномной ДНК у экспериментальных групп крыс ($\bar{X} \pm Sx$)

Table 5. Genomic DNA fragmentation coefficient in experimental groups of rats ($\bar{X} \pm Sx$)

Показатель / Parameter	Группы экспериментальных животных / Experimental animal groups			
	Кон- троль / Control	Группы воздействия / Exposure groups		
		Cd + ФН / Cd + Running	Cd + ФН + БПК / Cd + Running + BPC	БПК / BPC
Фрагментация ДНК (%)	0.45 ± 0.007	$0.63 \pm 0.007^*$	$0.60 \pm 0.007^{* \bullet}$	$0.44 \pm 0.007^{* \circ}$
Примечание: «*» - отличия от контрольной группы, «●» от группы Cd+ФН, «○» от группы Cd+ФН+БПК статистически значимые при $p < 0,05$ по t-критерию Стьюдента.				

Результаты метаболомного исследования были визуализированы с помощью дискриминантного анализа методом частичных наименьших квадратов (PLS-DA) и представлены на рисунке 1А. Из диаграммы видно, что компонент 1 вносит наибольший вклад в метаболические различия между группами (21,1%). Большая близость группы «Cd+ФН+БПК», в отличие от группы «Cd+ФН», к группе «БПК» по компоненту 1, может свидетельствовать о нивелировании сочетанного воздействия физической нагрузки и кадмия на организм животных при приёме БПК.

В ходе дисперсионного анализа ANOVA для более детального понимания происходящей метаболической перестройки были выявлены изменения в метаболических путях, касающихся обмена лизофосфатидилхолинов (LPC), полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), ацилкарнитинов и моноглицеридов (MG). В группе «Cd+ФН» наблюдается ряд отклонений

от контрольных значений, в группе «БПК» - снижение уровней LPC и ПНЖК (за исключением докозагексаеновой кислоты, входящей в состав БПК, и её транспортной формы LPC 22:6). Приём БПК на фоне воздействия кадмия и физической нагрузки нормализует уровни описываемых метаболитов (рис. 1Б).

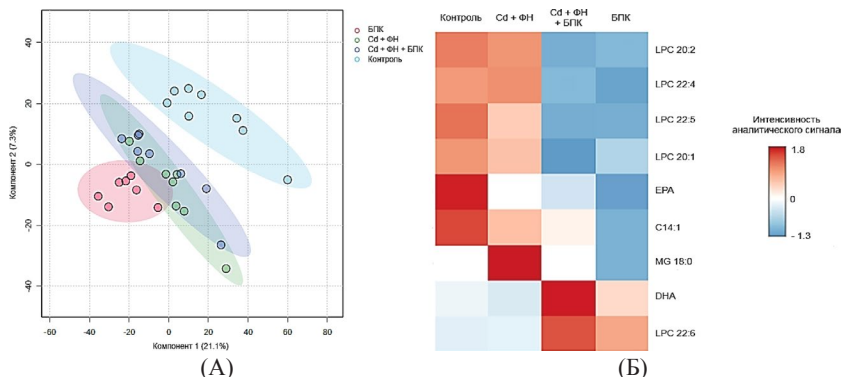


Рис. 1. Результаты метаболомного исследования образцов крови экспериментальных групп: (А) – диаграмма sPLS-DA по результатам обработки данных анализа проб крови экспериментальных животных методом хроматомасс-спектрометрии; (Б) – тепловая карта интенсивности аналитических сигналов метаболитов, показавших изменения при дисперсионном анализе ANOVA ($p < 0.05$)

Fig. 1. Results of the metabolomic analysis of blood samples from the experimental groups: (A) – sPLS-DA plot based on the results of data processing from the analysis of blood samples from experimental animals using gas chromatography–mass spectrometry; (B) – Heat map showing the intensity of analytical signals for metabolites that exhibited changes in the ANOVA analysis ($p < 0.05$)

Примечание: C14:1 – тетрадеценилкарнитин; EPA – эйкозапентаеновая кислота; DHA – докозагексаеновая кислота.

Гистоморфологическая картина печени в группе «Cd+ФН» демонстрировала скопления лимфоцитов и нейтрофилов в зоне синусоидных капилляров обнаруживались (рис. 2А). Сами синусоидные капилляры были несколько расширены. В центральной вене выявлено скопление эритроцитов – ранний маркер образования застойных явлений. Соединительнотканые перегородки слаборазвитые в виде единичных волокон. Гепатоциты полигональной, реже овальной формы, часть клеток – двуядерные.

У группы «Cd+ФН+БПК» наблюдалась нормальная архитектура органа (рис. 2Б), с равномерным кровенаполнением капилляров, за исключением незначительного скопления эритроцитов в центральной вене.

Гепатоциты правильной полигональной формы, ядра четкие, встречаются двоядерные клетки.

В группе «БПК» (рис. 2В) гистологическая картина печени была сопоставима с картиной печени животных из группы «Контроль» (рис. 2Г): паренхима органа однородная, кровенаполнение капилляров равномерное. Гепатоциты полигональной иногда овальной формы.

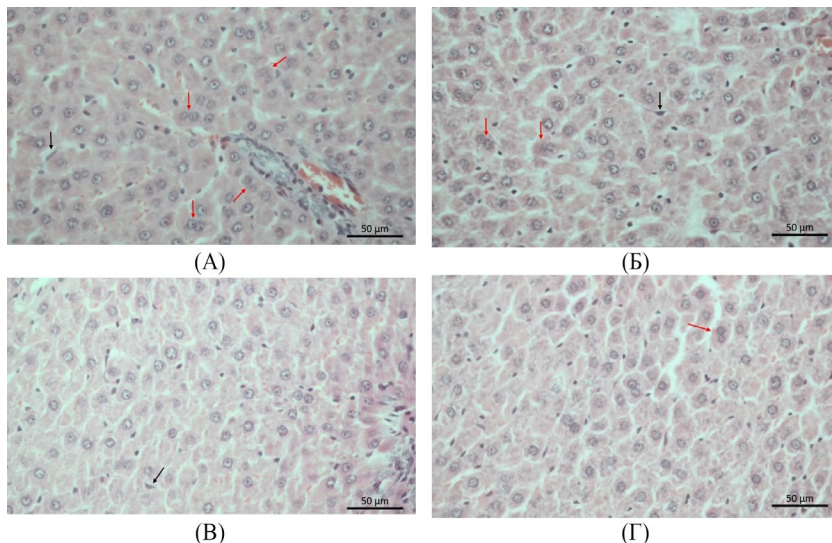


Рис. 2. Гистоморфологическая картина печени: (А) – группа «Cd+ФН»; (Б) – группа «Cd+ФН+БПК»; (В) – группа «БПК»; (Г) – группа «Контроль». Окраска гематоксилин-эозин; увеличение $\times 400$. Красными стрелками отмечены двоядерные гепатоциты, черной – клетки Купфера.

Fig. 2. Histomorphological findings in the liver: (A) – “Cd+FN” group; (B) – “Cd+FN+BPK” group; (C) – “BPK” group; (D) – “Control” group. Hematoxylin-eosin staining; magnification $\times 400$. Red arrows indicate binucleated hepatocytes; black arrows indicate Kupffer cells.

Обсуждение результатов

Наблюдаемые негативные отклонения показателей после сочетанного воздействия хлорида кадмия и физической нагрузки свидетельствуют о развитии умеренной интоксикации, сопровождающейся структурно-функциональными нарушениями в органах-мишенях. Проведенное исследование не выявило значимых изменений показателей состояния здоровья у животных, получавших только БПК, что свидетельствует в пользу его безопасности.

Печень, почки и селезенка – ключевые органы-мишени кадмиевой интоксикации [11] – в экспонированных группах продемонстрировали увеличение относительной массы, что согласуется с многочисленными данными о негативных эффектах кадмия [13] и об активном накоплении этого металла в клетках и тканях [13; 26]. Помимо этого, возрастание относительной массы селезенки может быть ассоциировано с кадмий-индуцированным дефицитом железа и сопутствующим нарушением гемоглобинового синтеза [19], что подтверждается результатом гематологического исследования – снижение среднего объема эритроцита и содержания гемоглобина в нем.

Распределение и транспорт токсикантов по организму происходит с кровотоком, что обуславливает негативное действие хлорида кадмия на гомеостаз системы крови. Зафиксированные гематологические сдвиги, включая повышение лейкоцитов, моноцитов, лимфоцитов и снижение некоторых эритроцитарных индексов, отражают комплекс патологических процессов: активацию иммунного ответа [23] на кадмий-индуцированное повреждение тканей [13], развитие анемии, вероятно, вследствие супрессии эритропоэза [18], а также компенсаторную мобилизацию ретикулоцитов и палочкоядерных нейтрофилов в группе «Cd+ФН» в условиях токсического стресса. Нормализация указанных параметров при дополнительном введении БПК свидетельствует о модуляции как врожденного, так и адаптивного иммунного ответа [9]. Тромбоцитоз и увеличение показателя тромбокрита в этой группе, вероятно, произошло в ответ на сосудистые повреждения, вызванное кадмием [24; 27; 31].

Наблюдаемые нарушения показателей цитограммы внутренних органов в группе «Cd+ФН»: снижение доли функциональных клеток печени и почек на фоне роста дегенеративных изменений и активации Купферовских макрофагов – маркеров тканевого воспаления, можно объяснить окислительным стрессом и нарушенным окислительно-восстановительного баланса в тканях печени и почек. Индукция окислительных процессов может подтверждаться снижением уровня глутатиона – ключевого компонента антиоксидантной защиты – отмеченным в данной группе. Кадмий, нарушая синтез глутатиона и усиливая его расход на нейтрализацию АФК, истощает антиоксидантную систему, что усугубляется дополнительным оксидативным воздействием физической нагрузки [2]. Выраженные нарушения печени и почек после кадмиевого воздействия обусловлены его быстрым всасыванием и интенсивной аккумуляцией в тканях печени и почек, где он образует комплексы с металлотионеинами, запуская каскад патологических метаболических эффектов, повреждение мембран, хромо-

сомные aberrации и, как следствие, клеточную деградацию и апоптоз [26; 28]. Применение БПК значительно сократило патологические сдвиги, за исключением нарушений в дистальных канальцах почек, что может быть обусловлено тем, что именно в этом отделе происходит активная реабсорбция кальция, а кадмий, как известно, может конкурировать с этим элементом за места связывания [1] ввиду схожести физико-химических свойств.

Гистологическое исследование печени выявило увеличение доли двоядерных гепатоцитов, что подтверждает выраженное негативное воздействие кадмия на данный орган. Рост двоядерных клеток может свидетельствовать об активации защитных механизмов генетического материала от свободнорадикального повреждения [25]. Зафиксированное повышение уровня фрагментации ДНК подтверждает генотоксический потенциал соединений кадмия [25].

Метаболомный анализ сыворотки крови в группе «Cd+ФН» выявил нарушения липидного обмена у крыс, что может быть ассоциировано с активацией воспалительных процессов [16] и активацией гибели клеток [15], что согласуется с другими полученными нами данными.

Ряд наблюдаемых отклонений обусловлены не только серьезной токсичностью кадмия, но и неоднозначным действием физической нагрузки, что уже было продемонстрировано нашим научным коллективом в более ранних работах [4; 7]. Физическая активность на фоне интоксикации может играть двоякую роль: с одной стороны, ускоряя элиминацию химического агента, с другой – усиливая контакт с ним путем повышенной системной абсорбции при мышечной активности за счет изменения гемодинамических параметров [5].

Снижение выраженности изменений гематологических, метаболомных и цитологических показателей на фоне приема БПК указывает на благоприятные токсикодинамические эффекты биопротекторов, которые связаны с различными механизмами, которые сложны и, вероятно, потенцируют друг друга.

Во многом наблюдаемые положительные эффекты обусловлены наличием в его составе пектина, выступающего в качестве хелатирующего агента [17] и снижающего биодоступность кадмия и, как следствие, токсическую нагрузку, и задержку металла в различных органах и тканях. Поливитаминный мультиминеральный комплекс в составе БПК обладает серьезным антиоксидантным действием: ингибируя выработку АФК и подавляя воспаление, АФК-зависимые пути апоптоза [30], сокращая повреждение молекул ДНК. Большое значение имеет присущее ряду составляющих БПК

мембрано-стабилизирующее действие, так как это может препятствовать повреждению митохондриального аппарата и ингибировать окислительные процессы [8]. Ряд включенных в БПК витаминов оказывают стимулирующее действие на фагоцитарную активность нейтрофилов [12]

Включение в БПК ω -3 ПНЖК модулируют воспалительный ответ через подавление синтеза провоспалительных цитокинов [22]. Метаболомные данные подтверждают снижение интенсивности перекисного окисления липидов в группе «Cd+ФН+БПК», о чем свидетельствует снижение содержания в сыворотке LPC и ПНЖК – продуктов распада фосфолипидов клеточных мембран.

Заключение

Совокупность представленных в настоящей работе и опубликованных ранее данных свидетельствуют о том, что сочетанное действие на организм факторов разной природы характеризуется неоднозначными закономерностями. Кадмиевая интоксикация на фоне физической нагрузки индуцирует комплексные патологические изменения, опосредованные окислительным стрессом, воспалением и дисфункцией ключевых органов. Мы продемонстрировали (насколько нам известно, впервые), что БПК, включающий пектин, поливитаминный-мультиминеральный комплекс, некоторые аминокислоты ω -3 ПНЖК, ослабляет системную и целевую токсичность хлорида кадмия на фоне физической нагрузки.

Выявленная нормализация гематологических и цитологических показателей указывает на потенциал БПК в профилактике профессиональных патологий у лиц, подверженных сочетанному действию токсикантов и физических нагрузок. Полученные данные могут послужить основой для дальнейшей разработки системы профилактических мер по управлению риском возникновения патологических состояний у работающего населения.

Соблюдение этических стандартов. Исследование было одобрено Этическим комитетом Екатеринбургского медицинско-научного центра профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий, протокол № 4 от 30.09.2022 г.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Кокаев, Р. И., & Брин, В. Б. (2020). Влияние на некоторые водо-электролитные и гемодинамические показатели введения кадмия на фоне кальцитонин-вызванной модели гипокальциемии. *Современные проблемы науки и образования*, (1). <https://doi.org/10.17513/spno.29568>. EDN: <https://elibrary.ru/JHPMPJ>
2. Майорова, Е. А., & Корнякова, В. В. (2022). Развитие окислительного стресса при физических нагрузках у спортсменов. *Научный вестник Омского государственного медицинского университета*, 2(2), 17–22. EDN: <https://elibrary.ru/RWEKAN>
3. Минигалиева, И. А., Рябова, Ю. В., Сутункова, М. П., [и др.]. (2021). Сочетанное действие свинца и физической нагрузки на организм крыс в субхроническом эксперименте. *Гигиена и санитария*, 100(12), 1404–1411. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-12-1404-1411>. EDN: <https://elibrary.ru/SJNNKH>
4. Минигалиева, И. А., Шабардина, Л. В., Рябова, Ю. В., [и др.]. (2025). Экспериментальное изучение сочетанного действия бензола и физической нагрузки на крыс. *Гигиена и санитария*, 104(1), 101–109. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-1-101-109>. EDN: <https://elibrary.ru/QZVRNE>
5. Минигалиева, И. А., Шабардина, Л. В., Рябова, Ю. В., [и др.]. (2024). Экспериментальное исследование изменения токсических эффектов действия кадмия на фоне физической нагрузки. *Гигиена и санитария*, 103(8), 895–905. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-8-895-905>. EDN: <https://elibrary.ru/DJJVXN>
6. Привалова, Л. И., Клинова, С. В., Минигалиева, И. А., [и др.]. (2020). *Способ повышения устойчивости организма к комбинированному вредному действию свинца и кадмия* [Патент РФ № 2712954 С1].
7. Рябова, Ю. В., Шабардина, Л. В., Кескевич, А. А., [и др.]. (2024). Нейротоксические эффекты сочетанного действия хлорида кадмия и физической нагрузки и протекторное действие биопрофилактических средств. *Гигиена и санитария*, 103(2), 165–171. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-165-171>. EDN: <https://elibrary.ru/UAPWUT>
8. Сутункова, М. П., Макеев, О. Г., Привалова, Л. И., [и др.]. (2018). Генотоксический эффект воздействия некоторых элементарных или элементарноокисных наночастиц и его ослабление комплексом биопротекторов. *Медицина труда и промышленная экология*, (11), 10–16. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-11-10-16>. EDN: <https://elibrary.ru/YNKBHF>
9. Ciarrocca, M., Rosati, M. V., Tomei, F., [et al.]. (2015). Correlation between cadmium and blood counts in workers exposed to urban stressor. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 70, 70–76. <https://doi.org/10.1080/19338244.2013.778807>
10. Conroy, M. J., Andrews, R. M., Andrews, S., [et al.]. (2024). LIPID MAPS: update to databases and tools for the lipidomics community. *Nucleic Acids Research*, 52, D1677–D1682. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad896>. EDN: <https://elibrary.ru/ZWDOLZ>

11. El-Boshy, M., Ashshi, A., Gaith, M., [et al.]. (2017). Studies on the protective effect of the artichoke (*Cynara scolymus*) leaf extract against cadmium toxicity-induced oxidative stress, hepatorenal damage, and immunosuppressive and hematological disorders in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 12372–12383. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8876-x>. EDN: <https://elibrary.ru/CCJAVK>
12. Fantacone, M. L., Lowry, M. B., Uesugi, S. L., [et al.]. (2020). The effect of a multivitamin and mineral supplement on immune function in healthy older adults: A double-blind, randomized, controlled trial. *Nutrients*, 12(8), 2447. <https://doi.org/10.3390/nu12082447>. EDN: <https://elibrary.ru/FHJMFF>
13. Gad El-Hak, H. N., & Mohamed, F. H. (2023). Effect of lactoferrin supplement on cadmium chloride induced toxicity to male rats: Toxicopathological, ultrastructural and immunological studies. *International Immunopharmacology*, 125, 111182. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2023.111182>. EDN: <https://elibrary.ru/TMSMDM>
14. Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., [et al.]. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>. EDN: <https://elibrary.ru/KHDISI>
15. He, Z., Shen, P., Feng, L., [et al.]. (2022). Cadmium induces liver dysfunction and ferroptosis through the endoplasmic stress-ferritinophagy axis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 245, 114123. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114123>. EDN: <https://elibrary.ru/VOXXZV>
16. Hong, H., Xu, Y., Xu, J., [et al.]. (2021). Cadmium exposure impairs pancreatic β -cell function and exaggerates diabetes by disrupting lipid metabolism. *Environment International*, 149, 106406. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106406>. EDN: <https://elibrary.ru/XDAUXP>
17. Ibarra-Rodríguez, D., Lizardi-Mendoza, J., López-Maldonado, E. A., & Oropeza-Guzmán, M. T. (2017). Capacity of ‘nopal’ pectin as a dual coagulant-flocculant agent for heavy metals removal. *Chemical Engineering Journal*, 323, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.087>. EDN: <https://elibrary.ru/YVSTBU>
18. Isoda, H., Motojima, H., Onaga, S., [et al.]. (2014). Analysis of the erythroid differentiation effect of flavonoid apigenin on K562 human chronic leukemia cells. *Chemico-Biological Interactions*, 220, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2014.07.006>. EDN: <https://elibrary.ru/YEXQED>
19. Kamenova, K., Gluhcheva, Y., Dorkov, P., & Ivanova, J. (2019). Comparative assessment of the effects of meso-2,3-dimercaptosuccinic acid and salinomycin on spleen function of cadmium-exposed mice. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 33304–33310. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06473-4>. EDN: <https://elibrary.ru/GSJGRC>

20. Katsnelson, B. A., Makeev, O. H., Kochneva, N. I., [et al.]. (2007). Testing a set of bioprotectors against the genotoxic effect of a combination of ecotoxicants. *Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 13, 251–264.
21. Klinova, S. V., Minigalieva, I. A., Protsenko, Y. L., [et al.]. (2022). Changes in the cardiotoxic effects of lead intoxication in rats induced by muscular exercise. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 4417. <https://doi.org/10.3390/ijms23084417>. EDN: <https://elibrary.ru/VEGVDM>
22. Kowalczyk, E., Kopff, A., Fijałkowski, P., [et al.]. (2003). Effect of anthocyanins on selected biochemical parameters in rats exposed to cadmium. *Acta Biochimica Polonica*, 50, 543–548. https://doi.org/10.18388/abp.2003_3707
23. Kumar, N. G., Contaifer, D., Madurantakam, P., [et al.]. (2019). Dietary bioactive fatty acids as modulators of immune function: Implications on human health. *Nutrients*, 11(12), 2974. <https://doi.org/10.3390/nu11122974>
24. Mukhopadhyay, S., Mukhopadhyay, S., Addya, S., Bhattacharya, D. K., [et al.]. (1988). Effects of cadmium treatment in vitro on the antioxidant protection mechanism and activation of human blood platelets. *Thrombosis Research*, 50, 419–427. [https://doi.org/10.1016/0049-3848\(88\)90271-X](https://doi.org/10.1016/0049-3848(88)90271-X)
25. Nagaraju, R., Kalahasthi, R., Balachandar, R., & Bagepally, B. S. (2022). Cadmium exposure and DNA damage (genotoxicity): A systematic review and meta-analysis. *Critical Reviews in Toxicology*, 52(10), 786–798. <https://doi.org/10.1080/10408444.2023.2173557>. EDN: <https://elibrary.ru/BEMBHQ>
26. Omar, E. M., El-Sayed, N. S., Elnozahy, F. Y., [et al.]. (2024). Reversal effects of royal jelly and propolis against cadmium-induced hepatorenal toxicity in rats. *Biological Trace Element Research*, 202, 1612–1627. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03775-0>. EDN: <https://elibrary.ru/YIEVZM>
27. Venter, C., Oberholzer, H. M., Bester, J., van Rooy, M. J., [et al.]. (2017). Ultrastructural, confocal and viscoelastic characteristics of whole blood and plasma after exposure to cadmium and chromium alone and in combination: An ex vivo study. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 43, 1288–1300. <https://doi.org/10.1159/000481841>
28. Waisberg, M., Joseph, P., Hale, B., & Beyersmann, D. (2003). Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. *Toxicology*, 192(2–3), 95–117. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00305-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00305-6)
29. Wishart, D. S., Guo, A., Oler, E., [et al.]. (2022). HMDB 5.0: The Human Metabolome Database for 2022. *Nucleic Acids Research*, 50, D622–D631. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab1062>. EDN: <https://elibrary.ru/RTIFWR>
30. Zamani, M. M., Mortazavi, S. H., & Monajjemzadeh, M., [et al.]. (2021). Protective effect of combined long time administration of selenium and vitamin C on liver and kidney toxicity of cadmium in rats. *Iranian Journal of Pathology*, 16(2), 174–180. <https://doi.org/10.30699/IJP.2020.135777.2489>. EDN: <https://elibrary.ru/FZFMNM>

31. Zhang, T., Yan, W., Liu, C., [et al.]. (2023). Cadmium exposure promotes ferroptosis by upregulating Heat Shock Protein 70 in vascular endothelial damage of zebrafish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115241>. EDN: <https://elibrary.ru/NLDZWI>

References

1. Kokaev, R. I., & Brin, V. B. (2020). The effect on some water-electrolyte and hemodynamic parameters of cadmium administration under a calcitonin-induced hypocalcemia model. *Modern Problems of Science and Education*, (1). <https://doi.org/10.17513/spno.29568>. EDN: <https://elibrary.ru/JHPMPJ>
2. Mayorova, E. A., & Kornyakova, V. V. (2022). Development of oxidative stress during physical activity in athletes. *Scientific Bulletin of Omsk State Medical University*, 2(2), 17–22. EDN: <https://elibrary.ru/RWEKAH>
3. Minigalieva, I. A., Ryabova, Yu. V., Sutunkova, M. P., [et al.]. (2021). Combined effect of lead and physical activity on the rat organism in a subchronic experiment. *Hygiene and Sanitation*, 100(12), 1404–1411. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-12-1404-1411>. EDN: <https://elibrary.ru/SJNNKH>
4. Minigalieva, I. A., Shabardina, L. V., Ryabova, Yu. V., [et al.]. (2025). Experimental study of the combined effect of benzene and physical activity on rats. *Hygiene and Sanitation*, 104(1), 101–109. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-1-101-109>. EDN: <https://elibrary.ru/QZVRNE>
5. Minigalieva, I. A., Shabardina, L. V., Ryabova, Yu. V., [et al.]. (2024). Experimental investigation of changes in the toxic effects of cadmium under physical activity. *Hygiene and Sanitation*, 103(8), 895–905. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-8-895-905>. EDN: <https://elibrary.ru/DJJVXN>
6. Privalova, L. I., Klinova, S. V., Minigaleeva, I. A., [et al.]. (2020). *Method for increasing the body's resistance to the combined harmful effects of lead and cadmium* [Russian Federation Patent No. 2712954 C1].
7. Ryabova, Yu. V., Shabardina, L. V., Keskevich, A. A., [et al.]. (2024). Neurotoxic effects of the combined action of cadmium chloride and physical activity and the protective effect of biopreventive agents. *Hygiene and Sanitation*, 103(2), 165–171. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-165-171>. EDN: <https://elibrary.ru/UAPWUT>
8. Sutunkova, M. P., Makeev, O. G., Privalova, L. I., [et al.]. (2018). Genotoxic effect of exposure to certain elemental or element-oxide nanoparticles and its attenuation by a complex of bioprotectors. *Occupational Health and Industrial Ecology*, (11), 10–16. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-11-10-16>. EDN: <https://elibrary.ru/YNKBHF>

9. Ciarrocca, M., Rosati, M. V., Tomei, F., [et al.]. (2015). Correlation between cadmium and blood counts in workers exposed to urban stressor. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 70, 70–76. <https://doi.org/10.1080/19338244.2013.778807>
10. Conroy, M. J., Andrews, R. M., Andrews, S., [et al.]. (2024). LIPID MAPS: update to databases and tools for the lipidomics community. *Nucleic Acids Research*, 52, D1677–D1682. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad896>. EDN: <https://elibrary.ru/ZWDOLZ>
11. El-Boshy, M., Ashshi, A., Gaith, M., [et al.]. (2017). Studies on the protective effect of the artichoke (*Cynara scolymus*) leaf extract against cadmium toxicity-induced oxidative stress, hepatorenal damage, and immunosuppressive and hematological disorders in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 12372–12383. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8876-x>. EDN: <https://elibrary.ru/CCJAVK>
12. Fantacone, M. L., Lowry, M. B., Uesugi, S. L., [et al.]. (2020). The effect of a multivitamin and mineral supplement on immune function in healthy older adults: A double-blind, randomized, controlled trial. *Nutrients*, 12(8), 2447. <https://doi.org/10.3390/nu12082447>. EDN: <https://elibrary.ru/FHJMFF>
13. Gad El-Hak, H. N., & Mohamed, F. H. (2023). Effect of lactoferrin supplement on cadmium chloride induced toxicity to male rats: Toxicopathological, ultrastructural and immunological studies. *International Immunopharmacology*, 125, 111182. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2023.111182>. EDN: <https://elibrary.ru/TMSMDM>
14. Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., [et al.]. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>. EDN: <https://elibrary.ru/KHDISI>
15. He, Z., Shen, P., Feng, L., [et al.]. (2022). Cadmium induces liver dysfunction and ferroptosis through the endoplasmic stress-ferritinophagy axis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 245, 114123. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114123>. EDN: <https://elibrary.ru/VOXXZV>
16. Hong, H., Xu, Y., Xu, J., [et al.]. (2021). Cadmium exposure impairs pancreatic β -cell function and exaggerates diabetes by disrupting lipid metabolism. *Environement International*, 149, 106406. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106406>. EDN: <https://elibrary.ru/XDAUXP>
17. Ibarra-Rodríguez, D., Lizardi-Mendoza, J., López-Maldonado, E. A., & Oropeza-Guzmán, M. T. (2017). Capacity of ‘nopal’ pectin as a dual coagulant-flocculant agent for heavy metals removal. *Chemical Engineering Journal*, 323, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.087>. EDN: <https://elibrary.ru/YVSTBU>
18. Isoda, H., Motojima, H., Onaga, S., [et al.]. (2014). Analysis of the erythroid differentiation effect of flavonoid apigenin on K562 human chronic leukemia cells. *Chemico-Biological Interactions*, 220, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2014.07.006>. EDN: <https://elibrary.ru/YEXQED>

19. Kamenova, K., Gluhcheva, Y., Dorkov, P., & Ivanova, J. (2019). Comparative assessment of the effects of meso-2,3-dimercaptosuccinic acid and salinomycin on spleen function of cadmium-exposed mice. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 33304–33310. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06473-4>. EDN: <https://elibrary.ru/GSJGRC>
20. Katsnelson, B. A., Makeev, O. H., Kochneva, N. I., [et al.]. (2007). Testing a set of bioprotectors against the genotoxic effect of a combination of ecotoxicants. *Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 13, 251–264.
21. Klinova, S. V., Minigalieva, I. A., Protsenko, Y. L., [et al.]. (2022). Changes in the cardiotoxic effects of lead intoxication in rats induced by muscular exercise. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 4417. <https://doi.org/10.3390/ijms23084417>. EDN: <https://elibrary.ru/VEGVDM>
22. Kowalczyk, E., Kopff, A., Fijałkowski, P., [et al.]. (2003). Effect of anthocyanins on selected biochemical parameters in rats exposed to cadmium. *Acta Biochimica Polonica*, 50, 543–548. https://doi.org/10.18388/abp.2003_3707
23. Kumar, N. G., Contaifer, D., Madurantakam, P., [et al.]. (2019). Dietary bioactive fatty acids as modulators of immune function: Implications on human health. *Nutrients*, 11(12), 2974. <https://doi.org/10.3390/nu11122974>
24. Mukhopadhyay, S., Mukhopadhyay, S., Addya, S., Bhattacharya, D. K., [et al.]. (1988). Effects of cadmium treatment in vitro on the antioxidant protection mechanism and activation of human blood platelets. *Thrombosis Research*, 50, 419–427. [https://doi.org/10.1016/0049-3848\(88\)90271-X](https://doi.org/10.1016/0049-3848(88)90271-X)
25. Nagaraju, R., Kalahasthi, R., Balachandar, R., & Bagepally, B. S. (2022). Cadmium exposure and DNA damage (genotoxicity): A systematic review and meta-analysis. *Critical Reviews in Toxicology*, 52(10), 786–798. <https://doi.org/10.1080/10408444.2023.2173557>. EDN: <https://elibrary.ru/BEMBHQ>
26. Omar, E. M., El-Sayed, N. S., Elnozahy, F. Y., [et al.]. (2024). Reversal effects of royal jelly and propolis against cadmium-induced hepatorenal toxicity in rats. *Biological Trace Element Research*, 202, 1612–1627. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03775-0>. EDN: <https://elibrary.ru/YIEVZM>
27. Venter, C., Oberholzer, H. M., Bester, J., van Rooy, M. J., [et al.]. (2017). Ultrastructural, confocal and viscoelastic characteristics of whole blood and plasma after exposure to cadmium and chromium alone and in combination: An ex vivo study. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 43, 1288–1300. <https://doi.org/10.1159/000481841>
28. Waisberg, M., Joseph, P., Hale, B., & Beyersmann, D. (2003). Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. *Toxicology*, 192(2–3), 95–117. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00305-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00305-6)

29. Wishart, D. S., Guo, A., Oler, E., [et al.]. (2022). HMDB 5.0: The Human Metabolome Database for 2022. *Nucleic Acids Research*, 50, D622–D631. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab1062>. EDN: <https://elibrary.ru/RTIFWR>
30. Zamani, M. M., Mortazavi, S. H., & Monajjemzadeh, M., [et al.]. (2021). Protective effect of combined long time administration of selenium and vitamin C on liver and kidney toxicity of cadmium in rats. *Iranian Journal of Pathology*, 16(2), 174–180. <https://doi.org/10.30699/IJP.2020.135777.2489>. EDN: <https://elibrary.ru/FZFMNM>
31. Zhang, T., Yan, W., Liu, C., [et al.]. (2023). Cadmium exposure promotes ferroptosis by upregulating Heat Shock Protein 70 in vascular endothelial damage of zebrafish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115241>. EDN: <https://elibrary.ru/NLDZWI>

ВКЛАД АВТОРОВ

Минигалиева И.А., Сутункова М.П.: концепция и дизайн исследования.

Шабардина Л.В.: сбор и обработка материала, написание текста, подготовка рисунков.

Сахаутдинова Р.Р., Унесихина М.С., Макеев О.Г.: сбор и обработка материала.

Минигалиева И.А., Сутункова М.П.: научное редактирование.

Все авторы: утверждение окончательного варианта статьи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ilzira A. Minigalieva, Marina P. Sutunkova: research concept and design.

Lada V. Shabardina: data collection and processing, text writing, preparation of figures.

Renata R. Sakhautdinova, Maria S. Unesikhina, Oleg G. Makeyev: data collection and processing.

Ilzira A. Minigalieva, Marina P. Sutunkova: scientific editing.

All authors: approval of the final version of the article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Минигалиева Ильзира Амировна, зав. отдела токсикологии и биопрофилактики, д.б.н.

ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора

ул. Попова, 30, г. Екатеринбург, 30, 620014, Российская Федерация

ilzira-minigalieva@yandex.ru

Шабардина Лада Владимировна, м.н.с. отдела токсикологии и биопрофилактики

ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора

ул. Попова, 30, г. Екатеринбург, 30, 620014, Российская Федерация

lada.shabardina@mail.ru

Сахаутдинова Рената Рашидовна, зав. ДЛО НПО Лабораторно-диагностических технологий

ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора

ул. Попова, 30, г. Екатеринбург, 30, 620014, Российская Федерация

sahautdinova@ymrc.ru

Сутункова Марина Петровна, директор ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора; и.о. зав. кафедрой, доцент УГМУ Минздрава России, д.м.н.

ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора; ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России

ул. Попова, 30, г. Екатеринбург, 30, 620014, Российская Федерация; ул. Репина, 3, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация

marinasutunkova@yandex.ru

Унесихина Мария Сергеевна, м.н.с. отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии

ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора

ул. Попова, 30, г. Екатеринбург, 30, 620014, Российская Федерация

unesihinams@ymrc.ru

Макеев Олег Германович, зав. каф. биологии и биотехнологий, д.м.н., профессор

ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России

ул. Репина, 3, г. Екатеринбург, 620028, Российская Федерация

oomt305@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ilzira A. Minigalieva, Head of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Doctor of Biological Sciences

Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers

30, Popov Str., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

ilzira-minigalieva@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0097-7845>

ResearcherID: T-2027-2018

Scopus Author ID: 36632768200

Lada V. Shabardina, Junior Researcher, Department of Toxicology and Bioprophylaxis
Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers

30, Popov Str., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

lada.shabardina@mail.ru

SPIN-code: 8293-8305

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8284-0008>

ResearcherID: HOH-8601-2023

Scopus Author ID: 57727271500

Renata R. Sakhautdinova, Head of the Diagnostic Laboratory Department of the Research and Production Association of Laboratory and Diagnostic Technologies, Candidate of Medical Sciences

Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers

30, Popov Str., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

sahautdinova@ymrc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2726-9259>

Scopus Author ID: 55857666100

Marina P. Sutunkova, Director, Doctor of Medical Sciences; Docent, Head of the Department of Occupational Hygiene and Medicine

Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers; Ural State Medical University

30, Popov Str., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation; 3, Repin Str., Yekaterinburg, 620028, Russian Federation

marinasutunkova@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1743-7642>

ResearcherID: T-2882-2018

Scopus Author ID: 35281187300

Maria S. Unesikhina, Junior Researcher, Department of Molecular Biology and Electron Microscopy

Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers

30, Popov Str., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

unesihinams@ymrc.ru

SPIN-code: 6156-0729

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5576-365X>

ResearcherID: AEG-9819-2022

Oleg G. Makeyev, Head of the Department of Biology and Biotechnologies, Doctor of Medical Sciences, Professor

Ural State Medical University
3, Repin Str., Yekaterinburg, 620028, Russian Federation
oomt305@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-3185>
ResearcherID: G-5511-2017
Scopus Author ID: 35280158600

Поступила 23.06.2025

После рецензирования 30.07.2025

Принята 07.09.2025

Received 23.06.2025

Revised 30.07.2025

Accepted 07.09.2025

Научные обзоры и сообщения / Scientific Reviews and Reports

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1749](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1749)

EDN: [RBEPYQ](https://edn.ru/entry/RBEPYQ)

УДК 616.12-008.1



Эпикардиальный жир как независимый предиктор сердечно-сосудистых заболеваний

А.А. Зюзина, В.И. Вишневский, И.А. Снимщикова,
М.О. Ревякина, М.В. Вишневский

*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,
Орел, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. В последние десятилетия произошла трансформация парадигмы в понимании связи между ожирением и сердечно-сосудистым риском. Эпикардиальный жир, являясь метаболически активным паракринным органом, рассматривается как потенциальный независимый предиктор кардиоваскулярной патологии.

Целью настоящего обзора является систематизация современных данных о взаимосвязи между объемом эпикардиального жира и сердечно-сосудистым риском, с акцентом на патофизиологические механизмы, методы количественной оценки и клиническую значимость данного показателя.

Материал и методы. Настоящий обзор литературы был выполнен с использованием систематического подхода к поиску, отбору и анализу научных публикаций, посвященных взаимосвязи эпикардиального жира и сердечно-сосудистого риска. Стратегия информационного поиска включала использование электронных баз данных медицинской литературы: MedLine, PubMed, CochraneLibrary, nih.gov и e-library по ключевым словам за период с 2003 года по май 2025 года.

Результаты. Проанализированы методологические подходы к количественной оценке эпикардиального жира, систематизированы данные о его корреляции с традиционными факторами риска, показателями воспаления и инсулинорезистентности. Рассмотрены патофизиологические механизмы, связывающие избыточное накопление эпикардиального жира с развитием атеросклероза и других сердечно-сосудистых патологий. Особое внимание уделено пороговым значениям объема эпикардиального жира, при превышении которых значительно возрастает риск сердечно-сосудистых осложнений. Представлены данные о прогностической

ценности количественной оценки эпикардального жира и возможности ее включения в алгоритмы стратификации кардиоваскулярного риска.

Заключение. Совокупность рассмотренных исследований указывает на то, что эпикардальный жир может служить ценным биомаркером сердечно-сосудистого риска и потенциальной мишенью для терапевтических вмешательств.

Ключевые слова: эпикардальный жир; кардиоваскулярный риск; висцеральное ожирение; коронарный атеросклероз; воспаление

Для цитирования. Зюзина, А. А., Вишнеvский, В. И., Снимщикова, И. А., Реvякина, М. О., & Вишнеvский, М. В. (2026). Эпикардальный жир как независимый предиктор сердечно-сосудистых заболеваний. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 440–456. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1749>

Epicardial fat as an independent predictor of cardiovascular disease

A.A. Ziuzina, V.I. Vishnevsky, I.A. Snimshchikova,
M.O. Revyakina, M.V. Vishnevsky

Orel State University, Orel, Russian Federation

Abstract

Background. In recent decades, there has been a paradigm shift in understanding the relationship between obesity and cardiovascular risk. Epicardial fat, as a metabolically active paracrine organ, is considered a potential independent predictor of cardiovascular pathology.

The **purpose** of this review is to systematize current data on the relationship between epicardial fat volume and cardiovascular risk, with a focus on the pathophysiological mechanisms, quantification methods, and clinical significance of this indicator.

Material and methods. This literature review was performed using a systematic approach to search, selection and analysis of scientific publications devoted to the relationship between epicardial fat and cardiovascular risk. The information search strategy included the use of electronic databases of medical literature: MedLine, PubMed, CochraneLibrary, nih.gov and e-library by keywords for the period from 2003 to May 2025.

Results. The paper analyzes methodological approaches to the quantitative assessment of epicardial fat and systematizes data on its correlation with traditional risk factors, indicators of inflammation, and insulin resistance. The paper also examines the pathophysiological mechanisms that link excessive accumulation of epicardial fat to the development of atherosclerosis and other cardiovascular pathologies. Special attention is given to the threshold values of epicardial fat volume, exceeding which significantly increases the risk of cardiovascular complications. The article presents data on the

prognostic value of quantitative assessment of epicardial fat and the possibility of its inclusion in algorithms for stratifying cardiovascular risk.

Conclusion. The combination of the studies reviewed indicates that epicardial fat may serve as a valuable biomarker of cardiovascular risk and a potential target for therapeutic interventions.

Keywords: epicardial fat; cardiovascular risk; visceral obesity; coronary atherosclerosis; inflammation

For citation. Ziuzina, A. A., Vishnevsky, V. I., Snimshchikova, I. A., Revyakina, M. O., & Vishnevsky, M. V. (2026). Epicardial fat as an independent predictor of cardiovascular disease. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 440–456. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1749>

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) продолжают лидировать среди причин заболеваемости и смертности в глобальном масштабе, несмотря на значительные достижения в области их профилактики и лечения. Согласно последним данным, ежегодно регистрируется около 17,9 миллионов смертей от ССЗ, что составляет примерно 31% от общей смертности населения [19]. Прогнозируется, что к 2030 году этот показатель может возрасти до 23,6 миллионов случаев. Данная тенденция стимулирует активный поиск новых, потенциально модифицируемых факторов риска и патогенетических механизмов кардиоваскулярной патологии, которые могли бы стать мишенями для терапевтических вмешательств.

В последние десятилетия произошла трансформация парадигмы в понимании связи между ожирением и сердечно-сосудистым риском. На смену концепции общего ожирения пришло представление о ключевой роли распределения жировой ткани и метаболической активности отдельных жировых депо [14]. Многочисленные исследования показали, что именно висцеральное ожирение, а не избыточная масса тела ассоциировано с инсулинорезистентностью, дислипидемией, эндотелиальной дисфункцией и хроническим субклиническим воспалением [16].

Среди висцеральных жировых депо особое внимание исследователей привлекает эпикардальная жировая ткань (ЭЖТ), расположенная между миокардом и висцеральным листком перикарда. Эпикардальный жир (ЭЖ) представляет собой специализированное висцеральное жировое депо, эмбриологически, анатомически и функционально связанное с миокардом и коронарными артериями. Отсутствие фасциальных барьеров между эпикардальным жиром и миокардом создает условия для прямого

паракринного взаимодействия [7]. Морфологические и функциональные особенности эпикардialного жира включают высокую скорость липолиза, инсулинорезистентность и секрецию широкого спектра биологически активных молекул – адипокинов, хемокинов, цитокинов и факторов роста [15].

Накопленные экспериментальные данные свидетельствуют, что эпикардialная жировая ткань в физиологических условиях выполняет протективные функции, обеспечивая механическую защиту коронарных артерий, термогенез и энергетический субстрат для кардиомиоцитов. Однако при избыточном накоплении ЭЖ может происходить дисбаланс в продукции про- и противовоспалительных адипокинов с преобладанием секреции провоспалительных цитокинов, таких как интерлейкин-6 (ИЛ-6), фактор некроза опухоли- α (ФНО- α), моноцитарный хемоаттрактантный протеин-1 (MCP-1) и резистин [1]. Одновременно происходит снижение продукции противовоспалительных адипокинов, включая адипонектин. Данный дисбаланс рассматривается как потенциальный медиатор атерогенеза, эндотелиальной дисфункции и дестабилизации атеросклеротических бляшек.

Несмотря на растущее количество исследований, посвященных эпикардialному жиру, ряд ключевых вопросов остается нерешенным. Во-первых, существует неопределенность относительно независимости ассоциации между объемом эпикардialного жира и сердечно-сосудистым риском от традиционных факторов риска и других параметров ожирения. Во-вторых, недостаточно изучены пороговые значения объема эпикардialного жира, при которых значимо повышается вероятность развития коронарных событий. В-третьих, остается дискуссионным вопрос о практической ценности измерения объема эпикардialного жира для стратификации риска в клинической практике [17].

Целью настоящего обзора является систематизация современных данных о взаимосвязи между объемом эпикардialного жира и сердечно-сосудистым риском, с акцентом на патофизиологические механизмы, методы количественной оценки и клиническую значимость данного показателя.

Материалы и методы

Настоящий обзор литературы был выполнен с использованием систематического подхода к поиску, отбору и анализу научных публикаций, посвященных взаимосвязи эпикардialного жира и риска развития ССЗ. Стратегия информационного поиска включала использование электронных баз данных медицинской литературы: MedLine, PubMed, CochraneLibrary,

nih.gov и e-library по ключевым словам. Дополнительно были проанализированы материалы из базы данных клинических исследований ClinicalTrials.gov и архива научных статей medRxiv. Поиск охватывал период с 2003 года по май 2025 года.

Отбор публикаций для дальнейшего анализа осуществлялся на основе предварительно разработанных критериев включения и исключения. Критерии включения предусматривали:

- 1) оригинальные исследования, метаанализы, систематические обзоры и клинические рекомендации;
- 2) исследования, в которых изучалась взаимосвязь между объемом эпикардального жира и сердечно-сосудистым риском;
- 3) использование валидированных методов оценки объема эпикардального жира;
- 5) четкое описание методологии исследования с указанием статистических методов анализа.

Критерии исключения включали:

- 1) исследования, в которых не проводилось четкого разграничения между эпикардальным и паракардальным жиром;
- 2) клинические случаи и серии случаев с участием менее 10 пациентов;
- 3) дублирующие публикации.

Эпикардальный жир:

определение и анатомо-физиологические особенности

Терминологическая неоднозначность в литературе проявляется в использовании разных обозначений для эпикардального жира, включая «перикардальный жир», «паракардальный жир» и «эпикардальная жировая ткань». В соответствии с современной классификацией, эпикардальный жир определяется как жировая ткань, расположенная между миокардом и висцеральным листком перикарда, в отличие от паракардального жира, находящегося снаружи от париетального листка перикарда [18]. Данное разграничение имеет принципиальное значение, поскольку эти жировые депо имеют различное эмбриональное происхождение, кровоснабжение и потенциальные патофизиологические эффекты.

Эпикардальный жир имеет общее эмбриологическое происхождение с интраабдоминальным висцеральным жиром, развиваясь из спланхноплевральной мезодермы. Кровоснабжение эпикардального жира осуществляется непосредственно из коронарных артерий, что способствует быстрому метаболическому и паракринному взаимодействию с миокардом и коронарными сосудами [23].

Физиологические функции эпикардального жира включают:

1. Термогенез и защиту миокарда от гипотермии.
2. Механическую защиту коронарных артерий.
3. Обеспечение энергетическим субстратом кардиомиоцитов (жирные кислоты).
4. Секрецию противовоспалительных адипокинов и цитокинов.
5. Буферную функцию при избытке свободных жирных кислот в кровотоке.

В нормальных физиологических условиях эпикардальный жир секретирует адипонектин, оментин и другие адипокины с противовоспалительным и кардиопротективным действием [20]. Однако при избыточном накоплении эпикардального жира происходит его дисфункция, проявляющаяся дисбалансом в секреции адипокинов и цитокинов, с преобладанием провоспалительных факторов, таких как ИЛ-6, ФНО- α , ИЛ-1 β , лептин, висфатин и резистин [6]. Этот дисбаланс может способствовать развитию локального и системного воспаления, эндотелиальной дисфункции, инсулинорезистентности и атеросклероза.

Методы оценки эпикардального жира

Развитие методов визуализации позволило разработать различные подходы к количественной оценке эпикардального жира. Наиболее распространенными методами являются эхокардиография, компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ).

Эхокардиография представляет собой наиболее доступный метод оценки эпикардального жира, позволяющий измерить его толщину в различных точках, чаще всего на уровне свободной стенки правого желудочка в парастеральной позиции по длинной оси [8]. Однако данный метод имеет ряд ограничений, включая оператор-зависимость, ограниченное акустическое окно и возможность измерения только линейных параметров, но не объема эпикардального жира.

Компьютерная томография является «золотым стандартом» для количественной оценки объема эпикардального жира (ОЭЖ). [12] Мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) позволяет точно идентифицировать эпикардальный жир по его характерной плотности (от -190 до -30 единиц Хаунсфилда) и четко дифференцировать его от миокарда и перикардального выпота [3]. Современные программные алгоритмы обеспечивают полуавтоматическое или полностью автоматическое измерение объема эпикардального жира, что повышает воспроизводимость результатов и снижает вариабельность между исследователями.

Магнитно-резонансная томография обеспечивает высокое пространственное разрешение и контрастность между различными типами тканей без использования ионизирующего излучения, что делает ее идеальным методом для исследований с динамическим наблюдением [25]. Однако высокая стоимость и меньшая доступность ограничивают широкое применение МРТ для оценки эпикардального жира в клинической практике.

В научных исследованиях все чаще используются гибридные методы визуализации, такие как позитронно-эмиссионная томография в сочетании с КТ (ПЭТ-КТ), позволяющие оценивать не только объем, но и метаболическую активность эпикардального жира [9]. Это открывает новые возможности для изучения функциональных аспектов эпикардальной жировой ткани и их связи с сердечно-сосудистым риском.

Эпикардальный жир и метаболические нарушения

Многочисленные исследования демонстрируют тесную взаимосвязь между объемом эпикардального жира и различными компонентами метаболического синдрома. Увеличение объема эпикардального жира ассоциировано с прогрессивным ухудшением липидного профиля и параметров углеводного обмена. Особенно выраженные изменения наблюдаются в отношении триглицеридов. Анализ многочисленных исследований демонстрирует взаимосвязь между ОЭЖ и маркерами инсулинорезистентности. Примечательно, что эта ассоциация сохраняется даже после коррекции на индекс массы тела (ИМТ) и другие показатели общего ожирения, что подчеркивает независимый вклад эпикардального жира в развитие инсулинорезистентности.

Клинические исследования показывают, что увеличение объема эпикардального жира ассоциировано с повышенным риском развития сахарного диабета 2 типа [21].

Эпикардальный жир и воспаление

Одним из ключевых механизмов, связывающих эпикардальный жир с сердечно-сосудистым риском, является хроническое субклиническое воспаление. Избыточное накопление эпикардального жира сопровождается инфильтрацией макрофагами и другими иммунными клетками, что приводит к изменению секреторного профиля данного жирового депо [5]. Увеличение объема эпикардального жира ассоциировано с прогрессивным повышением уровней провоспалительных маркеров (высокочувствительный СРБ, ИЛ-6, ФНО- α) и снижением концентрации противовоспалительного адипонектина [13].

Исследования биоптатов эпикардального жира у пациентов, подвергающихся кардиохирургическим вмешательствам, выявили повышенную экспрессию провоспалительных цитокинов и хемокинов в эпикардаль-

ной жировой ткани по сравнению с подкожным жиром [17]. Примечательно, что уровень экспрессии воспалительных маркеров в эпикардальном жире коррелирует с выраженностью коронарного атеросклероза.

Экспериментальные исследования показывают, что секретируемые эпикардальным жиром цитокины и хемокины могут диффундировать в миокард и коронарные артерии, вызывая локальное воспаление, эндотелиальную дисфункцию и оксидативный стресс [24]. Этот механизм рассматривается как один из ключевых в патогенезе атеросклероза, ассоциированного с избыточным накоплением эпикардального жира.

Эпикардальный жир и атеросклероз

Взаимосвязь между объемом эпикардального жира и коронарным атеросклерозом является предметом многочисленных исследований. Выявлена дозозависимая ассоциация между ОЭЖ и выраженностью коронарного атеросклероза. Особого внимания заслуживает тот факт, что частота выявления некальцинированных бляшек, считающихся более уязвимыми и склонными к разрыву, также значимо выше у пациентов с избыточным эпикардальным жиром. Это наблюдение предполагает, что эпикардальный жир может играть роль не только в прогрессировании атеросклероза, но и в дестабилизации атеросклеротических бляшек [4].

Прогностическая значимость эпикардального жира

Клиническая ценность количественной оценки эпикардального жира определяется его прогностической значимостью в отношении сердечно-сосудистых событий. Проспективные исследования демонстрируют, что объем эпикардального жира является независимым предиктором неблагоприятных сердечно-сосудистых исходов [10]. Мета-анализ исследований показал, что увеличение объема эпикардального жира ассоциировано с повышенным риском сердечно-сосудистых событий после коррекции на традиционные факторы риска. При этом наибольшая прогностическая ценность эпикардального жира отмечалась в подгруппе пациентов с промежуточным кардиоваскулярным риском по традиционным шкалам.

Особый интерес представляет анализ подгрупп, который показал, что ассоциация между ОЭЖ и сердечно-сосудистыми событиями более выражена у женщин, пациентов моложе 60 лет и лиц с нормальным ИМТ. Это наблюдение имеет важное клиническое значение, поскольку традиционная стратификация риска может недооценивать кардиоваскулярную угрозу именно в этих категориях пациентов. Включение объема эпикардального жира в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний повысит достоверность прогноза заболеваний.

Пороговые значения объема эпикардального жира

Для практического применения количественной оценки эпикардального жира критически важным является определение пороговых значений, при превышении которых значимо возрастает кардиоваскулярный риск. Эта задача осложняется различиями в методологии измерения ОЭЖ, а также вариабельностью данного показателя в зависимости от пола, возраста, этнической принадлежности и других факторов.

Анализ, проведенный в рамках различных исследований, позволил определить оптимальные пороговые значения ОЭЖ для прогнозирования сердечно-сосудистых событий. Пациенты с $\text{ОЭЖ} > 125 \text{ см}^3$ имели в 2,8 раза более высокий риск развития сердечно-сосудистых событий по сравнению с пациентами с $\text{ОЭЖ} \leq 125 \text{ см}^3$.

Важно отметить, что пороговые значения ОЭЖ могут различаться в зависимости от пола, возраста и этнической принадлежности. Так, гендер-специфический анализ показал, что оптимальное пороговое значение ОЭЖ для прогнозирования сердечно-сосудистых событий составляет 115 см^3 для женщин и 140 см^3 для мужчин. Эти различия объясняются гендерными особенностями распределения жировой ткани и более высоким базальным уровнем ОЭЖ у мужчин.

Для пациентов азиатской популяции пороговые значения ОЭЖ, как правило, ниже по сравнению с европеоидной расой. Это обусловлено как особенностями телосложения, так и более высокой частотой метаболических нарушений при меньших значениях ИМТ и ОЭЖ у представителей азиатской популяции.

Учитывая вариабельность пороговых значений в различных популяциях и при использовании разных методик, в настоящее время рекомендуется применять популяционно-специфические нормативы ОЭЖ для корректной стратификации риска.

Потенциальные терапевтические стратегии

Учитывая выявленную взаимосвязь между объемом эпикардального жира и сердечно-сосудистым риском, возникает закономерный интерес к терапевтическим стратегиям, направленным на уменьшение объема и модификацию функциональной активности эпикардального жира. [11]

Немедикаментозные вмешательства, такие как диета и физическая активность, демонстрируют умеренную эффективность в отношении снижения объема эпикардального жира. Рандомизированное контролируемое исследование с участием пациентов с ожирением показало, что 6-месячная программа модификации образа жизни (средиземноморская диета и

регулярная физическая активность) привела к уменьшению объема эпикардального жира, что сопровождалось улучшением метаболических параметров и снижением маркеров воспаления. [2] Среди фармакологических вмешательств наибольший интерес представляют препараты, воздействующие на метаболические и воспалительные пути, ассоциированные с дисфункцией жировой ткани.

Ингибиторы SGLT-2 (эмпаглифлозин, дапаглифлозин, канаглифлозин) продемонстрировали способность уменьшать объем эпикардального жира у пациентов с сахарным диабетом 2 типа. Необходимо отметить, что большинство исследований, оценивающих влияние фармакологических вмешательств на эпикардальный жир, имеют ограниченную продолжительность наблюдения и не позволяют оценить долгосрочное влияние этих изменений на сердечно-сосудистые исходы. Требуются дальнейшие исследования для определения оптимальных терапевтических стратегий, направленных на модификацию объема и функции эпикардального жира, а также для оценки их влияния на прогноз пациентов.

Заключение

Обобщение современных данных о взаимосвязи между эпикардальным жиром и сердечно-сосудистым риском позволяет сделать следующие выводы:

1. Эпикардальный жир представляет собой метаболически активное висцеральное жировое депо, анатомически и функционально связанное с миокардом и коронарными артериями.

2. Избыточное накопление эпикардального жира ассоциировано с дисбалансом в секреции адипокинов и цитокинов, что способствует развитию локального и системного воспаления, инсулинорезистентности, эндотелиальной дисфункции и атеросклероза.

3. Компьютерная томография является «золотым стандартом» для количественной оценки объема эпикардального жира, обеспечивая высокую точность и воспроизводимость результатов.

4. Объем эпикардального жира прогрессивно увеличивается с возрастом и демонстрирует сильную корреляцию с маркерами метаболических нарушений, воспаления и субклинического атеросклероза.

5. Установлены пороговые значения объема эпикардального жира ($>125 \text{ см}^3$), превышение которых ассоциировано с значительным увеличением риска неблагоприятных сердечно-сосудистых исходов.

6. Прогностическая значимость эпикардального жира сохраняется после коррекции на традиционные факторы риска и показатели общего

ожирения, что позволяет рассматривать его как независимый предиктор сердечно-сосудистых событий.

7. Включение данных об объеме эпикардального жира в прогностические модели повышает их дискриминационную способность по сравнению с традиционными шкалами оценки риска.

8. Ассоциация между объемом эпикардального жира и сердечно-сосудистым риском наиболее выражена у женщин, лиц моложе 60 лет и пациентов с нормальным ИМТ, что имеет важное значение для стратификации риска в этих категориях пациентов.

9. Диета, физическая активность и определенные фармакологические вмешательства способны уменьшать объем эпикардального жира, однако влияние этих изменений на долгосрочный прогноз требует дальнейшего изучения.

Суммируя вышеизложенное, можно заключить, что количественная оценка эпикардального жира представляет собой перспективный инструмент для стратификации кардиоваскулярного риска, особенно у пациентов с промежуточным риском по традиционным шкалам или при наличии метаболически нездорового фенотипа при нормальном ИМТ. Дальнейшие исследования необходимы для оптимизации методов оценки эпикардального жира, уточнения его патофизиологической роли в развитии сердечно-сосудистых заболеваний и разработки таргетных терапевтических стратегий, направленных на модификацию объема и функции эпикардальной жировой ткани.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00197-26-00 от 24.12.2025 г. на 2026 год, проект FSGN-2924-0014 (1024041900023-6-3.1.3;3.2.12;3.2.4)

Список литературы / References

1. Antonopoulos, A. S., & Antoniades, C. (2017). The role of epicardial adipose tissue in cardiac biology: Classic concepts and emerging roles. *The Journal of Physiology*, 595(12), 3907–3917. <https://doi.org/10.1113/JP273049>
2. Christensen, R. H., von Scholten, B. J., Hansen, C. S., Heywood, S. E., Rosenmeier, J. B., Andersen, U. B., Hovind, P., Reinhard, H., Parving, H.-H., Pedersen, B. K., Jørgensen, M. E., Jacobsen, P. K., & Rossing, P. (2017). Epicardial, pericardial and

- total cardiac fat and cardiovascular disease in type 2 diabetic patients with elevated urinary albumin excretion rate. *European Journal of Preventive Cardiology*, 24(14), 1517–1524. <https://doi.org/10.1177/2047487317717820>
3. Commandeur, F., Goeller, M., Razipour, A., Cadet, S., Hell, M. M., Kwiecinski, J., Chen, X., Chang, H.-J., Marwan, M., Achenbach, S., Berman, D. S., Slomka, P. J., Tamarappoo, B. K., & Dey, D. (2019). Fully automated CT quantification of epicardial adipose tissue by deep learning: A multicenter study. *Radiology: Artificial Intelligence*, 1(6), e190045. <https://doi.org/10.1148/ryai.2019190045>
 4. Goeller, M., Achenbach, S., Marwan, M., Doris, M. K., Cadet, S., Commandeur, F., Chen, X., Slomka, P. J., Gransar, H., Cao, J. J., Wong, N. D., Albrecht, M. H., Rozanski, A., Tamarappoo, B. K., Berman, D. S., & Dey, D. (2018). Epicardial adipose tissue density and volume are related to subclinical atherosclerosis, inflammation and major adverse cardiac events in asymptomatic subjects. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, 12(1), 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2017.11.007>
 5. Hirata, Y., Kurobe, H., Akaike, M., Chikugo, F., Hori, T., Bando, Y., Nishio, C., Higurashida, M., Nakaya, Y., Kitagawa, T., & Sata, M. (2011). Enhanced inflammation in epicardial fat in patients with coronary artery disease. *International Heart Journal*, 52(3), 139–142. <https://doi.org/10.1536/ihj.52.139>
 6. Iacobellis, G., Corradi, D., & Sharma, A. M. (2005). Epicardial adipose tissue: Anatomic, biomolecular and clinical relationships with the heart. *Nature Clinical Practice. Cardiovascular Medicine*, 2(10), 536–543. <https://doi.org/10.1038/ncp-cardio0319>
 7. Iacobellis, G., Corradi, D., & Sharma, A. M. (2005). Epicardial adipose tissue: Anatomic, biomolecular and clinical relationships with the heart. *Nature Clinical Practice. Cardiovascular Medicine*, 2(10), 536–543. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2011.07.003>
 8. Iacobellis, G., & Willens, H. J. (2009). Echocardiographic epicardial fat: A review of research and clinical applications. *Journal of the American Society of Echocardiography*, 22(12), 1311–1319. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2009.10.013>
 9. Janik, M., Hartlage, G., Alexopoulos, N., Mirzoyev, Z., McLean, D. S., Arepalli, C. D., Chen, Z., Stillman, A. E., & Raggi, P. (2010). Epicardial adipose tissue volume and coronary artery calcium to predict myocardial ischemia on positron emission tomography-computed tomography studies. *Journal of Nuclear Cardiology*, 17(5), 841–847. <https://doi.org/10.1007/s12350-010-9235-1>. EDN: <https://elibrary.ru/EFWZCF>
 10. Lin, A., Wong, N. D., Razipour, A., McElhinney, P. A., Commandeur, F., Cadet, S. J., Gransar, H., Chen, X., Cantu, S., Miller, R. J. H., Nerlekar, N., Wong, D. T. L., Slomka, P. J., Rozanski, A., Tamarappoo, B. K., Berman, D. S., & Dey, D. (2021).

- Metabolic syndrome, fatty liver, and artificial intelligence-based epicardial adipose tissue measures predict long-term risk of cardiac events: A prospective study. *Cardiovascular Diabetology*, 20, 27. <https://doi.org/10.1186/s12933-021-01220-x>
11. Mahabadi, A. A., Lehmann, N., Kälsch, H., Robens, T., Bauer, M., Dykun, I., Budde, T., Moebus, S., Jöckel, K.-H., Erbel, R., & Möhlenkamp, S. (2014). Association of epicardial adipose tissue with progression of coronary artery calcification is more pronounced in the early phase of atherosclerosis: Results from the Heinz Nixdorf Recall Study. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 7(9), 909–916. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2014.07.002>
 12. Mancio, J., Azevedo, D., Saraiva, F., Azevedo, A. I., Pires-Morais, G., Leite-Moreira, A., Falcao-Pires, I., Lunet, N., & Bettencourt, N. (2018). Epicardial adipose tissue volume assessed by computed tomography and coronary artery disease: A systematic review and meta-analysis. *European Heart Journal: Cardiovascular Imaging*, 19(5), 490–497. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jex314>
 13. Mazurek, T., Zhang, L., Zalewski, A., Mannion, J. D., Diehl, J. T., Arafat, H., Sarov-Blat, L., O'Brien, S., Keiper, E. A., Johnson, A. G., Martin, J., Goldstein, B. J., & Shi, Y. (2003). Human epicardial adipose tissue is a source of inflammatory mediators. *Circulation*, 108(20), 2460–2466. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000099542.57313.C5>
 14. Neeland, I. J., Ross, R., Després, J.-P., Matsuzawa, Y., Yamashita, S., Shai, I., Seidell, J., Magni, P., Santos, R. D., Arsenault, B., Cuevas, A., Hu, F. B., Griffin, B., Zambon, A., Barter, P., Fruchart, J.-C., Eckel, R. H.; International Atherosclerosis Society; International Chair on Cardiometabolic Risk Working Group on Visceral Obesity. (2019). Visceral and ectopic fat, atherosclerosis, and cardiometabolic disease: A position statement. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 7(9), 715–725. [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(19\)30084-1](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(19)30084-1). EDN: <https://elibrary.ru/LFATGL>
 15. Patel, V. B., Shah, S., Verma, S., & Oudit, G. Y. (2017). Epicardial adipose tissue as a metabolic transducer: Role in heart failure and coronary artery disease. *Heart Failure Reviews*, 22(6), 889–902. <https://doi.org/10.1007/s10741-017-9644-1>. EDN: <https://elibrary.ru/PKOCRU>
 16. Packer, M. (2018). Epicardial adipose tissue may mediate deleterious effects of obesity and inflammation on the myocardium. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(20), 2360–2372. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.03.509>. EDN: <https://elibrary.ru/PYZGHC>
 17. Prati, F., Arbustini, E., Labellarte, A., Sommariva, L., Pawlowski, T., Manzoli, A., Pagano, A., Motolese, M., & Boccanelli, A. (2003). Eccentric atherosclerotic plaques with positive remodelling have a pericardial distribution: A permissive role of epicardial fat? A three-dimensional intravascular ultrasound study of left anterior descend-

- ing artery lesions. *European Heart Journal*, 24(4), 329–336. [https://doi.org/10.1016/s0195-668x\(02\)00426-8](https://doi.org/10.1016/s0195-668x(02)00426-8). EDN: <https://elibrary.ru/INUODV>
18. Raggi, P. (2014). Epicardial adipose tissue and progression of coronary artery calcium: Cause and effect or simple association? *JACC: Cardiovascular Imaging*, 7(9), 917–919. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2014.07.004>
 19. Rosito, G. A., Massaro, J. M., Hoffmann, U., Ruberg, F. L., Mahabadi, A. A., Vasan, R. S., O'Donnell, C. J., & Fox, C. S. (2008). Pericardial fat, visceral abdominal fat, cardiovascular disease risk factors, and vascular calcification in a community-based sample: The Framingham Heart Study. *Circulation*, 117(5), 605–613. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.743062>
 20. Roth, G. A., Mensah, G. A., Johnson, C. O., Addolorato, G., Ammirati, E., Baddour, L. M., Barengo, N. C., Beaton, A. Z., Benjamin, E. J., Benziger, C. P., Bonny, A., Brauer, M., Brodmann, M., Cahill, T. J., Carapetis, J., Catapano, A. L., Chugh, S. S., Cooper, L. T., Coresh, J., Criqui, M., DeCleene, N., Eagle, K. A., Emmons-Bell, S., Feigin, V. L., Fernández-Solà, J., Fowkes, G., Gakidou, E., Grundy, S. M., He, F. J., Howard, G., Hu, F., Inker, L., Karthikeyan, G., Kassebaum, N., Koroshetz, W., Lavie, C., Lloyd-Jones, D., Lu, H. S., Mirijello, A., Temesgen, A. M., Mokdad, A., Moran, A. E., Muntner, P., Narula, J., Neal, B., Ntsekhe, M., de Oliveira, G. M., Otto, C., Owolabi, M., Pratt, M., Rajagopalan, S., Reitsma, M., Ribeiro, A. L. P., Rigotti, N., Rodgers, A., Sable, C., Shakil, S., Sliwa-Hahnle, K., Stark, B., Sundström, J., Timpel, P., Tleyjeh, I. M., Valgimigli, M., Vos, T., Whelton, P. K., Yacoub, M., Zuhlke, L., Murray, C., & Fuster, V.; GBD-NHLBI-JACC Global Burden of Cardiovascular Diseases Writing Group. (2020). Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: Update from the GBD 2019 Study. *Journal of the American College of Cardiology*, 76(25), 2982–3021. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.11.010>. EDN: <https://elibrary.ru/IQJFIO>
 21. Salazar, J., Luzardo, E., Mejías, J. C., Rojas, J., Ferreira, A., Rivas-Rios, J. R., & Bermúdez, V. (2016). Epicardial fat: Physiological, pathological, and therapeutic implications. *Cardiology Research and Practice*, 1291537. <https://doi.org/10.1155/2016/1291537>
 22. Sinha, S. K., Thakur, R., Jha, M. J., Goel, A., Kumar, V., Kumar, A., Mishra, V., Varma, C. M., Krishna, V., Singh, A. K., & Sachan, M. (2016). Epicardial adipose tissue thickness and its association with the presence and severity of coronary artery disease in clinical setting: A cross-sectional observational study. *Journal of Clinical Medicine Research*, 8(5), 410–419. <https://doi.org/10.14740/jocmr2468w>
 23. Talman, A. H., Psaltis, P. J., Cameron, J. D., Meredith, I. T., Seneviratne, S. K., & Wong, D. T. L. (2014). Epicardial adipose tissue: Far more than a fat depot. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, 4(6), 416–429. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2223-3652.2014.11.05>

24. Yudkin, J. S., Eringa, E., & Stehouwer, C. D. A. (2005). “Vasocrine” signalling from perivascular fat: A mechanism linking insulin resistance to vascular disease. *The Lancet*, 365(9473), 1817–1820. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)66585-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)66585-3)
25. Wong, C. X., Abed, H. S., Molaei, P., Nelson, A. J., Brooks, A. G., Sharma, G., Leong, D. P., Lau, D. H., Middeldorp, M. E., Roberts-Thomson, K. C., Wittert, G. A., Abhayaratna, W. P., Worthley, S. G., & Sanders, P. (2011). Pericardial fat is associated with atrial fibrillation severity and ablation outcome. *Journal of the American College of Cardiology*, 57(17), 1745–1751. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2010.11.045>

ВКЛАД АВТОРОВ

Зюзина А.А.: общая концепция исследования, интерпретация данных, написание текста статьи.

Вишневский В.И.: планирование исследования, редактирование рукописи статьи, руководство.

Снимщикова И.А.: планирование исследования, редактирование рукописи статьи, руководство.

Ревякина М.О.: общая концепция исследования, интерпретация данных, написание текста статьи.

Вишневский М.В.: анализ литературы и подборка библиографических источников.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anastasia A. Zyuzina: general research concept, data interpretation, and article writing.

Valery I. Vishnevsky: research planning, article manuscript editing, and supervision.

Irina A. Snimshchikova: research planning, article manuscript editing, and supervision.

Maria O. Revyakina: general research concept, data interpretation, and article writing.

Matvey V. Vishnevsky: literature analysis and bibliographic source selection.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Зюзина Анастасия Андреевна, аспирант кафедры внутренних болезней
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
ул. Комсомольская, 95, г. Орел, 302026, Российская Федерация
9066608565@mail.ru

Вишневский Валерий Иванович, доктор медицинских наук, профессор, зав. кафедрой внутренних болезней
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
ул. Комсомольская, 95, г. Орел, 302026, Российская Федерация
vishnevsky.orel@mail.ru

Снимщикова Ирина Анатольевна, ведущий научный сотрудник лаборатории новых медицинских технологий, заведующий кафедрой иммунологии и специализированных клинических дисциплин, директор Медицинского института, доктор медицинских наук, профессор
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
ул. Комсомольская, 95, г. Орел, 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
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
ул. Комсомольская, 95, г. Орел, 302026, Российская Федерация
revyakina_masha@mail.ru

Вишневский Матвей Вадимович, студент
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
ул. Комсомольская, 95, г. Орел, 302026, Российская Федерация
ipakoyni@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anastasia A. Zyuzina, Postgraduate Student of the Department of Internal Diseases
Orel State University
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
9066608565@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2551-0204>

Valery I. Vishnevsky, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Internal Medicine
Orel State University
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation
vishnevsky.orel@mail.ru
SPIN-code: 1445-6976
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3004-9687>
ResearcherID: U-4277-2017
Scopus Author ID: 56700251100

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

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

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

Matvey V. Vishnevsky, Student

Orel State University

95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation

ipakoyni@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0953-0058>

Поступила 20.06.2025

После рецензирования 01.08.2025

Принята 05.08.2025

Received 20.06.2025

Revised 01.08.2025

Accepted 05.08.2025

Научные обзоры и сообщения / Scientific Reviews and Reports

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418)EDN: [SBLMDD](https://edn.sci.org/entry/SBLMDD)

УДК 664.68



Подход Zero Waste на предприятиях питания: направления развития экономики замкнутого цикла

О.А. Суворов¹, Р.Х. Кандроков², Д.А. Песоцкая¹,
Ю.В. Николаева¹, М.А. Шанк^{3,4}

¹Университет РОСБИОТЕХ, Москва, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва,
Российская Федерация

³МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Российская Федерация

⁴Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэнь, Шэньчжэнь,
Китайская Народная Республика

Аннотация

Обоснование. От сельскохозяйственного производства до внутреннего потребления продукции пищевая промышленность ежегодно производит огромное количество отходов, что приводит к загрязнению почвы, воды и воздуха, поэтому валоризация пищевых отходов является актуальным вопросом индустрии питания.

Целью обзора предметного поля является анализ применяемых методов экономики замкнутого цикла, изучение возможности использования отходов цитрусовых в пищевой промышленности и способов экстракции пектина.

Методы. В работу включен анализ предметного поля, систематизированы научные источники опубликованных работ о способах внедрения экономики замкнутого цикла международных научных публикаций из высокорейтинговых изданий Scopus и Google Scholar с 2020 по 2024 год по вопросам актуальных подходов к внедрению экономики замкнутого цикла на пищевых производствах.

Полученные результаты. Рассмотрены методы повторного применения отходов цитрусовых, новых и комбинированных методов экстракции и внедрение этих технологий в экономику замкнутого цикла. Описаны направления в исследованиях относительно применяемых методов экономики замкнутого цикла, возможности использования отходов цитрусовых в пищевой промышленности и способы экстракции пектина. Изучение возможностей по включению различных экстрактов в различные блюда и продукты, а также оценка их сенсорных и питательных харак-

теристик станет важным направлением для будущих исследований. Полученные в ходе обзора данные могут служить основой для проектирования экспериментов, посвященных изучению свойств и методов получения эфирных масел и других биологически активных соединений из отходов цитрусовых.

Заключение. Выявлены три главных тренда в сфере применения отходов цитрусовых в пищевой промышленности; три ключевые тенденции в области экстракции пектина и пять организационно-технологических направлений развития организации и применения стратегии экономики замкнутого цикла. Особое значение имеет исследование щадящих методов экстракции, которые обеспечивают сохранение биоактивных компонентов при минимальных энергетических затратах. По результатам проведенного обзора выявлено необходимость более глубокого изучения вторичной переработки отходов овощей и фруктов, а также повышения осведомленности производителей о принципах экономики замкнутого цикла и способах их внедрения в производственные процессы.

Ключевые слова: индустрия питания; безотходное производство; переработка; цитрусовые; экстракция; пектин

Для цитирования. Суворов, О. А., Кандроков, Р. Х., Песоцкая, Д. А., Николаева, Ю. В., & Шанк, М. А. (2026). Подход Zero Waste на предприятиях питания: направления развития экономики замкнутого цикла. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 457–478. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418>

Zero Waste approach in food enterprises: directions for development of closed-loop economy

O.A. Suvorov¹, R.H. Kandrov², D.A. Pesotskaya¹,
Y.V. Nikolaeva¹, M.A. Shank^{3,4}

¹*Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russian Federation*

²*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

⁴*MSU-PPI University in Shenzhen, Shenzhen, P.R. China*

Abstract

Background. From agricultural production to domestic consumption of products, the food industry produces a huge amount of waste every year, which leads to pollution of soil, water and air, so the valorization of food waste is a pressing issue in the food industry.

The **purpose** of the review of the subject field is to analyze the applied methods of the closed-loop economy, study the possibility of using citrus waste in the food industry and methods of pectin extraction.

Methods. The work includes an analysis of the subject field and systematized scientific sources of published works on ways to implement the closed-loop economy of international scientific publications from highly rated publications Scopus and google scholar from 2020 to 2024 on topical approaches to the introduction of the closed-loop economy in food production.

Results. The article reviews methods for reusing citrus waste, new and combined extraction methods, and the introduction of these technologies into a circular economy. Research trends in the applied circular economy methods, the possibilities of using citrus waste in the food industry, and methods for extracting pectin are described. Studying the possibilities of incorporating various extracts into various dishes and products, as well as assessing their sensory and nutritional characteristics, will be an important area for future research. The data obtained in the review can serve as a basis for designing experiments devoted to studying the properties and methods for obtaining essential oils and other biologically active compounds from citrus waste.

Conclusion. Three main trends in the use of citrus waste in the food industry were identified; three key trends in the field of pectin extraction and five organizational and technological directions for the development of the organization and the application of a closed-loop economy strategy. Of particular importance is the study of gentle extraction methods that ensure the preservation of bioactive components with minimal energy costs. This requires a more in-depth study of the recycling of vegetable and fruit waste, as well as raising awareness among producers of the principles of the closed-loop economy and how to implement them in production processes.

Keywords: food industry; zero waste; recycling; citrus; extraction; pectin

For citation. Suvorov, O. A., Kandrov, R. Kh., Pesotskaya, D. A., Nikolaeva, Yu. V., & Shank, M. A. (2026). Zero Waste approach in food enterprises: directions for development of closed-loop economy. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 457–478. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418>

Введение

Кожура, семена, непригодная мякоть составляют 40% от общего количества растительной пищи в цитрусовых, поскольку они обычно выбрасываются и могут быть преобразованы в основные побочные продукты [1; 2]. Эти пищевые побочные продукты богаты органическими кислотами, минералами, пищевыми волокнами, сахарами и биологически активными соединениями и содержат некоторые полифенолы и каротиноиды, что привело к росту интереса к их использованию в качестве натуральных ингредиентов, альтернативных синтетическим ингредиентам при производстве высококачественных соединений, поскольку они используются в

различных промышленных областях, таких как нутрицевтика, пищевая промышленность, косметика и фармацевтика [3; 4].

Согласно экономическим, экологическим и фармацевтическим данным обзора, остатки переработки цитрусовых должны быть преобразованы из отходов, подлежащих утилизации, в ценный ресурс для повторного использования [5; 6]. На основе модели круговой экономики остатки цитрусовых (семена, кожура, отжатая мякоть, вторичный сок и листья) все чаще перерабатываются, чтобы получить ценные соединения для использования в пищевой промышленности [7].

Обзор предметного поля показал следующие актуальные, но еще до конца не изученные направления:

1. Как повторное использование отходов цитрусовых повлияет на экономику замкнутого цикла;
2. Применение отходов цитрусовых в сфере пищевых технологий;
3. Новые и наиболее эффективные методы экстракции.

Целью данного обзора предметного поля являлось обобщение и систематизация идей и способов применения отходов цитрусовых как способ внедрения экономики замкнутого цикла на предприятия общественного питания за последние 5 лет.

Исследовательские вопросы обзора:

1. Поможет ли вторичное использование отходов цитрусовых в развитии экономики замкнутого цикла?
2. Как эффективно и с наименьшим вложением ресурсов использовать отходы цитрусовых?
3. Возможна ли комбинация нескольких методов экстракции?

Материалы и методы

Стратегия поиска и источники информации

Чтобы ответить на вопрос нашего исследования, был проведен обзор литературы по интересующей нас теме (направления развития экономики замкнутого цикла) с указанием объема имеющихся исследований, ключевых характеристик, новых данных и пробелов в исследованиях с целью внесения вклада в дальнейшие разработки.

Материалами для анализа послужили статьи, опубликованные с 2020 по 2024 годы в таких базах данных как Scopus и Google Scholar. Кроме того, были изучены списки ссылок на включенные исследования и недавние публикации для выявления потенциальных исследований, которые также могли бы быть включены в обзор.

Всего было проанализировано 113 источников, из которых была выбрана 37 статей, отвечающая критериям отбора и релевантная теме обзора.

Ключевыми словами для осуществления поиска являлись следующие словосочетания: «citrus waste in the food industry», «pectin extraction methods», «recycling of waste», «closed-loop economics».

Критерии отбора источников и извлечение данных

Аналитический обзор включал следующие этапы: 1) определение вопроса исследования, 2) определение соответствующих исследований, 3) отбор исследований, 4) извлечение данных и 5) обобщение и представление результатов. Основной вопрос звучал так: “Как внедрение экономики замкнутого цикла влияет на пищевую индустрию?”. Критерии отбора источников были разделены на три группы. Подробно критерии включения и исключения представлены в таблице.

Таблица.

Критерии включения и исключения источников в обзор предметного поля

Table. Inclusion and Exclusion Criteria for Sources in a Review of a Subject Area

Критерий отбора	Характеристика
Тип публикаций	К рассмотрению принимались статьи из иностранных научных журналов и баз данных; статьи, опубликованные с 2020 года до даты проведения исследования; публикации на английском языке, независимо от страны, которую представляет автор.
Концепция	Все статьи были разбиты на 3 блока: 1) Экономика замкнутого цикла – в раздел включались статьи по внедрению технологии zero waste, способах повторного использования ресурсов, примеры предприятий, которые уже внедрили у себя технологию. 2) Отходы цитрусовых – отбор прошли статьи, авторы которых исследовали кожуру цитрусовых как сырье для вторичного использования. Включались статьи не только про пищевую индустрию, но и медицинская и технологическая отрасли. 3) Экстракция – наиболее важным соединением кожуры цитрусовых является пектин, поэтому именно его методы экстракции были включены в обзор. Новейшие разработки, наиболее эффективные и комбинированные методы принимались к рассмотрению.
Контекст	В обзор были включены статьи, в которых содержались какой-либо опыт по теме исследования методов повторного применения отходов цитрусовых. Также были включены документы с рекомендациями, в которых сообщалось о новых и комбинированных методах экстракции и их внедрение технологий в экономику замкнутого цикла. Исключались статьи, описывающие применение экономики замкнутого цикла не в пищевой индустрии; статьи, не относящиеся к теме вторичного использования отходов цитрусовых.

Данные извлекались двумя независимыми рецензентами. Процесс отбора состоял из двух этапов: 1) чтение названий и аннотаций и 2) чтение полных текстов. На обоих этапах проводилось консенсусное совещание для обсуждения потенциально приемлемых исследований, отвечающих критериям включения в исследование (таблица). В случае разногласий между рецензентами для принятия решения обращались к третьему рецензенту. Потенциально приемлемые документы были сведены в таблицу данных и проанализированы двумя рецензентами перед включением в окончательный обзор. Была создана стандартная электронная таблица EXCEL, которая включала следующие данные: название соответствующего учреждения, географический охват документа, год публикации документа, цели и описание документа.

Данный обзор предметного поля опирался на алгоритм протокола PRISMA (Рисунок). Как свидетельствует протокол PRISMA, было рассмотрено 113 статей и после исключения дублирующих статей и тех, что не касались цитрусовых, осталось 37 статей, которые вошли в обзор.

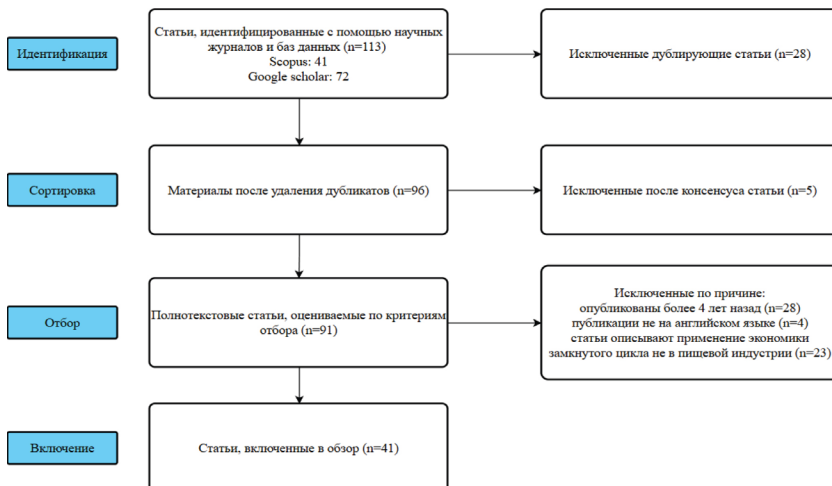


Рис. Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA

Fig. Flowchart illustrating the study selection process, in accordance with the PRISMA protocol

Результаты исследований и их обсуждение

На основе обзора литературы, реализации задуманной цели и ответов на поставленные исследовательские вопросы. Данные были разбиты на 3

раздела: «Экономика замкнутого цикла и повторное использование отходов в пищевой промышленности». «Применение отходов цитрусовых в пищевой промышленности» и «Методы экстракции пектина».

Экономика замкнутого цикла и повторное использование отходов в пищевой индустрии

Отходы, образующиеся при переработке сельскохозяйственного сырья и использовании вспомогательных материалов, таких как добавки, некоторые химические компоненты усиливают воздействие пищевой цепи на окружающую среду, что приводит к истощению природных ресурсов. В последние годы в производственных отраслях экономики, включая агропромышленный комплекс, предпринимаются попытки поддержания баланса между воздействием на окружающую среду, использованием ресурсов, благосостоянием населения и экономической выгодой [8; 9]. Эта тенденция стимулирует интенсивное развитие теории круговой (циклической) экономики или экономики замкнутого цикла и способствует поиску методов ее реализации в реальной экономической системе [10].

Применение побочных продуктов в качестве пищевых добавок

Применение побочных продуктов в качестве пищевых добавок представляет собой важный элемент устойчивого развития пищевой промышленности и поддержания принципов круговой экономики. Одной из ключевых стратегий в этом направлении является переработка отходов, таких как остатки апельсинов и виноградные выжимки, для создания ингредиентов, обогащенных биоактивными соединениями и пищевыми волокнами. Исследования показывают, что побочные продукты производства апельсинового сока, содержащие до 73,61% пищевых волокон, а также фенольные соединения и минералы, могут быть эффективно использованы для производства обогащенных продуктов, таких как печенье, без ухудшения сенсорных характеристик [5; 11; 12].

Инновационные методы переработки, такие как использование технологий 3D-печати, предлагают дополнительные возможности для использования побочных продуктов. Этот подход позволяет создавать продукты с индивидуальными характеристиками и поддерживает концепцию «отходы в богатство». Исследования демонстрируют, что добавление порошка виноградных выжимок в рецептуры способствует улучшению текстуры и структуры продуктов, а также поддерживает их функциональные свойства [13].

Разработка методов переработки побочных продуктов направлена на повышение их добавленной стоимости и создания функциональных продуктов питания. Включение таких ингредиентов позволяет не только снизить

объемы отходов, но и создать новые продукты, обогащенные пищевыми волокнами и биоактивными компонентами, которые могут поддерживать здоровье и удовлетворять спрос потребителей на продукты с высокой питательной ценностью. Эти стратегии играют важную роль в переходе к более устойчивым производственным практикам и помогают пищевой промышленности интегрировать принципы круговой экономики [14-16].

Использование отходов в качестве кормовой добавки для животных

Использование пищевых отходов в кормовой промышленности является важным направлением для устойчивого развития и минимизации потерь продовольствия [12; 13; 17]. Хлебные отходы, например, содержат значительное количество ферментируемых сахаров и белков, что делает их ценным ресурсом для производства кормов для животных [2; 18]. Хотя минимизация отходов остается важной целью, их полное исключение невозможно, поэтому переработка хлебных отходов в корма и другие продукты с высокой добавленной стоимостью становится перспективной стратегией. Помимо анаэробного сбраживания, хлебные отходы могут использоваться для создания биотоплива, фармацевтических продуктов и кормовых добавок, что открывает новые возможности для их валоризации [14; 19].

Потенциал использования насекомых в качестве преобразователей пищевых отходов также привлекает внимание исследователей. Насекомые способны перерабатывать биоразлагаемые отходы, создавая биомассу, пригодную для использования в кормах для животных. Данное решение позволяет замкнуть цикл питательных веществ и снизить воздействие пищевой промышленности на окружающую среду. Однако регуляторные ограничения препятствуют применению значительной части отходов в качестве субстрата для выращивания насекомых, что требует пересмотра и адаптации нормативных актов для полноценной реализации этого подхода [20].

Дополнительный потенциал использования отходов в кормовой промышленности представлен бывшими пищевыми продуктами, такими как макароны, хлеб, шоколад и кондитерские изделия [21]. Данные продукты могут быть переработаны в однородные кормовые добавки, обогащенные питательными веществами. Исследования подтверждают, что бывшие пищевые продукты и побочные продукты хлебопекарного производства можно безопасно использовать в рационах как моногастричных, так и жвачных животных без ущерба для их продуктивности [18; 21; 22]. Полученные данные позволяют не только позволяет переработать значительный объем пищевых отходов, но и снижает конкуренцию между человеком и животными за ценные продовольственные ресурсы, такие как пшеница.

Использование многоразовой и переработанной упаковки

Современные подходы к управлению упаковочными отходами сосредоточены на разработке устойчивых решений, которые минимизируют воздействие на окружающую среду. Основной акцент делается на использовании многоразовой и переработанной упаковки, что имеет особое значение для пищевой промышленности и цепочек поставок, где применяется значительное количество первичных материалов [16]. Пластиковые контейнеры, в отличие от одноразовых картонных и деревянных коробок, обладают потенциалом для многократного использования и переработки, что способствует сокращению отходов. Однако, для этого требуются сложные логистические системы, способные эффективно управлять жизненным циклом упаковки [23].

Оптимизация таких систем подразумевает не только использование материалов с высокой степенью повторного применения, но и моделирование логистических сетей с учетом сроков службы контейнеров. Включение параметров срока службы в проектирование замкнутых сетей позволяет продлить срок эксплуатации упаковки и минимизировать затраты. Исследования показывают, что разработка моделей, учитывающих возможные изменения в спросе и условиях эксплуатации, может повысить экономическую и экологическую эффективность цепочек поставок [16; 24].

Эффективное планирование местоположений центров распределения, сбора и переработки также является ключевым элементом в управлении потоками упаковки. Оптимизация этих параметров позволяет сократить транспортные расходы и выбросы углекислого газа, что особенно важно для реализации целей экологической устойчивости [16]. Эти решения помогают как государственным, так и частным организациям строить устойчивые модели работы с многоразовой упаковкой.

Пищевые отходы как продукт для создания биотоплива, удобрений

Анализ современных подходов к управлению отходами и их переработке показывает, что ключевые стратегии устойчивости включают интеграцию замкнутых цепочек поставок и инновационные методы переработки. Пищевая промышленность и связанные с ней логистические цепочки поставок продуктов питания, в которых активно используются пластиковые, картонные и деревянные ящики, представляют собой важные точки для внедрения улучшенных систем управления. Например, использование многоразовых пластиковых контейнеров требует сложных логистических схем для продления срока их службы и оптимизации жизненного цикла [23]. Исследования показывают, что эффективное проектирование сетей,

включающее анализ сроков службы упаковки и логистических потоков, способствует снижению транспортных затрат и выбросов, что особенно актуально для устойчивого развития [16].

Важным направлением является переработка пищевых отходов для производства биотоплива и удобрений, что помогает минимизировать воздействие на окружающую среду и обеспечивает экономическую выгоду. Использование подходов, основанных на обратной логистике и технологиях искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность цепочек поставок и максимизировать ценность переработанных продуктов, таких как этанол и компост [8]. Это направление подтверждает важность объединения технологий и устойчивых практик в единой системе переработки.

Кроме того, переработка твердых отходов как часть стратегии устойчивого развития включает применение передовых технологий для производства энергии и создания материалов с высокой добавленной стоимостью. Методы переработки отходов, включающие использование биоугля и биосорбентов, улучшают качество почвы и очищают сточные воды, что способствует сохранению природных ресурсов и защите окружающей среды [21]. Эти примеры демонстрируют необходимость системного подхода к управлению отходами и внедрения экономически жизнеспособных решений.

Оптимизация использования отходов требует оценки их экономической ценности и внедрения технологических инноваций. Современные методы переработки позволяют получать побочные продукты с меньшими затратами и обеспечивать более эффективное управление ресурсами [18]. Применение интегрированных подходов к переработке отходов помогает максимизировать экономическую выгоду и поддерживает устойчивость агропромышленных и муниципальных систем [10; 11; 25].

Организация замкнутого цикла на едином производстве. Система оборота отходов без сторонних организаций

Поддержание замкнутого цикла на уровне отдельного предприятия требует внедрения внутренней переработки отходов без привлечения сторонних организаций. Этот подход позволяет снизить издержки и повышает устойчивость производства, что подтверждается примерами использования отходов в цепочке поставок, таких как переработка креветочных остатков в кормовые добавки [26]. Это показывает, что внутренние циклы переработки могут существенно способствовать повышению экономической эффективности и снижению нагрузки на окружающую среду.

Одним из важнейших аспектов успешного внедрения устойчивых практик является повышение осведомленности участников цепочек поставок, что особенно актуально для предприятий общественного питания и розничной торговли. Исследования показывают, что недостаточная осведомленность приводит к снижению уровня переработки и слабой интеграции устойчивых методов управления отходами [14; 15]. Повышение уровня знаний и использование эффективных методов классификации и переработки пищевых отходов может улучшить результаты и способствовать выполнению принципов круговой экономики.

Вопросы устойчивости заставили многие отрасли замкнуть цикл в своих цепочках поставок, превратившись в более сложный процесс со множеством рисков из-за круговой или многокруговой структуры с несколькими обратными потоками товаров/деталей/материалов [27].

Применение отходов цитрусовых в пищевой промышленности

Эффективное использование отходов цитрусовых в пищевой промышленности становится важным элементом устойчивого управления ресурсами. Отходы цитрусовых, включая кожуру, мякоть, мембраны и семена, составляют значительную часть массы плодов и представляют собой ценный источник биоактивных компонентов [28]. Их переработка позволяет создавать продукты с высокой добавленной стоимостью и снижать воздействие на окружающую среду [29].

Отходы цитрусовых как пищевая добавка, источник биологически активных соединений

Отходы цитрусовых богаты эфирными маслами, аскорбиновой кислотой, каротиноидами, флавоноидами и пищевыми волокнами, что делает их перспективным источником для разработки функциональных продуктов питания и нутрицевтиков [17]. Пектин, извлекаемый из цитрусовых, обладает гелеобразующими и водоудерживающими свойствами, что позволяет использовать его в производстве джемов, желе и других продуктов. Исследования показывают, что добавление 0,72% пектина в мороженое позволяет снизить содержание жира на 45% без ухудшения сенсорных качеств продукта [29]. Пищевые компании также активно используют порошок из кожуры цитрусовых для обогащения продуктов, что улучшает их текстуру и питательную ценность [1]. Сенсорные исследования подтверждают, что экстракты кожуры цитрусовых, такие как кожура аманцу, могут использоваться в качестве натуральных ароматизаторов, принимаемых потребителями [30]. Отходы цитрусовых также служат источником натуральных пигментов, которые являются нетоксичными и экологически устойчивыми [6].

Антиоксидантные свойства отходов цитрусовых помогают в хранении продуктов

Одной из важных характеристик отходов цитрусовых является их способность продлевать срок хранения продуктов. Эфирные масла и экстракты, полученные из отходов цитрусовых, демонстрируют выраженные антиоксидантные и антимикробные свойства, что делает их подходящими для использования в активной упаковке пищевых продуктов [2]. Применение таких материалов способствует предотвращению микробиологической и окислительной порчи продуктов, что снижает уровень пищевых отходов и обеспечивает более длительное хранение [24]. Проведенные исследования также показывают, что эфирные масла цитрусовых могут быть использованы в качестве натуральных консервантов и инсектицидов, что подтверждает их универсальность и multifunctionality в пищевой и упаковочной промышленности [31].

Биопродукты из отходов цитрусовых

Отходы цитрусовых имеют значительный потенциал для использования в производстве биопродуктов, таких как ферменты, биотопливо и биополимеры. Комплексные подходы к биопереработке позволяют оптимизировать процессы извлечения ценных компонентов и создавать устойчивые решения, поддерживающие экономику замкнутого цикла [32]. Биопродукты, полученные из отходов цитрусовых, не только минимизируют отходы, но и предоставляют возможности для экономической выгоды и развития экологически чистых технологий [3].

Методы экстракции пектина

Пектин, сложный полисахарид, широко используется в пищевой промышленности благодаря своим желирующим, загущающим и стабилизирующим свойствам [10]. Методы его экстракции имеют важное значение, поскольку влияют на качество и выход конечного продукта. Традиционные методы, основанные на кислотном гидролизе, имеют свои ограничения, что приводит к необходимости поиска новых и более эффективных технологий [33]. В этой секции рассматриваются различные подходы к экстракции пектина, включая комбинирование, сравнение и выявление новых методов.

Комбинирование методов

Современные исследования показывают, что комбинирование различных методов экстракции может значительно повысить выход и качество пектина. Например, комбинация экстракции с использованием сверхкритического CO₂ и этанола при изменении параметров давления и температуры приводит к получению экстрактов с высокой антиоксидантной активностью

[4]. Также использование ультразвука и микроволн совместно показало высокую эффективность при экстракции пектина из промышленных отходов томатов, где оптимальные условия ультразвуковой экстракции дали наибольший выход пектина с высоким содержанием галактуроновой кислоты и сопутствующих компонентов [15]. Такие подходы демонстрируют, что комбинирование методов позволяет получить более высокие показатели по сравнению с использованием каждого метода по отдельности.

Сравнение методов

Сравнительный анализ показывает, что ультразвуковая, микроволновая и сверхкритическая CO_2 -экстракции являются наиболее эффективными современными методами, обеспечивающими высокий выход и качество пектина при низких энергозатратах [22]. Например, ультразвуковая экстракция дает преимущество в извлечении фенольных компонентов, а микроволновая экстракция позволяет получить высокий выход пектина за короткое время [11]. Исследования также подтверждают, что кислотная экстракция при различных значениях pH и температуре обеспечивает стабильный выход пектина, но уступает по скорости и энергоэффективности более новым методам [34].

Выявление новых методов экстракции

Инновационные методы экстракции, такие как омическое нагревание и ультразвуковая экстракция, становятся предметом активных исследований благодаря их способности сократить время и повысить эффективность процессов [28, 32]. Омическое нагревание показало значительный потенциал в улучшении энергоэффективности процесса при экстракции пектина из отходов цитрусовых. Ультразвуковая экстракция также доказала свою эффективность в интенсификации извлечения ценных соединений, таких как d-лимонен, сокращая время процесса и снижая энергозатраты [25]. Гибридные методы экстракции, комбинирующие различные технологии, предлагают перспективные решения для улучшения качества и выхода пектина [2].

Обсуждение результатов

Интерпретация результатов

Результаты данного обзора предметного поля акцентируют внимание на значимости валоризации пищевых отходов и внедрении принципов экономики замкнутого цикла в пищевой сектор. Несмотря на многочисленные исследования, направленные на переработку пищевых отходов и создание продуктов с добавленной стоимостью [18; 19]. При этом, поле для разработки новых методов и подходов остается открытым.

В обзоре были рассмотрены пять ключевых сценариев, демонстрирующих применение технологии zero waste в пищевой промышленности [4; 10; 14; 21]. Каждый из этих сценариев подкреплен примерами переработки различных отходов, включая хлебные остатки, бывшие пищевые продукты и побочные продукты производства, что подчеркивает разнообразие и комплексность подходов к реализации концепции устойчивого развития. Однако анализ выявил, что использование отходов цитрусовых пока не получило достаточного освещения, несмотря на значительный потенциал этих ресурсов. Обнаружено, что отходы цитрусовых могут быть эффективно использованы для извлечения биологически активных соединений, улучшения упаковочных материалов с помощью эфирных масел и производства биопродуктов. Этот аспект требует дальнейшего развития, поскольку может значительно усилить устойчивость пищевых цепочек и уменьшить нагрузку на природные ресурсы [8].

Особое внимание в представленном обзоре уделено методам экстракции пектина, который является важным компонентом, получаемым из отходов цитрусовых. Исследования показывают, что пектин обладает многочисленными функциями в пищевой промышленности, включая его использование в качестве загустителя и стабилизатора. Раздел, посвященный методам экстракции пектина, показал, что наиболее перспективными подходами являются комбинированные методы, которые объединяют преимущества традиционных и инновационных технологий. Например, ультразвуковая и микроволновая экстракции продемонстрировали высокий выход и улучшенные характеристики экстракта при минимальных энергозатратах [4; 15]. Тем не менее, внедрение этих методов требует детальной оценки их экономической и экологической целесообразности.

Анализ также подчеркнул важность поиска новых методов экстракции, способных минимизировать воздействие на окружающую среду. Современные исследования, такие как изучение омического нагрева и других щадящих методов, показывают, что такие технологии могут быть перспективными для улучшения энергетической эффективности и сохранения структуры биоактивных компонентов [11, 28, 35]. Однако информация о таких методах пока ограничена, что оставляет пространство для дальнейших исследований и экспериментов.

Ограничения обзора

Несмотря на активные исследования в области переработки отходов, существует множество вызовов и ограничений. Проблематика переработ-

ки отходов цитрусовых охватывает широкий спектр аспектов, каждый из которых требует глубокого изучения. Существующие исследования преимущественно сосредоточены на традиционных методах переработки и применении отдельных технологий, что оставляет необходимость в разработке интегрированных и междисциплинарных подходов. Например, комбинирование методов экстракции показывает хорошие результаты по выходу пектина и его качественным характеристикам, однако требует дальнейших оценок их экономической жизнеспособности и влияния на окружающую среду [3; 36]. Также было выявлено, что данные о щадящих методах экстракции, которые могли бы сохранить биоактивные свойства и минимизировать потребление энергии, остаются недостаточными. Это ограничение подчеркивает необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку новых технологий с низким воздействием на окружающую среду, которые могут быть интегрированы в существующие процессы переработки [25; 37].

Выводы

1. Растущая потребность в обеспечении продовольствием увеличивающегося мирового населения, а также возрастающая осведомленность и ожидания потребителей способствовали развитию систем и процессов в пищевой промышленности.

2. Данный обзор систематизировал существующие исследования, выделив ключевые направления и подтемы, что позволяет определить дальнейшие пути исследований, направленных на повышение эффективности использования полученных данных.

3. Несмотря на значительный прогресс, зафиксированный проанализированными исследованиями, выявлены пробелы в обобщении и систематизации данных о применении отходов цитрусовых, а также в создании инструментов для прогнозирования на основе этих данных. Особое внимание следует уделить исследованиям об эффективности комбинированных методов экстракции, таких как ультразвуковая экстракция с применением электрохимически активированных растворов. Также важно продолжать исследования, направленные на разработку практических приложений экстрактов, полученных из отходов, и изучение их влияния на свойства конечных продуктов.

4. Изучение возможностей по включению экстрактов вторичных продуктов переработки цитрусовых растений в различные блюда и продукты, а также оценка их сенсорных и питательных характеристик станет важным направлением для будущих исследований. Полученные в ходе обзора данные могут служить основой для проектирования экспериментов, посвя-

щенных изучению свойств и методов получения эфирных масел и других биологически активных соединений из отходов цитрусовых.

5. Особое значение имеет исследование щадящих методов экстракции, которые обеспечивают сохранение биоактивных компонентов при минимальных энергетических затратах. Это требует более глубокого изучения вторичной переработки отходов овощей и фруктов, а также повышения осведомленности производителей о принципах экономики замкнутого цикла и способах их внедрения в производственные процессы.

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

Список литературы / References

1. Accorsi, R., Baruffaldi, G., & Manzini, R. (2020). A closed-loop packaging network design model to foster infinitely reusable and recyclable containers in food industry. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.06.014>. EDN: <https://elibrary.ru/IOUVHP>
2. Ademosun, A. O. (2022). Citrus peels odyssey: From the waste bin to the lab bench to the dining table. *Applied Food Research*, 2(1), 100083. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100083>. EDN: <https://elibrary.ru/AIUUTS>
3. Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Shah, M. A., Ahmad, N., Vilarinho, F., Khwaldia, K., Ana, S., & Ramos, F. (2022). Citrus by-products: Valuable source of bioactive compounds for food applications. *Antioxidants*, 12(1), 38. <https://doi.org/10.3390/antiox12010038>. EDN: <https://elibrary.ru/FBFNXX>
4. Ben Hsouna, A., Sadaka, C., Generalić Mekinić, I., Garzoli, S., Švarc-Gajić, J., Rodrigues, F., & Mnif, W. (2023). The chemical variability, nutraceutical value, and food-industry and cosmetic applications of citrus plants: A critical review. *Antioxidants*, 12(2), 481. <https://doi.org/10.3390/antiox12020481>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQMKOW>
5. Casas Cardoso, L., Cejudo Bastante, C., Mantell Serrano, C., & Martínez de la Ossa, E. J. (2022). Application of citrus by-products in the production of active food packaging. *Antioxidants*, 11(4), 738. <https://doi.org/10.3390/antiox11040738>. EDN: <https://elibrary.ru/DDCCBY>
6. Castro, L. A. D., Lizi, J. M., Chagas, E. G. L. D., Carvalho, R. A. D., & Vanin, F. M. (2020). From orange juice by-product in the food industry to a functional ingredient: Application in the circular economy. *Foods*, 9(5), 593. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1003144>. EDN: <https://elibrary.ru/XEDFAB>
7. Di Salvo, E., Lo Vecchio, G., De Pasquale, R., De Maria, L., Tardugno, R., Vadalà, R., & Cicero, N. (2023). Natural pigments production and their application in

- food, health and other industries. *Nutrients*, 15(8), 1923. <https://doi.org/10.3390/nu15081923>. EDN: <https://elibrary.ru/ACIMXP>
8. Gholipour, A., Sadegheih, A., Mostafaeipour, A., & Fakhrzad, M. B. (2024). Designing an optimal multi-objective model for a sustainable closed-loop supply chain: A case study of pomegranate in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 26(2), 3993–4027. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02868-5>. EDN: <https://elibrary.ru/SUGXKD>
 9. Jagadiswaran, B., Alagarasan, V., Palanivelu, P., Theagarajan, R., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Valorization of food industry waste and by-products using 3D printing: A study on the development of value-added functional cookies. *Future Foods*, 4, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100036>. EDN: <https://elibrary.ru/BDZDKZ>
 10. Kim, I. J., Jeong, D., & Kim, S. R. (2022). Upstream processes of citrus fruit waste biorefinery for complete valorization. *Bioresource Technology*, 362, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127776>. EDN: <https://elibrary.ru/OTTOGK>
 11. Kute, A. B., Mohapatra, D., Kotwaliwale, N., Giri, S. K., & Sawant, B. P. (2020). Characterization of pectin extracted from orange peel powder using microwave-assisted and acid extraction methods. *Agricultural Research*, 9, 241–248. <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00419-5>. EDN: <https://elibrary.ru/MGKKDQ>
 12. Kumar, M., Tomar, M., Saurabh, V., Mahajan, T., Punia, S., del Mar Contreras, M., & Kennedy, J. F. (2020). Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.009>. EDN: <https://elibrary.ru/JGROHU>
 13. Lalander, C., & Vinnerås, B. (2022). Actions needed before insects can contribute to a real closed-loop circular economy in the EU. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(4), 337–342. <https://doi.org/10.3920/JIFF2022.x003>. EDN: <https://elibrary.ru/DBXWZG>
 14. Lang, L., Wang, Y., Chen, X., Zhang, Z., Yang, N., Xue, B., & Han, W. (2020). Awareness of food waste recycling in restaurants: Evidence from China. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104949. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104949>. EDN: <https://elibrary.ru/PMKBJL>
 15. Lasunon, P., & Sengkhamparn, N. (2022). Effect of ultrasound-assisted, microwave-assisted and ultrasound-microwave-assisted extraction on pectin extraction from industrial tomato waste. *Molecules*, 27(4), 1157. <https://doi.org/10.3390/molecules27041157>. EDN: <https://elibrary.ru/KEBLPK>
 16. Liao, Y., Kaviyani-Charati, M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Diabat, A. (2020). Designing a closed-loop supply chain network for citrus fruits crates considering environmental and economic issues. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 199–220. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.02.001>. EDN: <https://elibrary.ru/OOKYJT>

17. Maqbool, Z., Khalid, W., Atiq, H. T., Koraqi, H., Javaid, Z., Alhag, S. K., Laila A., Bader, D., Mohammed A., Mohamed Af., & Al-Farga, A. (2023). Citrus waste as source of bio-active compounds: Extraction and utilization in health and food industry. *Molecules*, 28(4), 1636. <https://doi.org/10.3390/molecules28041636>. EDN: <https://elibrary.ru/QGYTBR>
18. Mahato, N., Sharma, K., Sinha, M., Baral, E. R., Koteswararao, R., Dhyani, A., Cho, MH., & Cho, S. (2020). Bio-sorbents, industrially important chemicals and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable bioresource: A review. *Journal of Advanced Research*, 23, 61–82. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.01.007>. EDN: <https://elibrary.ru/UXVEDU>
19. Matsuo, Y., Akita, K., Taguchi, H., Fujii, S., Yoshie-Stark, Y., & Araki, T. (2022). Utilization and evaluation of *Citrus natsudaiddai* peel waste as a source of natural food additives. *Food Chemistry*, 373, 131464. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131464>. EDN: <https://elibrary.ru/KCELQX>
20. Mosallanezhad, B., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Triki, C. (2021). Shrimp closed-loop supply chain network design. *Soft Computing*, 25, 7399–7422. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05698-1>. EDN: <https://elibrary.ru/HNKDQX>
21. Narisetty, V., Cox, R., Willoughby, N., Aktas, E., Tiwari, B., Matharu, A. S., & Kumar, V. (2021). Recycling bread waste into chemical building blocks using a circular biorefining approach. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(19), 4842–4849. <https://doi.org/10.1039/D1SE00575H>. EDN: <https://elibrary.ru/LBEOWN>
22. Novais, C., Molina, A. K., Abreu, R. M., Santo-Buelga, C., Ferreira, I. C., Pereira, C., & Barros, L. (2022). Natural food colorants and preservatives: A review, a demand, and a challenge. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(9), 2789–2805. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07533>. EDN: <https://elibrary.ru/FZSJQW>
23. Peng, X., Jiang, Y., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 765–801. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5>. EDN: <https://elibrary.ru/SKGTGG>
24. Petrunina, I. V., & Gorbunova, N. A. (2024). Using the model of closed-loop economy in certain branches of the agro-industrial complex. *Food Systems*, 7(2), 231–237. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-2-231-237>. EDN: <https://elibrary.ru/VVKQTW>
25. Pinotti, L., Luciano, A., Ottoboni, M., Manoni, M., Ferrari, L., Marchis, D., & Tretola, M. (2021). Recycling food leftovers in feed as opportunity to increase the sustainability of livestock production. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126290>. EDN: <https://elibrary.ru/JFAJTU>
26. Roy, S., Priyadarshi, R., Łopusiewicz, Ł., Biswas, D., Chandel, V., & Rhim, J. W. (2023). Recent progress in pectin extraction, characterization, and pectin-based films for active food packaging applications: A review. *International Journal of Biologi-*

- cal Macromolecules*, 239, 124248. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124248>. EDN: <https://elibrary.ru/XDVICZ>
27. Russo, C., Maugeri, A., Lombardo, G. E., Musumeci, L., Barreca, D., Rapisarda, A., Cirmi, S., & Navarra, M. (2021). The second life of Citrus fruit waste: A valuable source of bioactive compounds. *Molecules*, 26(19), 5991. <https://doi.org/10.3390/molecules26195991>. EDN: <https://elibrary.ru/EJNEUH>
 28. Shorbagi, M., Fayek, N. M., Shao, P., & Farag, M. A. (2022). *Citrus reticulata* Blanco (the common mandarin) fruit: An updated review of its bioactive, extraction types, food quality, therapeutic merits, and bio-waste valorization practices to maximize its economic value. *Food Bioscience*, 47, 101699. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101699>. EDN: <https://elibrary.ru/PTRZSF>
 29. Sabanci, S., Çevik, M., & Göksu, A. (2021). Investigation of time effect on pectin production from citrus wastes with ohmic heating assisted extraction process. *Journal of Food Process Engineering*, 44(6), e13689. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13689>. EDN: <https://elibrary.ru/GMZDOY>
 30. Sharma, P., Vishvakarma, R., Gautam, K., Vimal, A., Gaur, V. K., Farooqui, A., Varjani, S., & Younis, K. (2022). Valorization of citrus peel waste for the sustainable production of value-added products. *Bioresource Technology*, 351, 127064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127064>. EDN: <https://elibrary.ru/XSRSGF>
 31. Simonetto, M., Sgarbossa, F., Battini, D., & Govindan, K. (2022). Closed loop supply chains 4.0: From risks to benefits through advanced technologies. A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 253, 108582. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108582>. EDN: <https://elibrary.ru/UIFNWD>
 32. Twinomuhwezi, H., Godswill, A. C., & Kahunde, D. (2023). Extraction and characterization of pectin from orange (*Citrus sinensis*), lemon (*Citrus limon*) and tangerine (*Citrus tangerina*). *American Journal of Physical Sciences*, 1(1), 17–30. <https://doi.org/10.47604/ajps.1049>. EDN: <https://elibrary.ru/ISENAQ>
 33. Visakh, N. U., Pathrose, B., Chellappan, M., Ranjith, M. T., Sindhu, P. V., & Mathew, D. (2022). Chemical characterisation, insecticidal and antioxidant activities of essential oils from four *Citrus* spp. fruit peel waste. *Food Bioscience*, 50, 102163. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102163>. EDN: <https://elibrary.ru/YFDANI>
 34. Yadav, V., Sarker, A., Yadav, A., Miftah, A. O., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2022). Integrated biorefinery approach to valorize citrus waste: A sustainable solution for resource recovery and environmental management. *Chemosphere*, 293, 133459. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133459>. EDN: <https://elibrary.ru/JNGZTJ>
 35. Zhang, C., Zhu, X., Zhang, F., Yang, X., Ni, L., Zhang, W., & Zhang, Y. (2020). Improving viscosity and gelling properties of leaf pectin by comparing five pectin extraction methods using green tea leaf as a model material. *Food Hydrocolloids*, 98, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105246>. EDN: <https://elibrary.ru/HHYZHN>

36. Zoghi, A., Vedadi, S., Esfahani, Z. H., Gavligi, H. A., & Khosravi-Darani, K. (2021). A review on pectin extraction methods using lignocellulosic wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02062-z>. EDN: <https://elibrary.ru/QEXGBX>
37. Yun, D., & Liu, J. (2022). Recent advances on the development of food packaging films based on citrus processing wastes: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 9, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133459>. EDN: <https://elibrary.ru/FZTPCV>

ВКЛАД АВТОРОВ

Суворов О.А.: внес существенный вклад в разработку концепции и дизайна работы, принимал участие в сборе, анализе и интерпретации полученных данных.

Кандроков Р.Х.: принимал участие в написании статьи и ее редактировании с целью повышения ее научной значимости.

Песоцкая Д.А.: принимала участие в написании статьи и ее редактировании с целью повышения ее научной значимости.

Николаева Ю.В.: принимала участие в написании статьи и ее редактировании с целью повышения ее научной значимости.

Шанк М.А.: принимал участие в написании статьи и внесение итоговых правок в рукопись, и формирование итоговой редакции.

Все авторы окончательно одобрили версию работы, которая будет опубликована, при этом авторы несут ответственность и гарантируют, что все вопросы, связанные с точностью или единством всех частей работы, проработаны и разрешены.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Oleg A. Suvorov: made a significant contribution to the development of the concept and design of the study; participated in the collection, analysis, and interpretation of the data.

Roman H. Kandrov: participated in the writing and editing of the article to enhance its scientific significance.

Daria A. Pesotskaya: participated in the writing and editing of the article to enhance its scientific significance.

Yulia V. Nikolaeva: participated in the writing and editing of the article to enhance its scientific significance.

Mikhail A. Shank: contributed to the writing of the article, made final revisions to the manuscript, and prepared the final draft.

All authors have given their final approval of the version of the work to be published, and the authors are responsible for and guarantee that all issues related to the accuracy or consistency of all parts of the work have been addressed and resolved.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Суворов Олег А., профессор кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса

Университет РОСБИОТЕХ

Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация

SuvorovOA@ya.ru

Кандрок Роман Х., доцент кафедры технологии хранения и переработки плодовоовощной и растениеводческой продукции

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация

nart132007@mail.ru

Песоцкая Дарья А., магистр кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса

Университет РОСБИОТЕХ

Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация

darya.khlopkova@mail.ru

Николаева Юлия В., доцент кафедры биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза

Университет РОСБИОТЕХ

Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация

NikolaevaYV@mgupp.ru

Шанк Михаил А., аспирант кафедры “Биофизика” биологического факультета

МГУ имени М.В.Ломоносова; Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне

Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Российская Федерация; ул. Гоцзидасюеюань, 1, Даюньсиньчэн, район Лунган, г. Шэньчжэнь, Провинция Гуандун, Китайская Народная Республика

микхайлшанк@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Suvorov, Professor, Department of Food Industry, Hotel Business and Service

Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)

11, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation

SuvorovOA@ya.ru

SPIN-code: 8979-2000

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2100-0918>

Researcher ID: W-1014-2017

Author Scopus ID: 23482727600

Roman H. Kandrov, Associate Professor, Department of Technology of Storage and Processing of Fruit and Vegetable and Plant Products
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
nart132007@mail.ru
SPIN-code: 7081-1209
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>
Researcher ID: ID AAX-2106-2020
Scopus Author ID: 57200383950

Daria A. Pesotskaya, Master of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service
Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)
11, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation
darya.khlopkova@mail.ru

Yulia V. Nikolaeva, Associate Professor, Department of Biotechnology and Technology of Bioorganic Synthesis Products
Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)
11, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation
NikolaevaYV@mgupp.ru
SPIN-code: 2264-2190
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2961-8942>
Researcher ID: ID E-5926-2018
Author Scopus ID: 57220003151

Mikhail A. Shank, Ph.D. candidate in the Department of Biophysics, Faculty of Biology
Lomonosov Moscow State University; MSU-PPI University in Shenzhen
1, Leninsky Hills, Moscow, 119991, Russian Federation; 1, International University Park Road, Dayun New Town, Longgang District, Shenzhen, Guangdong Province, P.R. China
mikhailshank@gmail.com
SPIN-code: 1121-8888
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2823-5680>

Поступила 09.08.2025

После рецензирования 21.10.2025

Принята 12.11.2025

Received 09.08.2025

Revised 21.10.2025

Accepted 12.11.2025

Научные обзоры и сообщения / Scientific Reviews and Reports

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1750](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1750)EDN: [SFXKZK](https://www.edn.ru/SFXKZK)

УДК 616-06



Патогенетические аспекты коморбидности синдрома обструктивного апноэ сна (научный обзор)

Е.А. Ермакова, Д.С. Куспаналиева, С.В. Булатецкий, Д.С. Ванина

*ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России, Рязань,
Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Синдром обструктивного апноэ сна (СОАС) – расстройство дыхания, возникающее во сне, причиной которого является временная непроходимость верхних дыхательных путей. СОАС страдают все возрастные категории населения. Признаками СОАС являются повторяющиеся эпизоды остановки дыхания, снижение дыхательного притока при сохранности дыхательных усилий.

Цель – изучить имеющиеся источники на русском и английском языках, описывающие СОАС и сопутствующую патологию, рассмотреть механизмы возникновения коморбидности СОАС.

Материалы и методы. Проведен обзор отечественных и зарубежных научных публикаций за последние 10 лет. Поиск осуществлен с помощью баз данных биомедицинских исследований Pubmed и РИНЦ.

Результаты. СОАС – это расстройство дыхания, возникающее во сне, причиной которого является временная непроходимость верхних дыхательных путей. Главным звеном патогенеза данного синдрома являются повторяющиеся периоды гипоксии, оказывающие повреждающее действие на многие системы организма. Патогенез СОАС сложен, отличается возникновением множества порочных кругов и высокой степенью коморбидности. В данной статье описано сочетанное течение СОАС и метаболического синдрома, сахарного диабета, когнитивных нарушений, патологии сердца и тонуса сосудов, патологии ЛОР-органов, гормональных нарушений, нарушения микробиома (микрофлоры) кишечника.

СОАС часто сочетается с другой патологией, и тесно с ней связан. Понимание этих взаимосвязей имеет важное значение для эффективной диагностики и лечения пациентов с СОАС и состояний, с ним ассоциированных. При наличии

СОАС и сопутствующей патологии часто формируются порочные круги, которые отягощают друг друга.

Ключевые слова: СОАС; коморбидность; метаболический синдром; диабет; когнитивные нарушения; патология сердечно-сосудистой системы; ЛОР-органы; гормональные нарушения; нарушение микробиома кишечника

Для цитирования. Ермакова, Е. А., Куспаналиева, Д. С., Булатецкий, С. В., & Ванина, Д. С. (2026). Патогенетические аспекты коморбидности синдрома обструктивного апноэ сна (научный обзор). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 479–496. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1750>

Pathogenetic aspects of comorbidity of obstructive sleep apnea syndrome (scientific review)

E.A. Ermakova, D.S. Kuspanalieva, S.V. Bulatetskiy, D.S. Vanina

Ryazan State Medical University, Ryazan, Russian Federation

Abstract

Background. Obstructive sleep apnea (OSA) is a respiratory disorder that occurs during sleep and it's caused by obstruction of the upper respiratory ways. OSA affects all age groups of the population. Signs of OSA include the episodes of respiratory arrest, decreased respiratory flow while maintaining respiratory efforts.

Purpose – to study the available literary sources in Russian and English describing OSA and concomitant pathology and to review the mechanisms of OSA comorbidity.

Materials and methods. A review of domestic and foreign scientific publications over the past 10 years has been conducted. The search was carried out using Pubmed and RSCI biomedical research databases.

Results. OSA occurs during sleep and caused by temporary obstruction of the upper respiratory tract. Recurrent periods of hypoxia, having a damaging effect on many body systems play a very important role. The pathogenesis of OSA is complicated and characterized by many vicious circles and a high degree of comorbidity. This article describes the combined course of OSA and metabolic syndrome, diabetes mellitus, cognitive disorders, pathology of the heart and vascular tone, pathology of ENT organs, hormonal disorders, disorders of the intestinal microbiome.

OSA has a very complicated relationship with intercurrent pathology. Understanding these relationships is essential for effective diagnosis and treatment of patients with OSA and conditions associated with it. In the presence of OSA and concomitant pathology, vicious circles often form that aggravate each other.

Keywords: OSA; comorbidity; metabolic syndrome; diabetes; cognitive impairment; pathology of the cardiovascular system; ENT organs; hormonal disorders; intestinal microbiome disorders

For citation. Ermakova, E. A., Kuspanalieva, D. S., Bulatetskiy, S. V., & Vanina, D. S. (2026). Pathogenetic aspects of comorbidity of obstructive sleep apnea syndrome (scientific review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 479–496. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1750>

Введение

Синдром обструктивного апноэ сна (СОАС) – это расстройство дыхания, возникающее во сне, причиной которого является временная непроходимость верхних дыхательных путей. Признаками СОАС являются повторяющихся эпизоды остановки дыхания, снижение дыхательного притока при сохранности дыхательных усилий.

Распространённость нарушений дыханий во время сна, ассоциированная с синдромом обструктивного апноэ сна (СОАС) велика [4]. Статистические данные неумолимо говорят о том, что тенденция к увеличению числа людей с данной патологией растет. СОАС встречается в популяции с частотой 4% среди мужчин и 2% среди женщин. Максимальная заболеваемость отмечается среди мужчин в возрасте 50-60 лет. В этой категории распространённость СОАС около 25%. Также известно, что до 60% пациентов стационаров терапевтического профиля страдают данным синдромом [11]. Следует отметить, что проблема СОАС затрагивает не только стариков, но и детей. Особую группу составляют дети, родившиеся недоношенными, из-за структурно-функциональной незрелости органов и систем [9].

Как правило многие не догадываются о наличии у них СОАС и, если пациенты не получают необходимой помощи в должном объёме, у них существенно страдает качество жизни, что делает вопрос диагностики этого синдрома очень актуальным.

Для скрининга пациентов используются сомнологические опросники: «берлинский опросник сна», шкала «EPWORTH», опросник «STOP-BANG», которые показывают хорошую специфичность и чувствительность.

Тем не менее, диагноз должен подтверждаться с помощью инструментального обследования, которое может включать: кардиореспираторный мониторинг, респираторную полиграфию, пульсоксиметрию, регистрацию воздушного назального потока, электрокардиографию, кардиореспираторный мониторинг.

Наиболее точным методом диагностики является стационарная полисомнография. Исследование проводится в стационаре под наблюдением медицинского персонала [2].

Цель обзора – изучить имеющиеся источники на русском и английском языках, описывающие СОАС и сопутствующую патологию, рассмотреть механизмы возникновения коморбидности СОАС, определить, как СОАС, и сопутствующая патология связаны между собой.

Материалы и методы

Проведен обзор отечественных и зарубежных научных публикаций по теме коморбидности СОАС. Поиск осуществлен с помощью баз данных биомедицинских исследований Pubmed и РИНЦ.

Результаты исследования

Проведенный нами анализ позволил выявить состояния, которые наиболее часто сопутствуют СОАС. К ним относятся патология сердечно-сосудистой системы, метаболический синдром и сахарный диабет, патология дыхательной системы, когнитивные нарушения, патология ЛОР-органов и патология желудочно-кишечного тракта.

СОАС и патология сердечно-сосудистой системы

Часто СОАС является предвестником ишемической болезни сердца и аритмий. При СОАС развивается гипоксемия, активируются хеморецепторы, возбуждается симпатoadреналовая система. Часто у пациентов увеличен уровень катехоламинов в крови и моче [31]. Таким образом, возникает централизация кровообращения, сопровождаемая вазоконстрикцией периферических сосудов и подъемом артериального давления (АД), а также тахикардией [1]. При возобновлении дыхания (нормпноэ) происходит увеличение нагрузки на сердце. Считается, что это связано с увеличением венозного возврата и сердечного выброса при спазме периферических сосудов. В результате в течение многих лет формируется неадекватно повышенный уровень АД и формируются риски развития сердечно-сосудистых заболеваний [22; 30]. В исследованиях Sophie J. Crinion, Jana Kleinerova, Brian Kent была выявлена связь степени тяжести СОАС с более высоким ночным АД [17].

Постоянное воздействие гипоксии, действие повышенного артериального давления формирует растяжение желудочков, обусловленное повреждением миокарда. В связи с этим у пациентов с СОАС повышен уровень сердечных тропонинов и натрийуретического гормона [28].

Также доказана связь между фибрилляцией предсердий. Наличие зависимости между СОАС и желудочковыми нарушениями ритма не столь очевидны. Считается, что основные патофизиологические механизмы, потенциально ответственные за их возникновение, включают гипоксемию, приводящую к активации блуждающего нерва и симпатической нервной системы, сужение сосудов, тахикардия, повышение артериального давления [19; 33], снижение вариабельности сердечного ритма, увеличение нагрузки на стенку левого желудочка, увеличение постнагрузки, острая диастолическая дисфункция, увеличение левого предсердия, гиперкоагуляция, окислительный стресс и дисфункция эндотелия, колебания внутригрудного давления, ведущие к возрастанию венозного возврата к сердцу, и симпатическую активацию на фоне следующего за апноэ микропробуждения [10]. Активация симпатического отдела вегетативной нервной системы и нарушения реполяризации желудочков являются аритмогенными факторами [14].

Так СОАС является фактором риска развития фибрилляции предсердий (ФП). Предполагают, что это связано со структурным ремоделированием миокарда. У пациентов с СОАС также встречаются следующие нарушения сердечного ритма: брадикардия с хронотропной недостаточностью, синоатриальная блокада разной степени, синдром тахикардии-брадикардии [25].

СОАС часто сопровождается повреждением эндотелия. Альтерация, как компонент воспаления характеризуется выбросом медиаторов. Это подтверждается повышенным уровнем маркеров воспаления у пациентов. Также определяется повышение С-реактивного белка, интерлейкинов IL-6, IL-8, фактора некроза опухоли α и транскрипционного фактора NF- κ B (ядерный фактор «каппа-би»). Гипоксемия и реоксигенация, вызванные СОАС, могут приводить к окислительному стрессу и системному воспалению, которые стимулируют атеросклероз сосудов, и последующему инфаркту миокарда (ИМ) и сердечной недостаточности [24]. По данным Yeghiazarians Y. и соавт., у пациентов с СОАС инфаркт миокарда чаще возникает ночью [15; 32].

При СОАС также имеют место отрицательные колебания внутригрудного давления, которые приводят к увеличению трансмурального давления в левом и правом желудочках. Увеличение постнагрузки может вызвать растяжение предсердия, аритмию и застойные явления в малом круге кровообращения. Во-вторых, апноэ и гипопноэ вызывают рецидивирующее возбуждение центральной нервной системы [20], которое нарушает сон, что приводит к повышению симпатической и снижению парасимпатической ак-

тивности, увеличению артериального давления и частоты сердечных сокращений. Наконец, апноэ и гипопноэ приводят к десатурации и гиперкапнии, после чего следует период восстановления, когда происходит реоксигенация и гипокания по мере увеличения вентиляции. Эти колебания уровня кислорода и углекислого газа в артериальной крови также способствуют симпатической активации. Периодические циклы гипоксии и восстановления оксигенации приводят к дисфункции эндотелиальных клеток, что вызывает ремоделирование лёгочных артерий, миокарда и системную артериальную гипертензию. У этих пациентов выявлено преобладание признаков артериальной гипертензии (изменения левого желудочка) [4].

Длительное пребывание в условиях кислородного голодания стимулирует эритропоэз. Это выражается в увеличении числа предшественников эритроцитов (ретикулоцитов) и повышении уровня эритропоэтина [28]. Это может приводить к увеличению вязкости крови, что, в свою очередь, также увеличивает нагрузку на миокард и вызывает его функциональную перегрузку.

Таким образом, взаимосвязь патологии сердечно-сосудистой системы характеризуется наличием порочного круга, усугубляющего общее состояние и ухудшающего качество жизни пациентов.

Метаболический синдром, сахарный диабет и СОАС

Метаболический синдром (МС) представляет собой комплекс нарушений, включающий инсулинорезистентность, ожирение, дислипидемию и гипертензию. Исследования показывают, что СОАС является значимым фактором риска развития метаболического синдрома. СОАС и метаболический синдром имеют общие патофизиологические механизмы, включая хроническое воспаление и оксидативный стресс. Снижение качества сна также ассоциируется с повышением уровня кортизола, что может способствовать накоплению жира, особенно в области живота. Как показывают исследования, пациенты с лишним весом, получающие СРАР-терапию, имели лучшие результаты по снижению веса, чем пациенты без СРАР-терапии [3].

Не так давно была выявлена взаимосвязь сна с регуляцией гомеостаза глюкозы и контролем аппетита: нарушение сна способствует росту распространенности ожирения и СД 2 типа. Было высказано предположение об ассоциации СОАС с резистентностью к лептину. Также было показано, что уровень грелина и его биологически активная ацетилированная форма повышены при СОАС и снижаются при СРАР-терапии. Это может служить причиной усиления желания пациента увеличить калорийность рациона.

Причиной формирования ожирения является и недостаточная выработка соматотропного гормона, участвующего в метаболизме жировой ткани: сокращение дельта-фазы сна при синдроме обструктивного апноэ/гипопноэ сна (периода, в котором наиболее активно вырабатывается соматотропный гормон) приводит к развитию депрессии выработки соматотропина, что в свою очередь мешает утилизации жира для обеспечения энергетических потребностей, при этом процесс пополнения жировых запасов сохраняется [5].

Таким образом, неправильный сон, вызванный СОАС, приводит к нарушению регуляции глюкозы и жирового обмена, что может усугубить инсулинорезистентность. Пациенты с СОАС часто страдают от избыточного веса и ожирения, что является ключевым компонентом метаболического синдрома. Не стоит забывать, что ожирение также может стать причиной СОАС, формированию нарушения сна и развитию порочных кругов коморбидности СОАС [13].

СОАС и патология дыхательной системы

По данным проведенного нами анализа литературных источников СОАС часто сопровождается заболеваниями дыхательной системы.

Одним из таких заболеваний является бронхиальная астма (БА). Синдром обструктивного апноэ сна усугубляет течение бронхиальной астмы. Достичь контроля над астмой, уменьшить количество обострений, снизить кратность приема короткодействующих β_2 -агонистов невозможно без своевременной и полной диагностики СОАС [12].

Предположительно, СОАС играет роль в усилении гиперреактивности бронхов [27]. Это объясняется увеличением тонуса блуждающего нерва ночью, что стимулирует мускариновые рецепторы, расположенные в дыхательных путях, и вызывает бронхообструкцию. Также считается, что в гортани имеется мощная рефлексогенная зона, которая обуславливает спазм бронхов. При этом не исключается раздражение рецепторов синокаротидной зоны гипоксией [26].

У этих пациентов с сочетанным течением СОАС и БА отмечен худший ответ на ингаляционные глюкокортикостероиды [21]. В ходе исследования у больных с СОАС было обнаружено увеличение сопротивления дыхательных путей на фоне отсутствия изменений легочных объемов, что вероятно связано с отеком и воспалением в результате повреждения эпителия дыхательных путей. При этом увеличение специфического сопротивления вдоха говорит о вовлеченности центральных отделов дыхательных путей, которые в первую очередь страдают от вибрации при храпе и перепадов давления в результате эпизодов обструкции верхних дыхательных путей.

Диффузионная способность лёгких также была выше у пациентов с БА и СОАС. Таким образом, СОАС и патология дыхания связаны и взаимоотгощают друг друга.

СОАС и когнитивные нарушения

СОАС часто сочетается с различными нейрокогнитивными нарушениями (НКН). Патогенетические механизмы этих нарушений изучены недостаточно. Результаты исследований свидетельствуют о том, что нарушения дыхания во сне вносят самостоятельный вклад в развитие когнитивных дисфункций (нарушений внимания и памяти). Ученые связывают это с неблагоприятными последствиями гипоксии на головной мозг. Ими выявлена взаимосвязь между ИАГ и степенью снижения сатурации крови кислородом. При этом ведущую роль отводят поражению гиппокампа. Тем не менее, ученые пока не пришли к однозначным выводам. Также считается, что НКН могут быть связаны с ночными микропробуждениями и фрагментацией сна. Что может также рассматриваться как защитный механизм, который предотвращает эпизоды остановки дыхания во сне. Помимо этого, в развитии НКН рассматривается роль повторяющихся эпизодов гиперкапнии, которые влияют на префронтальные исполнительные функции, такие как оперативная память, поведенческий контроль, анализ, а также на обучение и школьную успеваемость [6]. Пациенты с СОАС могут испытывать трудности с концентрацией, запоминанием информации и выполнением повседневных задач. Это может негативно сказаться на их качестве жизни и социальной активности.

СОАС и патология желудочно-кишечного тракта

Исследователи отмечают взаимосвязь между СОАС и патологией желудочно-кишечного тракта. Тем не менее, данный вопрос изучен недостаточно, а результаты исследований неоднозначны.

Рассмотрим такую патологию как гастроэзофагеальную рефлюксную болезнь (ГЭРБ). По данным статистики, около 70% пациентов с СОАС имеют более выраженную ГЭРБ. В основе этого, как предполагают исследователи, лежат следующие патогенетические механизмы: увеличение отрицательного внутригрудного давления, повышение внутрибрюшного давления, воздействие хронической ночной гипоксемии. Рефлюктат вызывает развитие рефлексов, которые приводят к увеличению продолжительности эпизодов апноэ и ухудшают состояние пациентов. Взаимосвязь степени СОАС с тяжестью ГЭРБ находится в процессе изучения [23].

Также при СОАС поражается кишечник. Этому способствует ишемическое реперфузионное повреждение слизистой оболочки кишечника и

гипоксия, которые приводят к изменениям в структуре и количестве кишечных бактерий, а также к нарушению целостности кишечного барьера. Микробиота кишечника характеризуется снижением количества бактерий, вырабатывающих короткоцепочечные жирные кислоты, и увеличением количества вредных бактерий. Снижение секреции слизи и синтеза муцина бокаловидными клетками кожи нарушает целостность кишечного барьера. Повышается проницаемость кишечника, что вызывает внутренний и адаптивный иммунный ответ, который провоцирует вялотекущее воспаление в организме [23].

СОАС и ЛОР-органы

В процессе засыпания происходит ослабление мышечного тонуса. Возможно возникновение ронхопатии, связанной с расслаблением мышц мягкого нёба, гипертрофией язычка и миндалин, уменьшением просвета ротоглотки. Исследования Хуэй Цзинь, Ли-Энг Ли и других учёных, а также Мельникова А. Ю. и Мессерле А. А. показали, что на основе анализа акустических характеристик храпа можно диагностировать СОАС, проводить его скрининг и прогнозировать тяжесть заболевания [7].

Благодаря Rocha B. R. и Behlau M. с соавторами [29], J. Cho с соавторами [16] было выявлено, что СОАС может сопровождаться дисфонией. На данный момент отечественными учеными разработан алгоритм методик, позволяющий более детально изучить патологию сна с нарушением голоса [8].

Заключение

Синдром обструктивного апноэ сна («болезнь остановки дыхания во сне») – это расстройство дыхательной функции, при котором во время сна многократно происходят периодические остановки дыхания из-за сужения просвета верхних дыхательных путей на уровне глотки. Проведенный анализ имеющихся литературных источников показал, что в проблеме коморбидности при синдроме обструктивного апноэ сна заключается в частом сочетании СОАС с другими хроническими патологиями – заболеваниями сердечно-сосудистой и дыхательной систем, ЛОР-органов, желудочно-кишечного тракта, метаболическим синдромом и сахарным диабетом, способствует развитию когнитивных нарушений.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных научных публикаций позволил сделать следующие выводы:

1. Повторяющаяся во время сна обструкция верхних дыхательных путей вызывает развитие состояния, при котором давление в плевральной полости (внутригрудное давление) во время вдоха значительно ниже атмосферного

давления, что проявляется хронической перемежающей гипоксией и фрагментацией сна, нарушением выработки гормонов и обменных процессов, и в конечном итоге вызывает патологические изменения в различных органах и системах и повышает риск развития сочетанных заболеваний.

2. Синдром обструктивного апноэ сна и сопутствующая патология различных органов и систем имеют сложные патогенетические взаимосвязи, приводящие к возникновению патологических процессов принимающих характер «порочного круга», которые следует учитывать для повышения эффективности диагностики и проводимой терапии.

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

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Велибеков, Р. Т., Казаченко, А. А. (2020). Изменение показателей variability сердечного ритма у пациентов с синдромом обструктивного апноэ во сне. *Известия Российской военно-медицинской академии*, (39), 29–32. EDN: <https://elibrary.ru/QMBJMZ>
2. Диагностика и лечение синдрома обструктивного апноэ сна у взрослых: Рекомендации Российского общества сомнологов (РОС). Утверждено конференцией Российского общества сомнологов, 16.02.2018.
3. Жогло, А. О., Молчанов, А. С., Черняховская, А. А. (2020). Влияние длительного использования СРАР-терапии на динамику веса у пациентов с тяжёлой формой СОАС. *Известия Российской военно-медицинской академии*, (39), 49–51. EDN: <https://elibrary.ru/TQSSJD>
4. Клинические рекомендации Евразийской Ассоциации Кардиологов (ЕАК), Российского Общества Сомнологов (РОС) по диагностике и лечению обструктивного апноэ сна у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями (2024).
5. Кожевникова, О. В., Намазова-Баранова, Л. С., Мыгдникова, Ю. С., Абашидзе, Э. А., Маргиева, Т. В., Пальцева, А. Е. (2016). Ожирение и нарушения сна у детей. *Педиатрическая фармакология*, 13(6), 571–576. <https://doi.org/10.15690/pf.v13i6.1671>. EDN: <https://elibrary.ru/XUYNIL>
6. Лисовская, Н. А., Коростовцева, Л. С., Образцова, Г. И., Свиричев, Ю. В., Дубинина, Е. А. (2015). Взаимосвязь синдрома обструктивного апноэ во время сна с когнитивными нарушениями у детей. *Артериальная гипертензия*, 21(1), 101–110. EDN: <https://elibrary.ru/TZKINJ>

7. Мельников, А. Ю., Мессерле, А. А. (2019). Корреляция параметров акустического анализа храпа и степени тяжести синдрома обструктивного апноэ сна. *Эффективная фармакотерапия*, 6.15(44), 62–66. <https://doi.org/10.33978/2307-3586-2019-15-44-62-66>. EDN: <https://elibrary.ru/ROMUAO>
8. Осипенко, Е. В., Орлова, О. С., Котельникова, Н. М., Исаева, М. Л., Михалевская, И. А., Кривых, Ю. С., Калинин, А. Л. (2021). Сон и его влияние на голос. *Специальное образование*, 1(61), 151–166. https://doi.org/10.26170/1999-6993_2021_01_12. EDN: <https://elibrary.ru/UDDOUI>
9. Пальман, А. Д., Аксельрод, А. С. (2021). Желудочковые нарушения ритма сердца у пациента с синдромом обструктивного апноэ сна и их эффективное немедикаментозное лечение. *Альманах клинической медицины*, 49(2), 165–170. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2021-49-031>. EDN: <https://elibrary.ru/LCXABF>
10. Соломахина, А. Ю., Лисовская, Н. А., Бочкарев, М. В., Коростовцева, Л. С., Петрова, Н. А., Образцова, Г. И., Свиричев, Ю. В. (2020). Нарушения дыхания во сне у людей разных возрастных групп. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*, 106(1), 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0869813920010100>. EDN: <https://elibrary.ru/JRDHNI>
11. Чабанов, П. А. (2023). Порочный круг СОАС. *Устойчивое развитие науки и образования*, 1(76), 97–101. EDN: <https://elibrary.ru/ZHUPOI>
12. Шелудько, Е. Г., Колосов, В. П., Наумов, Д. Е., Приходько, А. Г. (2019). Клинико-функциональные особенности сочетанного течения синдрома обструктивного апноэ сна и бронхиальной астмы. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*, (19), 23–30. https://doi.org/10.12737/article_5c88b5e86b9c18.75963991. EDN: <https://elibrary.ru/STLJLL>
13. Amiri, S. (2023). Body mass index and sleep disturbances: A systematic review and meta-analysis. *Postep Psychiatr Neurol*, 32(2), 96–109. <https://doi.org/10.5114/ppn.2023.129067>. EDN: <https://elibrary.ru/FFWGNQ>
14. Arnaud, C., Bochaton, T., Pépin, J. L., Belaidi, E. (2020). Obstructive sleep apnoea and cardiovascular consequences: Pathophysiological mechanisms. *Arch Cardiovasc Dis*, 113(5), 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2020.01.003>. EDN: <https://elibrary.ru/PNZFRQ>
15. Baillieux, S., Dekkers, M., Brill, A. K., Schmidt, M. H., Detante, O., Pépin, J. L., Tamisier, R., Basseti, C. L. A. (2022). Sleep apnoea and ischaemic stroke: Current knowledge and future directions. *Lancet Neurol*, 21(1), 78–88. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(21\)00321-5](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(21)00321-5). EDN: <https://elibrary.ru/HTODMU>
16. Cho, J. H., Guilminault, C., Joo, Y. H., Jin, S. K., Han, K. D., Park, C. S. (2017). A possible association between dysphonia and sleep duration: A cross-sectional study

- based on the Korean National Health and nutrition examination surveys from 2010 to 2012. *PLoS ONE*, 12(8), 182–286. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182286>
17. Crinion, S. J., Kleinerova, J., Kent, B., Nolan, G., Taylor, C. T., Ryan, S., McNicholas, W. T. (2021). Non-dipping nocturnal blood pressure correlates with obstructive sleep apnoea severity in normotensive subjects and may reverse with therapy. *ERJ Open Res*, 7(3), 00338–2021. <https://doi.org/10.1183/23120541.00338-2021>. EDN: <https://elibrary.ru/XPJCQC>
 18. Guo, W., Sun, L., Yue, H., Guo, X., Chen, L., Zhang, J., Chen, Z., Wang, Y., Wang, J., Lei, W. (2024). Associations of intermittent hypoxia burden with gut microbiota dysbiosis in adult patients with obstructive sleep apnea. *Nat Sci Sleep*, (16), 1483–1495. <https://doi.org/10.2147/NSS.S484377>. EDN: <https://elibrary.ru/QOQNRW>
 19. Javaheri, S., Javaheri, S., Somers, V. K., Gozal, D., Mokhlesi, B., Mehra, R., McNicholas, W. T., Zee, P. C., Campos-Rodriguez, F., Martinez-Garcia, M. A., Cistulli, P., Malhotra, A. (2024). Interactions of obstructive sleep apnea with the pathophysiology of cardiovascular disease, Part 1: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol*, 84(13), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2024.02.059>. EDN: <https://elibrary.ru/PMXEQN>
 20. Jin, H., Lee, L. A., Song, L., Li, Y., Peng, J., Zhong, N., Li, H. Y., Zhang, X. (2015). Acoustic analysis of snoring in the diagnosis of obstructive sleep apnea syndrome: A call for more rigorous. *J Clin Sleep Med*, 11(7), 765–771. <https://doi.org/10.5664/jcsm.4856>
 21. Leuppi, J. D., Salome, C. M., Jenkins, C. R., Anderson, S. D., Xuan, W., Marks, G. B., Koskela, H., Brannan, J. D., Freed, R., Andersson, M., Chan, H. K., Woolcock, A. J. (2001). Predictive markers of asthma exacerbation during stepwise dose reduction of inhaled corticosteroids. *Am J Respir Crit Care Med*, 163(2), 406–412. <https://doi.org/10.1164/ajrcm.163.2.9912091>
 22. Lv, R., Liu, X., Zhang, Y., Dong, N., Wang, X., He, Y., Yue, H., Yin, Q. (2023). Pathophysiological mechanisms and therapeutic approaches in obstructive sleep apnea syndrome. *Signal Transduct Target Ther*, 8(1), 218. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01496-3>. EDN: <https://elibrary.ru/QHJFHI>
 23. Mahfouz, R., Barchuk, A., Obeidat, A. E., Mansour, M. M., Hernandez, D., Darweesh, M., Aldiabat, M., Al-Khateeb, M. H., Yusuf, M. H., Aljabiri, Y. (2022). The relationship between obstructive sleep apnea (OSA) and gastroesophageal reflux disease (GERD) in inpatient settings: A nationwide study. *Cureus*, 14(3), e22810. <https://doi.org/10.7759/cureus.22810>. EDN: <https://elibrary.ru/CQTLOS>
 24. Mao, Z., Zheng, P., Zhu, X., Wang, L., Zhang, F., Liu, H., Li, H., Zhou, L., Liu, W. (2024). Obstructive sleep apnea hypopnea syndrome and vascular lesions: An update on what we currently know. *Sleep Med*, (119), 296–311. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2024.05.010>. EDN: <https://elibrary.ru/IBBTDA>

25. Martí-Almor, J., Jiménez-López, J., Casteigt, B., Conejos, J., Valles, E., Farré, N., Flor, M. F. (2021). Obstructive sleep apnea syndrome as a trigger of cardiac arrhythmias. *Curr Cardiol Rep*, 23(3), 20. <https://doi.org/10.1007/s11886-021-01445-y>. EDN: <https://elibrary.ru/LXXQSU>
26. Nadel, J. A., Widdicombe, J. G. (1962). Reflex effects of upper airway irritation on total lung resistance and blood pressure. *J Appl Physiol*, (17), 861–865. <https://doi.org/10.1152/jap.1962.17.6.861>
27. Peat, J. K., Woolcock, A. J., Cullen, K. (1987). Rate of decline of lung function in subjects with asthma. *Eur J Respir*, 70(3), 171–179.
28. Pedrosa, R. P., Drager, L. F., de Paula, L. K. G., Amaro, A. C. S., Bortolotto, L. A., Lorenzi-Filho, G. (2013). Effects of OSA treatment on BP in patients with resistant hypertension: A randomized trial. *Chest*, 144(5), 1487–1494. <https://doi.org/10.1378/chest.13-0085>
29. Rocha, B. R., Behlau, M. (2018). The influence of sleep disorders on voice quality. *J Voice*, 32(6), 771.e1–771.e13. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2017.08.009>
30. Torres, G., Sánchez de la Torre, M., Pinilla, L., Barbé, F. (2024). Obstructive sleep apnea and cardiovascular risk. *Clin Investig Arterioscler*, 36(4), 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.arteri.2024.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/AXHCNR>
31. Yasuma, F., Noda, A., Hayano, J. (2024). Blood pressure regulation and hypertension in obstructive sleep apnea syndrome: A historical perspective. *Intern Med*, 63(23), 3131–3136. <https://doi.org/10.2169/internalmedicine.2960-23>. EDN: <https://elibrary.ru/PSLUSM>
32. Yeghiazarians, Y., Jneid, H., Tietjens, J. R., Redline, S., Brown, D. L., El-Sherif, N., Mehra, R., Bozkurt, B., Ndumele, C. E., Somers, V. K. (2021). Obstructive sleep apnea and cardiovascular disease: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 144(3), 56–67. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000988>. EDN: <https://elibrary.ru/MSKFKK>
33. Yuan, F., Zhang, S., Liu, X., Liu, Y. (2021). Correlation between obstructive sleep apnea hypopnea syndrome and hypertension: A systematic review and meta-analysis. *Ann Palliat Med*, 10(12), 12251–12261. <https://doi.org/10.21037/apm-21-3302>. EDN: <https://elibrary.ru/IIRLBV>

References

1. Velibekov, R. T., Kazachenko, A. A. (2020). Changes in heart rate variability indicators in patients with obstructive sleep apnea syndrome. *Izvestiya Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii*, (39), 29–32. EDN: <https://elibrary.ru/QMBJMZ>
2. Diagnosis and treatment of obstructive sleep apnea in adults: Recommendations of the Russian Society of Somnologists (RSS). Approved by the Conference of the Russian Society of Somnologists, February 16, 2018.

3. Zhoglo, A. O., Molchanov, A. S., Chernyakhovskaya, A. A. (2020). The effect of long-term CPAP therapy on weight dynamics in patients with severe OSA. *Izvestiya Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii*, (39), 49–51. EDN: <https://elibrary.ru/TQSSJD>
4. Clinical guidelines of the Eurasian Association of Cardiologists (EAC) and the Russian Society of Somnologists (RSS) for the diagnosis and treatment of obstructive sleep apnea in patients with cardiovascular diseases (2024).
5. Kozhevnikova, O. V., Namazova-Baranova, L. S., Mytnikova, Yu. S., Abashidze, E. A., Margieva, T. V., Paltseva, A. E. (2016). Obesity and sleep disorders in children. *Pediatricheskaya farmakologiya*, 13(6), 571–576. <https://doi.org/10.15690/pf.v13i6.1671>. EDN: <https://elibrary.ru/XUYNIL>
6. Lisovskaya, N. A., Korostovtseva, L. S., Obraztsova, G. I., Sviryaev, Yu. V., Dubinina, E. A. (2015). The relationship between obstructive sleep apnea and cognitive impairments in children. *Arterial'naya gipertenziya*, 21(1), 101–110. EDN: <https://elibrary.ru/TZKINJ>
7. Melnikov, A. Yu., Messerle, A. A. (2019). Correlation between acoustic analysis parameters of snoring and the severity of obstructive sleep apnea syndrome. *Effektivnaya farmakoterapiya*, 6.15(44), 62–66. <https://doi.org/10.33978/2307-3586-2019-15-44-62-66>. EDN: <https://elibrary.ru/ROMUAO>
8. Osipenko, E. V., Orlova, O. S., Kotelnikova, N. M., Isaeva, M. L., Mikhalevskaya, I. A., Krivikh, Yu. S., Kalinkin, A. L. (2021). Sleep and its impact on voice. *Spetsial'noe obrazovanie*, 1(61), 151–166. https://doi.org/10.26170/1999-6993_2021_01_12. EDN: <https://elibrary.ru/UDDOUI>
9. Palman, A. D., Akselrod, A. S. (2021). Ventricular cardiac arrhythmias in a patient with obstructive sleep apnea syndrome and their effective non-pharmacological treatment. *Al'manakh klinicheskoy meditsiny*, 49(2), 165–170. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2021-49-031>. EDN: <https://elibrary.ru/LCXABF>
10. Solomakha, A. Yu., Lisovskaya, N. A., Bochkarev, M. V., Korostovtseva, L. S., Petrova, N. A., Obraztsova, G. I., Sviryaev, Yu. V. (2020). Sleep-related breathing disorders in people of different age groups. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I. M. Sechenova*, 106(1), 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0869813920010100>. EDN: <https://elibrary.ru/JRDHHI>
11. Chabanov, P. A. (2023). The vicious circle of OSA. *Ustoychivoe razvitie nauki i obrazovaniya*, 1(76), 97–101. EDN: <https://elibrary.ru/ZHUPOI>
12. Shelud'ko, E. G., Kolosov, V. P., Naumov, D. E., Prikhod'ko, A. G. (2019). Clinical and functional features of the combined course of obstructive sleep apnea syndrome and bronchial asthma. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya*, (19), 23–30. https://doi.org/10.12737/article_5c88b5e86b9c18.75963991. EDN: <https://elibrary.ru/STLJLL>

13. Amiri, S. (2023). Body mass index and sleep disturbances: A systematic review and meta-analysis. *Postep Psychiatr Neurol*, 32(2), 96–109. <https://doi.org/10.5114/ppn.2023.129067>. EDN: <https://elibrary.ru/FFWGNQ>
14. Arnaud, C., Bochaton, T., Pépin, J. L., Belaidi, E. (2020). Obstructive sleep apnoea and cardiovascular consequences: Pathophysiological mechanisms. *Arch Cardiovasc Dis*, 113(5), 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2020.01.003>. EDN: <https://elibrary.ru/PNZFRQ>
15. Baillieul, S., Dekkers, M., Brill, A. K., Schmidt, M. H., Detante, O., Pépin, J. L., Tamisier, R., Bassetti, C. L. A. (2022). Sleep apnoea and ischaemic stroke: Current knowledge and future directions. *Lancet Neurol*, 21(1), 78–88. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(21\)00321-5](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(21)00321-5). EDN: <https://elibrary.ru/HTODMU>
16. Cho, J. H., Guilminault, C., Joo, Y. H., Jin, S. K., Han, K. D., Park, C. S. (2017). A possible association between dysphonia and sleep duration: A cross-sectional study based on the Korean National Health and Nutrition Examination Surveys from 2010 to 2012. *PLoS ONE*, 12(8), 182–286. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182286>
17. Crinion, S. J., Kleinerova, J., Kent, B., Nolan, G., Taylor, C. T., Ryan, S., McNicholas, W. T. (2021). Non-dipping nocturnal blood pressure correlates with obstructive sleep apnoea severity in normotensive subjects and may reverse with therapy. *ERJ Open Res*, 7(3), 00338–2021. <https://doi.org/10.1183/23120541.00338-2021>. EDN: <https://elibrary.ru/XPJCQC>
18. Guo, W., Sun, L., Yue, H., Guo, X., Chen, L., Zhang, J., Chen, Z., Wang, Y., Wang, J., Lei, W. (2024). Associations of intermittent hypoxia burden with gut microbiota dysbiosis in adult patients with obstructive sleep apnea. *Nat Sci Sleep*, (16), 1483–1495. <https://doi.org/10.2147/NSS.S484377>. EDN: <https://elibrary.ru/QOQNRW>
19. Javaheri, S., Javaheri, S., Somers, V. K., Gozal, D., Mokhlesi, B., Mehra, R., McNicholas, W. T., Zee, P. C., Campos-Rodriguez, F., Martinez-Garcia, M. A., Cistulli, P., Malhotra, A. (2024). Interactions of obstructive sleep apnea with the pathophysiology of cardiovascular disease, Part 1: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol*, 84(13), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2024.02.059>. EDN: <https://elibrary.ru/PMXEQN>
20. Jin, H., Lee, L. A., Song, L., Li, Y., Peng, J., Zhong, N., Li, H. Y., Zhang, X. (2015). Acoustic analysis of snoring in the diagnosis of obstructive sleep apnea syndrome: A call for more rigorous. *J Clin Sleep Med*, 11(7), 765–771. <https://doi.org/10.5664/jcsm.4856>
21. Leuppi, J. D., Salome, C. M., Jenkins, C. R., Anderson, S. D., Xuan, W., Marks, G. B., Koskela, H., Brannan, J. D., Freed, R., Andersson, M., Chan, H. K., Woolcock, A. J. (2001). Predictive markers of asthma exacerbation during stepwise dose reduction of inhaled corticosteroids. *Am J Respir Crit Care Med*, 163(2), 406–412. <https://doi.org/10.1164/ajrcm.163.2.9912091>

22. Lv, R., Liu, X., Zhang, Y., Dong, N., Wang, X., He, Y., Yue, H., Yin, Q. (2023). Pathophysiological mechanisms and therapeutic approaches in obstructive sleep apnea syndrome. *Signal Transduct Target Ther*, 8(1), 218. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01496-3>. EDN: <https://elibrary.ru/QHJFHI>
23. Mahfouz, R., Barchuk, A., Obeidat, A. E., Mansour, M. M., Hernandez, D., Darweesh, M., Aldiabat, M., Al-Khateeb, M. H., Yusuf, M. H., Aljabiri, Y. (2022). The relationship between obstructive sleep apnea (OSA) and gastroesophageal reflux disease (GERD) in inpatient settings: A nationwide study. *Cureus*, 14(3), e22810. <https://doi.org/10.7759/cureus.22810>. EDN: <https://elibrary.ru/CQTLOS>
24. Mao, Z., Zheng, P., Zhu, X., Wang, L., Zhang, F., Liu, H., Li, H., Zhou, L., Liu, W. (2024). Obstructive sleep apnea hypopnea syndrome and vascular lesions: An update on what we currently know. *Sleep Med*, (119), 296–311. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2024.05.010>. EDN: <https://elibrary.ru/IBBTDA>
25. Martí-Almor, J., Jiménez-López, J., Casteigt, B., Conejos, J., Valles, E., Farré, N., Flor, M. F. (2021). Obstructive sleep apnea syndrome as a trigger of cardiac arrhythmias. *Curr Cardiol Rep*, 23(3), 20. <https://doi.org/10.1007/s11886-021-01445-y>. EDN: <https://elibrary.ru/LXXQSU>
26. Nadel, J. A., Widdicombe, J. G. (1962). Reflex effects of upper airway irritation on total lung resistance and blood pressure. *J Appl Physiol*, (17), 861–865. <https://doi.org/10.1152/jappl.1962.17.6.861>
27. Peat, J. K., Woolcock, A. J., Cullen, K. (1987). Rate of decline of lung function in subjects with asthma. *Eur J Respir*, 70(3), 171–179.
28. Pedrosa, R. P., Drager, L. F., de Paula, L. K. G., Amaro, A. C. S., Bortolotto, L. A., Lorenzi-Filho, G. (2013). Effects of OSA treatment on BP in patients with resistant hypertension: A randomized trial. *Chest*, 144(5), 1487–1494. <https://doi.org/10.1378/chest.13-0085>
29. Rocha, B. R., Behlau, M. (2018). The influence of sleep disorders on voice quality. *J Voice*, 32(6), 771.e1–771.e13. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2017.08.009>
30. Torres, G., Sánchez de la Torre, M., Pinilla, L., Barbé, F. (2024). Obstructive sleep apnea and cardiovascular risk. *Clin Investig Arterioscler*, 36(4), 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.arteri.2024.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/AXHCNR>
31. Yasuma, F., Noda, A., Hayano, J. (2024). Blood pressure regulation and hypertension in obstructive sleep apnea syndrome: A historical perspective. *Intern Med*, 63(23), 3131–3136. <https://doi.org/10.2169/internalmedicine.2960-23>. EDN: <https://elibrary.ru/PSLUSM>
32. Yeghiazarians, Y., Jneid, H., Tietjens, J. R., Redline, S., Brown, D. L., El-Sherif, N., Mehra, R., Bozkurt, B., Ndumele, C. E., Somers, V. K. (2021). Obstructive sleep apnea and cardiovascular disease: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 144(3), 56–67. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000988>. EDN: <https://elibrary.ru/MSKFKK>

33. Yuan, F., Zhang, S., Liu, X., Liu, Y. (2021). Correlation between obstructive sleep apnea hypopnea syndrome and hypertension: A systematic review and meta-analysis. *Ann Palliat Med*, 10(12), 12251–12261. <https://doi.org/10.21037/apm-21-3302>. EDN: <https://elibrary.ru/IIRLBV>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Ермакова Елена Александровна, ассистент кафедры патофизиологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения РФ
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
mnogopisemelena@mail.ru

Куспаналиева Дина Саиновна, кандидат медицинских наук, старший преподаватель кафедры патофизиологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения РФ
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
scarry_cherry@mail.ru

Булатецкий Сергей Владиславович, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры патофизиологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения РФ
ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
dr_bsv@mail.ru

Ванина Дарья Сергеевна, ассистент кафедры патофизиологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения РФ

*ул. Высоковольтная, 9, г. Рязань, 390026, Российская Федерация
sirotkina.dashulya@inbox.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena A. Ermakova, Assistant Lecturer of Department of Pathophysiology

Ryazan State Medical University

9, Ysokovolttnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation

mnogopisemelena@mail.ru

SPIN-code: 8130-7340

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6953-041X>

Dina S. Kuspanalieva, Candidate of Sciences in Medicine, Senior Instructor of Department of Pathophysiology

Ryazan State Medical University

9, Ysokovolttnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation

scarry_cherry@mail.ru

SPIN-code: 4779-9169

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0552-4428>

Sergey V. Bulatetsky, Doctor of Sciences in Medicine, Associate Professor, Professor of Department of Pathophysiology

Ryazan State Medical University

9, Ysokovolttnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation

dr_bsv@mail.ru

SPIN-code: 2756-9179

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6023-7523>

Researcher ID: S-1631-2016

Daria S. Vanina, Assistant Lecturer of Department of Pathophysiology

Ryazan State Medical University

9, Ysokovolttnaya Str., Ryazan, 390026, Russian Federation

sirotkina.dashulya@inbox.ru

SPIN-code: 9083-7109

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0690-3300>

Поступила 02.09.2025

После рецензирования 15.10.2025

Принята 27.10.2025

Received 02.09.2025

Revised 15.10.2025

Accepted 27.10.2025

Научные обзоры и сообщения / Scientific Reviews and Reports

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1398](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1398)EDN: [SLBFUS](https://www.edn.ru/SLBFUS)

УДК 576.89:591.69:547.98



Дубильные веществ конденсированного типа (проантоцианидины) в животноводстве: противопаразитарная активность (обзор литературы)

Е.М. Мальцева¹, Л.Г. Пинчук¹, Р.М. Акбаев²¹ФГБОУ ВО КемГМУ Минздрава России, Кемерово, Российская Федерация²ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина, Москва,
Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Паразитарные болезни сельскохозяйственных животных широко распространены и являются одной из причин колоссального экономического ущерба, вследствие негативного влияния на рост и развитие животных, и связанного с этим снижения продуктивности. Для сокращения потерь и качества животноводческой продукции, сохранения здоровья животных необходимо проведение терапии и профилактики гельминтозов с применением высокоэффективных и безопасных антигельминтиков. Снижение эффективности, имеющихся в арсенале лекарственных препаратов, вследствие формирования устойчивости к ним гельминтов, а также в силу их токсичности, определяет необходимость поиска альтернативных источников биологически активных соединений с антигельминтными свойствами.

Цель. Обзор и анализ отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных исследованиям по использованию в животноводстве в качестве антигельминтных средств растений, содержащих проантоцианидины (ПАЦ).

Материалы и методы. В основу работы положен анализ оригинальных статей и литературных обзоров, поиск которых осуществлялся в отечественных и зарубежных электронных базах данных научных публикаций PubMed, eLibrary, Scopus, Embase, Medline, GoogleScholar. Глубина поиска охватывает период 2000–2025 гг., доля литературных источников за 5 последних лет составляет

37 %, за 10 – 70 %. В исследовании были использованы методы структурного и системного анализов.

Результаты. Проантоцианидины широко изучаются в целях их применения в качестве кормовых добавок в составе растительного сырья, экстрактов из него, и выделенных индивидуальных веществ при выращивании крупного и мелкого рогатого скота, в свиноводстве и птицеводстве. Результаты экспериментов *in vitro*, *in situ* и *in vivo* раскрывают вопросы корреляции концентрации проантоцианидинов и степени проявления противоглистного эффекта, а также формирования показателей продуктивности животных; действие химических препаратов аналогичного фармакологического действия на фоне совместного применения с проантоцианидинами, фазы развития растения, характеризующиеся наибольшим накоплением проантоцианидинов. Изучается действие проантоцианидинов на различных стадиях жизненного цикла паразитов: вылупления яиц, стадии линьки, взрослые особи. Показано, что основным местом антигельминтного эффекта проантоцианидинов является кутикула, связывание происходит с поверхностными белками кишечной мембраны, что приводит к нарушению процесса линьки и потере подвижности, а также секреции ферментов. Рассматриваются вопросы синергизма и антагонизма проантоцианидинов с другими группами биологически активных веществ растений и синтетических препаратов антигельминтного действия, а также грибов-нематодофагов.

Заключение. В рамках настоящей работы проанализировано около двухсот научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, показывающих что на современном этапе развития животноводства исследования по изучению использования растительных источников дубильных веществ конденсированного типа как противопаразитарных средств, занимают важное место в аспекте улучшения состояния здоровья животных, а, следовательно, и питательной ценности продукции животноводства. В качестве перспективы подчеркивается расширения экспериментов *in vivo*. Однако следует отметить, что в отечественной ветеринарии уделяется недостаточно внимания поиску и изучению растительных источников богатых проантоцианидинами с целью дегельминтизации сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова: антигельминтное действие; кормовые добавки; растительные источники проантоцианидинов; выращивание крупного и мелкого рогатого скота; свиноводство; птицеводство

Для цитирования. Мальцева, Е. М., Пинчук, Л. Г., & Акбаев, Р. М. (2026). Дубильные веществ конденсированного типа (проантоцианидины) в животноводстве: противопаразитарная активность (обзор литературы). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 497–523. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1398>

Condensed tannins (proanthocyanidins) in livestock: antiparasitic activity (review)

E.M. Maltseva¹, L.G. Pinchuk¹, R.M. Akbaev²

¹*Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russian Federation*

²*Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA named after K.I. Skryabin, Moscow, Russian Federation*

Abstract

Background. Farm animals parasitic diseases are widespread and are one of the enormous economic damage causes due to the negative impact on the animals growth and development and the associated productivity decrease. It is necessary to treat and prevent helminthiasis using highly effective and safe anthelmintics to reduce livestock products losses and quality and preserve animal health. The effectiveness decrease of existing drugs on account of the helminths resistance development as well as due to their toxicity, determines the need to search for alternative sources of biologically active compounds with anthelmintic properties.

Purpose. Review and analysis of domestic and foreign scientific publications devoted to research on the use of plants containing proanthocyanidins (PAC) in livestock as anthelmintic agents.

Materials and methods. The work is based on the original articles analysis and literary reviews which were searched in domestic and foreign scientific publications electronic databases PubMed, eLibrary, Scopus, Embase, Medline, GoogleScholar. The search depth covers the period 2000-2025, the share of literary sources for the last 5 years is 37%, for 10 – 70%. The structural and system analysis methods were used in the study.

Results. Proanthocyanidins are widely studied for their use as feed additives in the plant raw materials composition, plant extracts and isolated individual substances in the cattle and small cattle cultivation, in pig and poultry farming. The experiments results *in vitro*, *in situ* and *in vivo* reveal the correlation between the proanthocyanidins concentration and the anthelmintic effect manifestation, as well as the animal productivity indicators formation; the chemical preparations effect with similar pharmacological action against the background of combined use with proanthocyanidins, the plant development phases characterized by the greatest accumulation of proanthocyanidins. The proanthocyanidins effect on various stages of the parasites life cycle is studied: egg hatching, molting stages and adults. It has been shown that the proanthocyanidins anthelmintic effect main site is the cuticle which binds to the surface intestinal membrane proteins. It leads to disruption of the molting process and loss of mobility, as well as enzyme secretion. The proanthocyanidins synergism and antagonism issues with other groups of

plants biologically active substances and synthetic preparations of anthelmintic action, as well as nematodophages fungi, are considered.

Conclusion. Within the work framework about two hundred scientific publications of domestic and foreign authors have been analyzed. Its showing that at the present stage of livestock development the research condensed tannins plant sources use as antiparasitic agents occupies an important place in the improving animal health aspect and consequently the livestock products nutritional value. The expansion of in vivo experiments is emphasized as a perspective. However, it should be noted that in domestic veterinary medicine, insufficient attention is paid to the search and study rich proanthocyanidins plant sources for the purpose of deworming farm animals.

Keywords: anthelmintic effect; feed additives; plant proanthocyanidins sources; large and small livestock cultivation; pig farming; poultry farming

For citation. Maltseva, E. M., Pinchuk, L. G., & Akbaev, R. M. (2026). Condensed tannins (proanthocyanidins) in livestock: antiparasitic activity (review). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 497–523. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1398>

Введение

Производство молока и мяса в условиях глобальных изменений климата требует новых подходов для улучшения использования кормов. В процессе интенсификации животноводческого сектора сельского хозяйства для сбалансированности рационов кормления животных возрастает необходимость включения различных кормовых добавок [29]. Актуальными являются работы, направленные на поиск и выделение биологически активных соединений (БАС) натурального происхождения [14]. Применение кормовых трав с высоким содержанием БАС рассматривается как актуальная перспектива стратегии развития животноводства в современных условиях.

Неподеленный интерес вызывает использование богатых дубильными веществами (ДВ) растений и растительных экстрактов в рационах жвачных животных для улучшения качества продуктов животного происхождения [27]. Современные исследования показывают, что растительные танины могут эффективно улучшать качество мяса и молока, а также повышать окислительную стабильность продуктов. Это обусловлено их биологическими функциями в организме животных, в частности влиянием на механизм антиоксидантной защиты, ингибирующим действием на различные виды патогенных бактерий, грибов и вирусов, а также проявлением противопаразитарной, противовоспалительной и противодиарейной активности [43].

В настоящее время ветеринарная паразитология столкнулась с нарастающей проблемой появления резистентных рас гельминтов, против которых испытанные ранее антигельминтные препараты в рекомендованных дозах оказываются неэффективными. Это явление отмечено у многих видов животных и проявляется по отношению практически ко всем основным группам антигельминтиков, о чем свидетельствуют многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов [1; 3; 4; 5; 7; 8; 13; 24; 25; 28].

О широкой распространенности паразитарных болезней животных, являющихся причиной снижения продуктивности, свидетельствуют данные о том, что около 40-90 % овец и крупного рогатого скота в регионах нашей страны заражены гельминтами [3; 9]. У телят, зараженных *Dictyocaulus viviparus* и желудочно-кишечными стронгилятами, выявлено снижение прирост массы в среднем на 34-35 кг в год [10].

Для противодействия глобальному распространению устойчивости к антигельминтным препаратам предпринимаются значительные усилия по разработке и распространению альтернативных средств для борьбы с инфекциями, вызванными желудочно-кишечными нематодами у мелких жвачных животных, что особенно актуально в аспекте органического сельского хозяйства, где заметно стремление к сокращению использования синтетических веществ [18].

Использование натуральных растительных экстрактов в качестве противоглистных средств для домашнего скота практикуется уже давно [16; 18; 21]. Противоглистные свойства растений обычно приписывают вторичным метаболитам, таким как алкалоиды, терпеноиды или полифенолы, например, проантоцианидины, также известные как конденсированные танины [48]. На фоне резкого повышения устойчивости к стандартным антигельминтным средствам экстракты растений, содержащие ДВ, представляют достойную альтернативу. Преимуществом использования полифенолов в качестве перспективных БАС является их низкая токсичность, что было показано на экспериментальных моделях животных [6].

ДВ широко представлены в растительном мире и могут быть разделены на группы гидролизуемых и конденсированных танинов. В группе гидролизуемых ДВ можно выделить галлодубильные, которые при гидролизе образуют углеводы и галловую кислоту, и эллагодубильные, продуктами гидролиза которых являются углеводы, галловая и эллаговая кислоты. Эти соединения гидролизуются слабыми кислотами и разлагаются при высоких температурах с образованием пирогаллола. Конденсированные танины - проантоцианидины, являются наиболее распространённым классом

полифенолов растительного происхождения. Они представляют собой олигомеры флаван-3-олов (мономеров катехина) или флаван-3,4-диолов, обычно соединённых связями С-С (4→8 или 4→6), а иногда и связями С-О-С, с широким структурным разнообразием. К олигомерными про-антоцианидинами (оПАЦ) относятся соединения, содержащие не более трёх мономерных остатков. ПАЦ легко разлагаются в кислой спиртовой среде с образованием антоциановых пигментов и окисляются до флобафенов [35; 36].

Многочисленные исследования, проведённые в последнее десятилетие, свидетельствуют об антигельминтном действии ПАЦ. В частности, установлена их способность снижать концентрацию глистов у крыс, в рацион которых включались конденсированные танины [16], а также у крупного рогатого скота, пасущегося на пастбищах с растениями богатыми ДВ конденсированного типа [22].

Выявлены антигельминтные свойства у экстрактов, выделенных из травы эспарцета (*Onobrychis viciifolia*), и очищенных ПАЦ данного растения в исследованиях *in vitro* против *Haemonchus contortus* [15] *Ostertagia ostertagi* [32] и *Ascaris suum* [47].

Анализ исследований, опубликованных в течение последних двух десятилетий, по изучению антигельминтных свойств лекарственных растений, произрастающих в Африке, показывает, что в 80 % случаев изучались водные и водно-спиртовые экстракты и полярные фракции, полученные из сырых экстрактов, а не исходное растительное сырьё. Более 64 % исследований, проведенных *in vitro*, касались моделей паразитарных и непаразитарных нематод. Ингибирование вылупления яиц, ингибирование миграции личинок и паралич являются распространенными параметрами, оцениваемыми *in vitro*. Около 72 % моделей *in vivo* включали мелких жвачных, 15 % грызунов и 5 % кур [23].

При изучении прямой антигельминтной активности ПАЦ *in vitro* в отношении нематод *Oesophagostomum dentatum* и выявлении на какие стадии жизненного цикла данного паразита направлено их антигельминтное действие у свиней, использовались традиционные лекарственные растения [48]. Листья чёрной смородины (*Ribes nigrum*), цветы липы (*Tilia L.*, смесь *T. cordata*, *T. platyphyllos* и *T. vulgaris*) и кора ивы (*Salix* spp.), а также цветы клевера белого (*Trifolium repens*) экстрагировали 70 % ацетоном (без добавления аскорбиновой кислоты). ПАЦ разделяли на колонках Sephadex LH-20, элюируя фракции ПАЦ смесью ацетон-вода (3:7 и 1:1). Количественное содержание конденсированных танинов определяли с помощью

тиоолитической деградации и ВЭЖХ с использованием в качестве внешнего стандарта дигидрокверцетин.

В результате исследования доказано антигельминтное действие ПАЦ-содержащих растительных экстрактов и их очищенных фракций против *O. dentatum*. Восприимчивы к эффектам ПАЦ свободноживущие/неинфекционные стадии и взрослые особи, в то время как L4 менее восприимчивы, а L3 поражаются незначительно. Также ПАЦ ингибируют линьку от L3 до L4, это позволяет предположить, что они действуют на специфические, ключевые процессы жизненного цикла паразита и нарушают его метаболизм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что конденсированные танины могут быть перспективным вариантом борьбы с *O. dentatum* у свиней, особенно на взрослых стадиях развития. Также выявлена различная восприимчивость к конденсированным танинам на разных стадиях жизненного цикла одного и того же паразита, что может дать представление об механизмах антигельминтного действия этих часто встречающихся растительных соединений [48].

Paullinia pinnata (сем. *Sapindaceae*) – растение, традиционно используемое в народной медицине Западной Африки против широкого спектра заболеваний, включая почвенные гельминтозы. Анализ 50 % водно-спиртового экстракта корней данного растения методом ЖХ-МС подтвердил наличие эпикатехина, олигомерных и полимерных ПАЦ А-типа. В исследовании *in vitro* [41] подтверждена активность экстракта корней *Paullinia pinnata* в отношении свободноживущей нематоды *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*), а также личиночных стадий паразитических гельминтов *Ancylostoma caninum* (*A. caninum*), *Haemonchus contortus* (*H. contortus*), *Toxocara cati* (*T. cati*) и *Trichuris vulpis* (*T. vulpis*), выявлена летальная активность в отношении *T. cati* (LC₅₀ 112 мкг/мл), *T. vulpis* (LC₅₀ 17 мкг/мл) и *C. elegans* (LC₅₀ 2,5 мг/мл). Не обнаружена антигельминтная активность для *A. caninum*, как в отношении вылупления яиц, так и миграцию личинок.

Доказано, что антигельминтная активность при использовании экстрактов корня *Paullinia pinnata* в качестве противоглистных средств была обусловлена присутствием ПАЦ, а не какого-либо другого класса биологически активных веществ. Для определения антигельминтной активности экстракт сырого сырья, его фракции и выделенные индивидуальные соединения были испытаны *in vitro* в отношении модельного организма *Caenorhabditis elegans*. Достоверно лучшая активность наблюдалась у тримерного процианидина А-типа по сравнению с тримером В-типа. Однако этот эффект не может быть обобщен для тетрамерных ПАЦ, для

которых тип интерфлаван-связи (4→6) против (4→8) оказывал наибольшее влияние на биологическую активность [38].

Spiegler V. et al. [40] установили антигельминтную активность *in vitro* в отношении модельной нематоды *Caenorhabditis elegans* не только водно-спиртового экстракта листьев *Combretum mucronatum*, содержащего в качестве основных веществ эпикатехин, олигомерные ПАЦ, образующие при кислотном гидролизе цианидин хлорид, флавоноиды, но и очищенных фракций, содержащих индивидуальные соединения.

Длительное кормление коз экстрактами из кормовых бобовых *Sesbania sesban* (*S. sesban*) и *Desmodium intortum* (*D. intortum*), содержащих ПАЦ показало, что миграция личинок ингибировалась при их концентрациях от 1000 мкг/мл. При этом большей активностью характеризовался экстракт из *D. intortum* по сравнению с соответствующий концентрацией экстракта *S. sesban*. Также наблюдалось уменьшение общего количество глистов, наименьшее соотношение самок к самцам-паразитам, наименьшее количество яиц в матке каждой самки червя и наименьшая плодовитость на единицу глиста. Однако, при этом не выявлено прибавки в весе животных [19].

Эспарцет (*Onobrychis viciifolia* Scop.) – высокопитательный корм, выращиваемый во всем мире и содержащий полифенольные соединения, включая ПАЦ, который лучше всего использовать в период от фазы бутонизации до фазы цветения, чтобы сбалансировать биологическую активность ПАЦ и выход биомассы. Wang Y. et al. [45] доказали, что комбинирование эспарцета и люцерны (*Medicago sativa* L.) на пастбище эффективно снижает вздутие у жвачных животных, что объясняется присутствием конденсированных танинов. Максимально эффективны ПАЦ свежего эспарцета, но в сене их биологическая активность сохраняется лучше, чем в силосе. С точки зрения противопаразитарной активности и снижения вздутия желательнее большее содержание конденсированных танинов, однако наилучшая кормовая ценность достигается при концентрации их около 50 г на кг корма.

Zafar I. et al. [50] изучая антигельминтную активность *in vitro* коммерчески доступного танина из Кении, используемого в текстильной промышленности содержащего 1,19 г ПАЦ/кг, установили дозозависимое ингибирование вылупления яиц *Haemonchus contortus*. Однако кормовые добавки не действовали на взрослых особей нематод. *In vivo* у ягнят, получавших рационы, содержащие 2 и 3 % исследуемого танина в корме, установлено снижение количества яиц в фекалиях, при этом уменьша-

лось потребление корма и усвояемость питательных веществ, а баланс азота был выше по сравнению с контролем. Максимальный прирост веса наблюдался у животных, которым давали рацион, содержащий 3 % танина. Прямой антигельминтный эффект ПАЦ подтверждался замедлением вылупления яиц, снижением количества яиц в фекалиях у овец, что способствовало улучшению использования питательных веществ.

Доказан продолжительный антипаразитарный эффект экстракта квебрахо (*Quebracho*) в отношении популяции *Trichostrongylus colubriformis* у овец, обусловленный прямым антигельминтным действием ПАЦ, включенных в рацион кормления [12].

In vitro и *in vivo* ПАЦ танина квебрахо (*Quebracho*) снижали жизнеспособность L3 личинок *Haemonchus contortus*, *Teladorsagia circumcincta* и *Trichostrongylus vitrinus* в ЖКТ овец. LD₅₀ существенно не отличались для разных видов нематод. Наименьшая концентрация кишечных глистов была выявлена у овец, получавших 8 % экстракта *Quebracho* [11].

В работе [20] Fraccelli C. et al. для проверки эффективности экстракта квебрахо, богатого ПАЦ, в отношении кокцидиозных инфекций и показателей роста естественно инфицированных *Eimeria spp.* случайным образом распределили тридцать девять козлят мужского пола в возрасте 52-81 дня на 4 группы: контрольная группа (CG, 9 козлят) и три группы, получавшие танин (TG, по 10 козлят в каждой), которые получали кормовую добавку, содержащую танин квебрахо (*Silvafeed BYPRO Q*). В течение 45-дневного периода исследования козлята получали обработанный корм регулярно один раз в день по изменяющемуся графику: в течение недели в месяц (TG1), в течение дня каждые 5 дней (TG2) и в течение 3 дней каждые 15 дней (TG3).

Результаты показали, что количество ооцист эймерий в фекалиях экспериментальных групп уменьшилось на пятый день исследования и значительно отличалось ($P < 0,0001$), начиная с 15-дневного периода исследования. Доля сокращения ооцист выше 95 % была обнаружена у 58 % козлят на 5-й день исследования. Сравнение количества отдельных ооцист на грамм, полученных из групп TG, показало, что для получения значительного контроля за популяцией эймерий требовалась высокая доза или длительное введение экстракта квебрахо. Установлено, что однократное и более частое введение ПАЦ (TG2), более эффективно, чем лечение, проводимое повторно в течение 3 дней (TG3). Козлята, получавшие ПАЦ, особенно в группе TG2, значительно прибавили в весе относительно контрольной группы.

Кормовая добавка муки из высушенных листьев *Ficus infectoria* и *Psidium guajava* (в соотношении 70:30), содержащих ПАЦ, в концентрации 1,5 % в сене снижала заражение глистами взрослых овец, инфицированных *Haemonchus contortus* [34]. В исследовании на козах, экспериментально заражённых *Haemonchus contortus* (1500 личинок/коза) на фоне кормовой добавки листовой шротовой смеси, содержащей конденсированный танин в количестве 100 г/день/коза, добавленной к рациону пшеничной соломы, установлено значительное снижение количества яиц в кале по сравнению с контролем и зараженной группой, не получавшей кормовую добавку [33].

При изучении влияния включения в рацион овец эспарцета (*Onobrychis viciifolia* Scop.) на инвазии гельминтами *Haemonchus spp.*, *Teladorsagia spp.*, *Nematodirus spp.* и *Trichostrongylus spp.* формировались две экспериментальные группы. Первая группа (I) – 160 ягнят местной красной энгадинской овцы (RES) и 113 ягнят швейцарской белой альпийской овцы (SWA) были искусственно инфицированы желудочно-кишечными нематодами впоследствии выпасались в течение 52 дней. Затем ягнята были распределены на 2 группы на 14-дневный экспериментальный период кормления. Одна группа получала диету с долей 55 % эспарцета и сравнивалась с контрольной группой по количеству яиц в кале. Вторая группа (II) 25 ягнят RES и 27 ягнят SWA паслись на инфицированных пастбищах в течение 37 дней, а затем их кормили в течение 13 последующих дней 100 % эспарцетом. В конце периода кормления у ягнят, получавших эспарцет, глистная нагрузка была значительно ниже по сравнению с контрольной группой в исследовании I ($p < 0,001$), II ($p = 0,012$). Порода, возраст животного, живой вес, пол и взаимодействие породы и варианта опыта не повлияли на инвазивность животных. RES имели более низкую нагрузку гельминтов *Haemonchus spp.* ($p = 0,035$) и *Trichostrongylus spp.* ($p = 0,003$) по сравнению с SWA. Независимо от породы, кормление эспарцетом значительно снизило нагрузку гельминтов *Teladorsagia spp.* ($p = 0,049$) и *Nematodirus spp.* ($p < 0,001$). Выявлено, что доля эспарцета 55 % в рационе достаточна для снижения гельминтной нагрузки и может быть предложена для внедрения на фермах-производителях [46].

Castañeda-Ramírez G. S. et al. [17] привели исследования *in vitro* с использованием 70 % водно-метанольных растительных экстрактов по изучению взаимосвязи между содержанием в них полифенолов и их антигельминтной активностью в отношении *Haemonchus contortus*. Изучались растительные экстракты десяти видов тропических растений: *Acacia collinsii*, *Lysiloma latisiliquum*, *Havardia albicans*, *Senegalia gaumeri*, *Mimosa*

bahamensis, *Piscidia piscipula*, *Acacia pennatula*, *Gymnopodium floribundum*, *Leucaena leucocephala* и *Bunchosia swartziana*, в качестве кормовых добавок мелким жвачным животным. Кроме того была определена их активность против нематод *Haemonchus contortus*, оцениваемая с помощью анализа ингибирования выхода личинок (LEIA) и анализа выведения яиц (ЕНА). Установлено, что добавление экстрактов изученных растений с высоким содержанием ПАЦ, общего содержания фенолов и общего содержания танинов при кормлении овец и коз, антигельминтный эффект, преимущественно, обусловлен ингибированием выхода личинок (LEIA).

Анализ ингибирования выделения личинок *Haemonchus contortus* третьей стадии (LEIA) *in vitro* под влиянием БАС цветков липы, листьев козьей ивы, листьев черной и красной смородины изучали Klongsiriwet K et al. [26]. В совокупности тестируемые соединения представляли основные типы ПАЦ (процианидины и продельфинидины) и типы флавоноидов (флавонолы, флавоны и флаваноны). Арбутин, ванилиновая кислота и дигидрокверцетин оказались неэффективными, тогда как нарингенин, кверцетин и лютеолин были высокоэффективны при концентрациях 250 мкг. Проантоцианидины были менее активны, чем продельфинидины. Эксперименты с комбинациями ПАЦ/кверцетин или ПАЦ/лютеолин впервые выявили существование синергических эффектов между танинами и флавоноидными мономерами. Доказано, что синергические эффекты проявляются при несколько более низких концентрациях проантоцианидинами, чем продельфинидинами. Это говорит о том, что антигельминтная активность ПАЦ может быть значительно усилена добавлением кверцетина или лютеолина, что может быть использовано при разработке оптимальных кормовых смесей.

Tibe O. et al. [42] выделили очищенные фракции ПАЦ из кормовых растений Ботсваны – *Viscum rotundifolium* (*V. rotundifolium*), *Viscum verrucosum* (*V. verrucosum*), *Tapinanthus oleifolius* (*T. oleifolius*), *Grewia flava* (*G. flava*) и *Ipomoea sinensis* (*I. sinensis*) и изучили *in vitro* их влияние на свободноживущие стадии ряда видов желудочно-кишечных нематод-паразитов, полученных от инфицированных овец. Оценку влияния экстрактов проводили на основании анализов вылупления яиц, развития и миграции личинок. ПАЦ из образцов *V. rotundifolium* и *I. sinensis* не влияли развитие личинок, а выделенные из *V. verrucosum*, *T. oleifolius* и *G. flava*, полностью подавляли развитие всех видов паразитов. Фракции ПАЦ данных растений были более эффективными и в подавлении развития личинок *H. contortus*. Установлено, что лишь у некоторых экстрактов выявлен слабый эффект

на миграцию личинок. Результаты, полученные *in vitro* доказывают наличие противопаразитарных свойств, и свидетельствуют о необходимости перехода к исследованиям *in vivo*.

В результате экспериментов с растительным экстрактом из *Combretum mucronatum*, содержащим ПАЦ, используя в качестве модельного организма *Caenorhabditis elegans*, установлено, что основным местом связывания танинов является кутикула, тогда как нижележащие ткани не были затронуты. В дополнение к нарушениям структуры кутикулы, на всех личиночных стадиях имели место дефекты линьки. Наблюдаемое при этом повышение жесткости кутикулы, объясняет антигельминтное действие ПАЦ, приводящее к нарушению процесса линьки или разрушению кожного покрова и, в итоге, к потере подвижности [21].

Для изучения антигельминтной активности на молекулярном уровне Spiegler V. et al. [39] провели транскриптомный анализ *Caenorhabditis elegans* после обработки очищенными и хорошо изученными олигомерными ПАЦ 50 % водно-этанольного экстракта листьев *Combretum mucronatum*. Это растение традиционно используется в Западной Африке для лечения гельминтозов. В результате было подтверждено, что основным местом проявления антигельминтной активности является кишечник *Caenorhabditis elegans*, за счет взаимодействия олигомерных ПАЦ с поверхностными белками кишечника. Таким образом, основной мишенью олигомерных ПАЦ являются белки кишечной мембраны, а также связанные с мембраной секретируемые ферменты и пептиды.

Williams A.R. с соавторами было показано [49], что экстракты коры корицы (*Cinnamomum verum*) обладают *in vitro* мощными антигельминтными действиями против нематоды *Ascaris suum* (A. suum) свиней. Анализ экстракта выявил высокие концентрации проантоцианидинов и транс-коричного альдегида. ПАЦ были подвергнуты тиолу и анализу ВЭЖХ-МС, который показал, что они являются исключительно процианидинами, имеют среднюю степень полимеризации 5,2 и 21 % их межфлаван-3-оловых связей являются связями А-типа. ПАЦ типа А и В в экстракте коры корицы обладают сопоставимой антигельминтной активностью с ПАЦ типа В, полученными из других растительных источников [47], и что в случае с корой корицы они, по-видимому, не отвечают за высокую активность экстракта. *In vivo* введение ежедневно в рацион свиней ПАЦ в виде целевой, инкапсулированной дозы не снижало инфицирование A. suum. Предполагается, что низкая абсорбция или метаболизм ПАЦ *in vivo* может снижать их концентрацию, достаточную для проявления эффективности *in situ*.

В эксперименте, описанном в [31], изучали антигельминтную активность ПАЦ сырой вегетативной массы многолетних бобовых культур, в зависимости от их молекулярной массы, на относительно устойчивых к ивермектину рас *Haemonchus contortus* на стадии L3. Средняя молекулярная масса ПАЦ варьировала от 552 Да у *Lespedeza stuevei* (*L. stuevei*) до 1483 Да у *Lespedeza cuneata* (*L. cuneata*). Наибольшее количество ПАЦ содержалось в *L. stuevei* (11,7 %), наименьшее у *Arachis glabrata* (*A. glabrata*) и *Leucaena retusa* (*L. retusa*) (3,3 %). На основании анализа ингибирования миграции личинок установлено, что наибольший процент ингибирования миграции личинок проявляли ПАЦ *L. retusa*, *L. stuevei* и *A. angustissima* var. *hirta* (65,4 %, 63,1 % и 42,2 % соответственно), что было эффективнее относительно ивермектина (12,5 %). Наблюдалась слабая корреляция ($r = 0,34$; $p = 0,05$) между молекулярной массой ПАЦ и процентом ингибирования миграции личинок, это свидетельствует о том, что молекулярная масса не является важным фактором, влияющим на их антигельминтную биологическую активность.

Maurer V. et al. [30] сравнивали эффективность двух альтернативных вариантов кормления ягнят, искусственно заражённых *Haemonchus contortus* (*H. contortus*), кормами с добавлением вереска (*Calluna vulgaris*) (I) и нематодофага *Duddingtonia flagrans* (*D. flagrans*) (изолят FiBL-DF-P14) (II). В течение трёх недель животные получали сено, с добавлением вереска или сено позднего укоса (экосено), в качестве контрольного корма в неограниченном количестве. Две дозы (1×10^5 и 5×10^4 колониеобразующих единиц/кг массы тела) *D. flagrans* вводили животным, получавшим каждый вид грубых кормов и сравнивали количество личинок *H. contortus*, обнаруженных в фекальных культурах, по сравнению с контрольной группой. Содержание белка, сырой клетчатки и энергии в экосене и вереске было одинаковым, но в вереске содержалось примерно в два раза больше жира, в четыре раза больше лигнина и в десять раз больше всех фракций ПАЦ. В вереске содержалось 17,3 мг ПАЦ на г сухого сырья, в то время как в экосене его количество составляло 1,7 мг/г.

В целом, вереск не оказал существенного влияния на количество яиц гельминтов в фекалиях. Добавки вереска не влияли на восстановление личинок в фекальных культурах и способность *D. flagrans* поражать *H. contortus*. По сравнению с контрольной группой, обе дозы *D. flagrans* снижали восстановление личинок на 96,2 % и 95,5 % соответственно ($p < 0,001$), без существенной разницы между дозами.

В эксперименте [37] Shepherd F. C. с соавторами установили, что добавление в корм ягнятам, инфицированным *Teladorsagia circumcincta* (*T.*

circumcincta) вереска (*Calluna vulgaris*) в концентрации 20 % от потребляемого сухого вещества, обеспечивало значительный антигельминтный эффект, что проявлялось в снижении выхода яиц *T. circumcincta* у инфицированных ягнят почти в 10 раз по сравнению с контрольной группой. Однако выявлено негативное влияние на продуктивность, так ягнята, которых кормили вереском, весили на 6 % меньше, чем ягнята, которых кормили сеном, даже на фоне увеличения сухого вещества вереска.

Не было выявлено значимой корреляции между содержанием ПАЦ и других подгрупп полифенолов в рационе и выходом яиц, это свидетельствует о том, что связь между кормлением вереском и антигельминтным эффектом не связана с количеством полифенолов напрямую. Включение в корм гриба-нематодофага *D. flagrans*, через восемь дней после начала опыта, снижали восстановление личинок в фекалиях инфицированных ягнят на 31,8 %. Уровень потребления вереска в этом исследовании не показал антагонистических эффектов на *D. flagrans*, что дает возможность использования добавок нематодофагов для смягчения антипитательных эффектов ПАЦ вереска.

В контексте ветеринарной паразитологии на основе данных, полученных по результатам 20-летнего изучения борьбы с паразитарными инфекциями, вызываемыми желудочно-кишечными нематодами у мелких жвачных животных с помощью растительных источников, содержащих танины бобовых (*Fabaceae*), Torres-Acosta J.F.J. et al. [44] были построены модели, иллюстрирующие, как «концепция нутрицевтиков» может быть распространена на другие растения, другие системы животноводства и другие паразитарные заболевания желудочно-кишечного тракта. Эта концепция открывает новые области исследований для лучшего понимания взаимодействий между хозяином, пищеварительными паразитами и окружающей средой.

Заключение

В настоящее время в животноводстве поиск альтернативных источников, проявляющих антигельминтные свойства, продиктован рядом причин, в частности, появлением лекарственно-устойчивых желудочно-кишечных и печеночных популяций гельминтов к традиционным препаратам, причем у многих видов животных и в отношении практически всех основных групп антигельминтиков. Не менее важна безопасность антигельминтиков, большинство синтетических препаратов проявляют антропогенную нагрузки на организм животного и продукцию животноводства, что неиз-

бежно отражается на её качестве и здоровье человека. Исследования по изучению использования растительных источников дубильных веществ конденсированного типа - проантоцианидинов, занимают важное место в аспекте борьбы с паразитарными болезнями сельскохозяйственных животных и улучшения питательной ценности продукции животноводства.

Большинство публикаций, проанализированных в рамках данного обзора, посвящены исследованиям выполнены *in vitro*, и по мнению ученых авторов работ необходимо расширять и переносить научный поиск по изучению антигельминтной эффективности кормовых добавок растительного сырья, экстрактов из него, и выделенных в чистом виде проантоцианидинов *in vivo*.

В рамках работы проанализировано около двухсот научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, показывающих, что на современном этапе развития животноводства исследования по изучению использования растительных источников дубильных веществ конденсированного типа как противопаразитарных средств, занимают важное место в аспекте улучшения состояния здоровья животных, а, следовательно, и питательной ценности продукции животноводства. Однако следует отметить, что в отечественной ветеринарии уделяется недостаточно внимания поиску и изучению растительных источников богатых проантоцианидинами с целью дегельминтизации сельскохозяйственных животных.

Информация о конфликте интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Информация о спонсорстве. Источник финансирования научной работы: государственное задание Министерства здравоохранения Российской Федерации, № госрегистрации 056-00034-25-02 в рамках изучения биологической активности олигомерных проантоцианидинов.

Список литературы

1. Пименов, И. А., Варламова, А. И., Афанасьев, А. Д., & Одоевская, И. М. (2024). Анализ наличия резистентности у паразитических нематод *Haemonchus contortus* к антигельминтным препаратам бензимидазольного ряда методом гнездовой изотермической амплификации (ПЦР). *Российский паразитологический журнал*, 18(2), 170–178. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2024-18-2-170-178>. EDN: <https://elibrary.ru/XOQIXI>
2. Архипов, И. А. (2009). *Антигельминтики: фармакология и применение*. Типография Россельхозакадемии. ISBN: 978-5-85941-305-8. EDN: <https://elibrary.ru/QLTSHX>

3. Демкина, О. В. (2025). Эффективность комбинированной терапии фенбендазолом и *Bacillus amyloliquefaciens* при лечении стронгилятозов лошадей. *Российский паразитологический журнал*, 19(1), 108–117. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-1-108-117>. EDN: <https://elibrary.ru/VLXZMY>
4. Жданова, О. Б., Часовских, О. В., & Успенский, А. В. (2024). Влияние экспериментальной инвазии *T. pseudospiralis* на морфологию селезёнки куриц (*Gallus domesticus*). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 167–185. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1155>. EDN: <https://elibrary.ru/IZOLXI>
5. Жученко, Н. С. (2025). Наиболее эффективные методы оценки устойчивости возбудителей паразитарных заболеваний мелких жвачных животных к антигельминтным препаратам. *Ветеринарный врач*, (1), 109–118. https://doi.org/10.33632/1998-698X_2025_1_109. EDN: <https://elibrary.ru/JOELVG>
6. Фролова, А. С., Милентьева, А. С., Федорова, А. М., Асякина, Л. К., & Просяков, А. Ю. (2024). Оценка безопасности ряда растительных метаболитов — перспективных геропротекторов в исследовании *in vivo*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 64–91. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1146>. EDN: <https://elibrary.ru/AATNBO>
7. Панова, О. А., Архипов, И. А., Баранова, М. В., & Хрусталева, А. В. (2022). Проблема антигельминтной резистентности в коневодстве. *Российский паразитологический журнал*, 16(2), 230–242. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2022-16-2-230-242>. EDN: <https://elibrary.ru/RWWNAG>
8. Кокколова, М. Л., Гаврильева, Л. Ю., Прибылых, Е. И., & Попова, Н. В. (2024). Профилактика и лечение паразитарных болезней лошадей табунного содержания в начале холодного периода в Якутии. *Ветеринария и кормление*, (2), 35–39. <https://doi.org/10.30917/attvk-1814-9588-2024-2-8>. EDN: <https://elibrary.ru/NNJJG>
9. Радионов, А. В., & Архипов, И. А. (2010). Распространение нематодозов крупного рогатого скота при разной технологии содержания в России. *Российский паразитологический журнал*, (4), 54–58. EDN: <https://elibrary.ru/NEETIV>
10. Сафиуллин, Р. Т., & Хромов, К. А. (2009). Ущерб от смешанной инвазии коров и молодняка крупного рогатого скота, вызванный фасциолами и стронгилятами пищеварительного тракта. *Российский паразитологический журнал*, (2), 81–85. EDN: <https://elibrary.ru/KVTEAZ>
11. Athanasiadou, S., Kyriazakis, I., Jackson, F., & Coop, R. L. (2001). Direct anthelmintic effects of condensed tannins towards different gastrointestinal nematodes of sheep: *in vitro* and *in vivo* studies. *Veterinary Parasitology*, 99(3), 205–219. [https://doi.org/10.1016/S0304-4017\(01\)00467-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(01)00467-8). EDN: <https://elibrary.ru/AQZYYF>

12. Athanasiadou, S., Kyriazakis, I., Jackson, F., & Coop, R. L. (2000). Effects of long-term feeding of condensed tannins to sheep infected with *Trichostrongylus colubriformis*. *International Journal of Parasitology*, 30(9), 1025–1033. [https://doi.org/10.1016/s0020-7519\(00\)00083-7](https://doi.org/10.1016/s0020-7519(00)00083-7)
13. Baltrušis, A., Claude, L., Halvarsson, P., Mikko, S., & Höglund, J. (2021). Using droplet digital PCR for the detection of *hco-acr-8b* levamisole resistance marker in *H. contortus*. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, 15, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijppdr.2021.03.002>. EDN: <https://elibrary.ru/IGZDBX>
14. Milentyeva, I. S., Fedorova, A. M., Larichev, T. A., & Altschuler, O. G. (2023). Biologically active compounds in *Scutellaria baicalensis* L. callus extract: Phytochemical analysis and isolation. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 172–186. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-564>. EDN: <https://elibrary.ru/GYXRTF>
15. Brunet, S., Jackson, F., & Hoste, H. (2008). Effect of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) extract and condensed tannin monomers on the association of abomasum nematode larvae with fundic explants. *International Journal for Parasitology*, 38(7), 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2007.10.018>
16. Butter, N. L., Dawson, J. M., Wakelin, D., & Buttery, J. (2001). Effects of dietary concentrated tannins on gastrointestinal nematodes. *The Journal of Agricultural Science*, 137(4), 461–469. <https://doi.org/10.1017/S0021859601001605>. EDN: <https://elibrary.ru/EBWSJN>
17. Castañeda-Ramirez, G. S., Torres-Acosta, J. F., Sandoval-Castro, C. A., González-Pech, G., Parra-Tabla, V. E., & Mathieu, C. (2017). Is there a negative association between condensed tannin, total phenolic, and total tannin contents of tropical plant extracts and *in vitro* anthelmintic activity against *Haemonchus contortus* eggs? *Parasitology Research*, 116(12), 3341–3348. <https://doi.org/10.1007/s00436-017-5650-4>. EDN: <https://elibrary.ru/MSPDIW>
18. Chylinski, K., Athanasiadou, S., Thuer, S., Grovermann, S., Moux, S., Hoste, H., Petkevicius, S., Verver, S., Verkaik, J., & Wern, S. (2023). Reducing anthelmintic inputs in organic farming: Are smallholder ruminant farmers implementing alternative strategies to control gastrointestinal nematodes? *Veterinary Parasitology*, 315, Article 109864. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2022.109864>. EDN: <https://elibrary.ru/CGGVSC>
19. Debela, E., Tolerō, A., Quick, L. O., & Salty, R. (2012). Condensed tannins from *Sesbania sesban* and *Desmodium intortum* as a control agent for *Haemonchus contortus* in goats. *Tropical Animal Health and Production*, 44(8), 1939–1944. <https://doi.org/10.1007/s11250-012-0160-y>. EDN: <https://elibrary.ru/TRVCXA>
20. Fracelli, C., Zanzani, S. A., Gazzonis, A. L., Rizzi, R., & Manfredi, M. T. (2015). Effect of condensed tannin on natural coccidiosis infection in kids. *Small Ruminant Research*, 126(Suppl. 1), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.01>

21. Greiffer, L., Liebau, E., Herrmann, F. K., & Spiegler, V. (2022). Condensed tannins act as anthelmintics by increasing the rigidity of the nematode cuticle. *Scientific Reports*, 12(1), Article 18850. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23566-2>. EDN: <https://elibrary.ru/GSHBGU>
22. Heckendorn, F., Hering, D. A., Maurer, W., Zinsstag, J., Langhans, W., & Herzberg, H. (2006). Effects of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) silage and hay on established populations of *Haemonchus contortus* and *Cooperia curticei* in lambs. *Veterinary Parasitology*, 142(3–4), 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.07.014>
23. Jamo, J., Norman, E., Dua Boakye, Y., Oppong Beko, E., Oppong Beko e S., Asari-Nkansah, S., Spiegler, W., Hensel, A., Libau, E., & Agyare, K. (2022). Anthelmintic agents from African medicinal plants: A review and prospects. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, Article 8023866. <https://doi.org/10.1155/2022/8023866>
24. Joó, K., Trúszsi, R. L., Kálmán, C. Z., Ács, V., Jakab, S., Bába, A., et al. (2022). Evaluation of risk factors affecting strongylid egg shedding on Hungarian horse farms. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, 27, Article 100663. <https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2021.100663>. EDN: <https://elibrary.ru/XSMEZW>
25. Kaplan, R. M., Denwood, M. J., Nielsen, M. K., Thamsborg, S. M., Torgerson, P. R., Gilleard, J. S., Dobson, R. J., Vercruysse, J., & Levecke, B. (2023). World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology (W.A.A.V.P.) guideline for diagnosing anthelmintic resistance using the faecal egg count reduction test in ruminants, horses and swine. *Veterinary Parasitology*, Article 109936. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2023.109936>. EDN: <https://elibrary.ru/DXMTVK>
26. Kongsiriwet, K., Quijada, J., Williams, A. R., Mueller-Harvey, I., Williamson, E. M., & Hoste, H. (2015). Synergistic inhibition of *Haemonchus contortus* exfoliation by flavonoid monomers and condensed tannins. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, 5(3), 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2015.06.001>
27. Kotiloglu, D., Acet, T., & Ozcan, K. (2020). Phytochemical profile and biological activity of a therapeutic orchid from Anatolia: *Dactylorhiza romana* subsp. *Georgica*. *Food Measure*, 14, 3310–3318. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00566-2>. EDN: <https://elibrary.ru/EWNOGJ>
28. Kotze, A. C., Gilleard, J. S., Doyle, S. R., & Prichard, R. K. (2020). Challenges and opportunities for the adoption of molecular diagnostics for anthelmintic resistance. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, 14, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2020.11.005>. EDN: <https://elibrary.ru/DHHDJD>
29. Mahesh, M. S., & Vinod Kumar Yata (Eds.). (2024). *Feed additives and supplements for ruminants*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-0794-2>

30. Maurer, V., Holinger, M., Oberhensli, T., Thuer, S., Wern, S., Shepherd, F., & Athanasiadou, S. (2022). Heather (*Calluna vulgaris*) supplementation does not reduce the trapping capacity of *Duddingtonia flagrans* in the faeces of *Haemonchus contortus*-infected lambs. *Veterinary Parasitology*, 302, Article 109661. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2022.109661>. EDN: <https://elibrary.ru/KFCFEI>
31. Naumann, G. D., Armstrong, S. A., Lambert, B. D., Muir, J., Tedeschi, L. O., & Kottmann, M. M. (2014). Effect of molecular weight and concentration of legume condensed tannins on the inhibition of *Haemonchus contortus* larval migration *in vitro*. *Veterinary Parasitology*, 199(1–2), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.09.025>
32. Novobelsky, A., Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2011). Condensed tannins are effective against nematodes in cattle. *Veterinary Parasitology*, 182(2–4), 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2011.06.003>
33. Pathak, A. K., Datta, N., Banerjee, S., Goswami, T. K., & Sharma, K. (2016). Effect of condensed tannin supplementation through leaf meal mixture on voluntary feed intake, immune response and worm load in sheep infected with *Haemonchus contortus*. *Journal of Parasitic Diseases*, 40(1), 100–105. <https://doi.org/10.1007/s12639-014-0455-1>. EDN: <https://elibrary.ru/KYQGFL>
34. Pathak, A. K., Dutta Narayan, Banerjee, P. S., Pattanaik, A. K., & Sharma, K. (2013). Influence of dietary supplementation of condensed tannins through leaf meal mixture on intake, nutrient utilization and performance of *Haemonchus contortus*-infected sheep. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences (AJAS)*, 26(10), 1446–1458. <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13066>
35. Porter, L. D. (1988). Flavens and proanthocyanidins. In D. B. Harborne (Ed.), *Flavonoids* (pp. 21–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2913-6_2
36. Shea, E., Trofimou, J. A., & Constabel, S. (2017). An improved butanol-HCl assay for the quantitative determination of water-soluble, acetone:methanol-soluble, and insoluble proanthocyanidins (condensed tannins). *Plant Methods*, 13, Article 63. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0213-3>. EDN: <https://elibrary.ru/ALSBSQ>
37. Shepherd, F., Houdijk, J. G., Hylinski, S., Hutchings, M. R., Kelly, R. F., Macrae, A., Maurer, V., Salminen, J., Engström, M. T., & Athanasiadou, S. (2024). Feeding heather (*Calluna vulgaris*) to *Teladorsagia circumcincta*-infected lambs reduces parasitism but may have detrimental effects on performance. *Veterinary Parasitology*, 303, Article 106066. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2024.106066>
38. Spiegler, V. (2020). Anthelmintic A-type procyanidins and further characterization of the phenolic composition of *Paullinia pinnata* root extract. *Molecules*, 25(10), Article 2287. <https://doi.org/10.3390/molecules25102287>. EDN: <https://elibrary.ru/BBDEBO>

39. Spiegler, V., Hensel, A., Seggewiss, J., Lubisch, M., & Liebau, E. (2017). Transcriptome analysis reveals molecular anthelmintic effects of procyanidins in *C. elegans*. *Public Library of Science ONE*, 12(9), Article e0184656. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184656>
40. Spiegler, V., Sendker, J., Petereit, F., Liebau, E., & Hensel, A. (2015). Fractionation of a *Combretum mucronatum* leaf extract with anthelmintic activity: Oligomeric procyanidins as active principle. *Molecules*, 20(8), 14810–14832. <https://doi.org/10.3390/molecules200814810>
41. Spiegler, W., Liebau, E., Peppler, K., Raue, K., Wern, S., Strube, K., Heckenborn, F., Aguiare, K., Stark, T., Hofmann, T., & Hensel, A. (2016). Hydroalcoholic extract from the roots of *Paullinia pinnata* L. has anthelmintic activity against free-living and parasitic nematodes. *Planta Medica*, 82, 1173–1179. <https://doi.org/10.1055/s-0042-108209>
42. Tibe, O., Sutherland, I. A., Lesperance, L., & Harding, D. R. K. (2013). Effects of purified condensed tannins from forage plants from Botswana on free-living stages of gastrointestinal nematode parasites in livestock. *Veterinary Parasitology*, 197(1–2), 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.07.004>
43. Tong, Z., He, W., Fan, H., & Guo, A. (2022). Biological function of plant tannin and its application in animal health. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, Article 803657. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.803657>. EDN: <https://elibrary.ru/ACJQEF>
44. Torres-Acosta, J. F. J., Sandoval-Castro, C. A., Muller-Harvey, I., Sotiraki, S., Luvandini, H., Tamsborg, S. M., & Terrill, T. H. (2015). Tannin-containing legumes as a model for nutraceuticals against digestive parasites in livestock. *Veterinary Parasitology*, 212(1–2), 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2015.06.026>
45. Wang, Y., McAllister, T. A., & Acharya, S. (2015). Condensed tannins in sainfoin: Composition, concentration and effect on nutritional and forage value of sainfoin forage. *Crop Science*, 55(1), 13–22. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.07.0489>
46. Werner, S., Isensee, A., Maurer, W., Perler, E., Dreweck, A., & Heckendorn, F. (2013). Integrated control of gastrointestinal nematodes in lambs using bioactive feed×breed approach. *Veterinary Parasitology*, 198(3–4), 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.09.021>
47. Williams, A. R., Friganas, S., Ramsay, A., Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2014). Direct anthelmintic activity of condensed tannins from different plant sources against *Ascaris suum*. *PLoS ONE*, 9(5), Article e97053. Erratum in *PLoS ONE*, 2014, 9(6), Article e99738. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097053>
48. Williams, A. R., Ropiak, H. M., Friganas, S., Desruys, O., Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2014). Evaluation of the anthelmintic activity of medicinal plant extracts and purified condensed tannins against free-living and parasitic stages

- of *Oesophagostomum dentatum*. *Parasite Vectors*, 7(1), Article 518. <https://doi.org/10.1186/s13071-014-0518-2>. EDN: <https://elibrary.ru/PHCREI>
49. Williams, A. R., Ramsay, A., Hansen, T. W., Ropiak, H. M., Meyer, H., Neusum, Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2015). Anthelmintic activity of trans-cinnamic aldehyde and A- and B-type proanthocyanidins from cinnamon (*Cinnamomum verum*). *Scientific Reports*, 5, Article 14791. <https://doi.org/10.1038/srep14791>
50. Zafar, I., Sarwar, M., Jabbar, A., Ahmed, Sh., Nisa, M., Sohail Sajid, M., Nisar Khan, M., Aftab Mufti, K., & Yasin, M. (2007). Direct and indirect anthelmintic action of condensed tannins on sheep. *Veterinary Parasitology*, 144(1–2), 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.09.035>

References

1. Pimenov, I. A., Varlamova, A. I., Afanasyev, A. D., & Odoevskaya, I. M. (2024). Analysis of resistance in parasitic nematodes *Haemonchus contortus* to benzimidazole anthelmintic drugs using loop isothermal amplification (PCR). *Russian Journal of Parasitology*, 18(2), 170–178. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2024-18-2-170-178>. EDN: <https://elibrary.ru/XOQIXI>
2. Arkhipov, I. A. (2009). *Anthelmintics: Pharmacology and application*. Typography of the Russian Academy of Agricultural Sciences. ISBN: 978-5-85941-305-8. EDN: <https://elibrary.ru/QLTSHX>
3. Demkina, O. V. (2025). Efficacy of combined therapy with fenbendazole and *Bacillus amyloliquefaciens* in the treatment of strongylatosis in horses. *Russian Journal of Parasitology*, 19(1), 108–117. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-1-108-117>. EDN: <https://elibrary.ru/VLXZMY>
4. Zhdanova, O. B., Chasovskikh, O. V., & Uspensky, A. V. (2024). The effect of experimental *T. pseudospiralis* invasion on the spleen morphology of chickens (*Gallus domesticus*). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 167–185. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1155>. EDN: <https://elibrary.ru/IZOLXI>
5. Zhuchenko, N. S. (2025). The most effective methods for assessing the resistance of parasitic disease agents in small ruminants to anthelmintic drugs. *Veterinary Doctor*, (1), 109–118. https://doi.org/10.33632/1998-698X_2025_1_109. EDN: <https://elibrary.ru/JOELVG>
6. Frolova, A. S., Milentyeva, A. S., Fedorova, A. M., Asyakina, L. K., & Prosekov, A. Yu. (2024). Safety assessment of several plant metabolites — promising geroprotectors in an *in vivo* study. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(3), 64–91. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-1146>. EDN: <https://elibrary.ru/AATNBO>
7. Panova, O. A., Arkhipov, I. A., Baranova, M. V., & Khrustalev, A. V. (2022). The problem of anthelmintic resistance in horse breeding. *Russian Journal of Parasitol-*

- ogy, 16(2), 230–242. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2022-16-2-230-242>. EDN: <https://elibrary.ru/RWWNAG>
8. Kokolova, M. L., Gavrilieva, L. Yu., Pribylykh, E. I., & Popova, N. V. (2024). Prevention and treatment of parasitic diseases in herd horses at the beginning of the cold season in Yakutia. *Veterinary Medicine and Feeding*, (2), 35–39. <https://doi.org/10.30917/attvk-1814-9588-2024-2-8>. EDN: <https://elibrary.ru/NNOJJG>
 9. Radionov, A. V., & Arkhipov, I. A. (2010). Distribution of nematodoses in cattle under different housing technologies in Russia. *Russian Journal of Parasitology*, (4), 54–58. EDN: <https://elibrary.ru/NEETIV>
 10. Safiullin, R. T., & Khromov, K. A. (2009). Damage caused by mixed invasion in cows and young cattle due to fascioliasis and digestive tract strongylates. *Russian Journal of Parasitology*, (2), 81–85. EDN: <https://elibrary.ru/KVTEAZ>
 11. Athanasiadou, S., Kyriazakis, I., Jackson, F., & Coop, R. L. (2001). Direct anthelmintic effects of condensed tannins towards different gastrointestinal nematodes of sheep: *in vitro* and *in vivo* studies. *Veterinary Parasitology*, 99(3), 205–219. [https://doi.org/10.1016/S0304-4017\(01\)00467-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(01)00467-8). EDN: <https://elibrary.ru/AQZYFF>
 12. Athanasiadou, S., Kyriazakis, I., Jackson, F., & Coop, R. L. (2000). Effects of long-term feeding of condensed tannins to sheep infected with *Trichostrongylus colubriformis*. *International Journal of Parasitology*, 30(9), 1025–1033. [https://doi.org/10.1016/S0020-7519\(00\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7519(00)00083-7)
 13. Baltrušis, A., Claude, L., Halvarsson, P., Mikko, S., & Höglund, J. (2021). Using droplet digital PCR for the detection of *hco-acr-8b* levamisole resistance marker in *H. contortus*. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, 15, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2021.03.002>. EDN: <https://elibrary.ru/IGZDBX>
 14. Milentyeva, I. S., Fedorova, A. M., Larichev, T. A., & Altshuler, O. G. (2023). Biologically active compounds in *Scutellaria baicalensis* L. callus extract: Phytochemical analysis and isolation. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 172–186. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-564>. EDN: <https://elibrary.ru/GYXRFT>
 15. Brunet, S., Jackson, F., & Hoste, H. (2008). Effect of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) extract and condensed tannin monomers on the association of abomasum nematode larvae with fundic explants. *International Journal for Parasitology*, 38(7), 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2007.10.018>
 16. Butter, N. L., Dawson, J. M., Wakelin, D., & Buttery, J. (2001). Effects of dietary concentrated tannins on gastrointestinal nematodes. *The Journal of Agricultural Science*, 137(4), 461–469. <https://doi.org/10.1017/S0021859601001605>. EDN: <https://elibrary.ru/EBWSJN>
 17. Castañeda-Ramirez, G. S., Torres-Acosta, J. F., Sandoval-Castro, C. A., González-Pech, G., Parra-Tabla, V. E., & Mathieu, C. (2017). Is there a negative

- association between condensed tannin, total phenolic, and total tannin contents of tropical plant extracts and *in vitro* anthelmintic activity against *Haemonchus contortus* eggs? *Parasitology Research*, 116(12), 3341–3348. <https://doi.org/10.1007/s00436-017-5650-4>. EDN: <https://elibrary.ru/MSPDIW>
18. Chylinski, K., Athanasiadou, S., Thuer, S., Grovermann, S., Moux, S., Hoste, H., Petkevicius, S., Verver, S., Verkaik, J., & Wern, S. (2023). Reducing anthelmintic inputs in organic farming: Are smallholder ruminant farmers implementing alternative strategies to control gastrointestinal nematodes? *Veterinary Parasitology*, 315, Article 109864. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2022.109864>. EDN: <https://elibrary.ru/CGGVSC>
 19. Debela, E., Tolerō, A., Quick, L. O., & Salty, R. (2012). Condensed tannins from *Sesbania sesban* and *Desmodium intortum* as a control agent for *Haemonchus contortus* in goats. *Tropical Animal Health and Production*, 44(8), 1939–1944. <https://doi.org/10.1007/s11250-012-0160-y>. EDN: <https://elibrary.ru/TRVCXA>
 20. Fraccelli, C., Zanzani, S. A., Gazzonis, A. L., Rizzi, R., & Manfredi, M. T. (2015). Effect of condensed tannin on natural coccidiosis infection in kids. *Small Ruminant Research*, 126(Suppl. 1), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.01>
 21. Greiffer, L., Liebau, E., Herrmann, F. K., & Spiegler, V. (2022). Condensed tannins act as anthelmintics by increasing the rigidity of the nematode cuticle. *Scientific Reports*, 12(1), Article 18850. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23566-2>. EDN: <https://elibrary.ru/GSHBGU>
 22. Heckendorn, F., Hering, D. A., Maurer, W., Zinsstag, J., Langhans, W., & Herzberg, H. (2006). Effects of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) silage and hay on established populations of *Haemonchus contortus* and *Cooperia curticei* in lambs. *Veterinary Parasitology*, 142(3–4), 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.07.014>
 23. Jamo, J., Norman, E., Dua Boakye, Y., Oppong Beko, E., Oppong Beko e S., Asari-Nkansah, S., Spiegler, W., Hensel, A., Libau, E., & Agyare, K. (2022). Anthelmintic agents from African medicinal plants: A review and prospects. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, Article 8023866. <https://doi.org/10.1155/2022/8023866>
 24. Joó, K., Trüzsi, R. L., Kálmán, C. Z., Ács, V., Jakab, S., Bába, A., et al. (2022). Evaluation of risk factors affecting strongylid egg shedding on Hungarian horse farms. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, 27, Article 100663. <https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2021.100663>. EDN: <https://elibrary.ru/XSMEZW>
 25. Kaplan, R. M., Denwood, M. J., Nielsen, M. K., Thamsborg, S. M., Torgerson, P. R., Gilleard, J. S., Dobson, R. J., Vercruysse, J., & Levecke, B. (2023). World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology (W.A.A.V.P.) guideline for diagnosing anthelmintic resistance using the faecal egg count reduction test in

- ruminants, horses and swine. *Veterinary Parasitology*, Article 109936. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2023.109936>. EDN: <https://elibrary.ru/DXMVTK>
26. Kongsiriwet, K., Quijada, J., Williams, A. R., Mueller-Harvey, I., Williamson, E. M., & Hoste, H. (2015). Synergistic inhibition of *Haemonchus contortus* exfoliation by flavonoid monomers and condensed tannins. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, 5(3), 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijpd-dr.2015.06.001>
27. Kotiloglu, D., Acet, T., & Ozcan, K. (2020). Phytochemical profile and biological activity of a therapeutic orchid from Anatolia: *Dactylorhiza romana* subsp. *Georgica*. *Food Measure*, 14, 3310–3318. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00566-2>. EDN: <https://elibrary.ru/EWNOGJ>
28. Kotze, A. C., Gilleard, J. S., Doyle, S. R., & Prichard, R. K. (2020). Challenges and opportunities for the adoption of molecular diagnostics for anthelmintic resistance. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, 14, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2020.11.005>. EDN: <https://elibrary.ru/DHHDJD>
29. Mahesh, M. S., & Vinod Kumar Yata (Eds.). (2024). *Feed additives and supplements for ruminants*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-0794-2>
30. Maurer, V., Holinger, M., Oberhensli, T., Thuer, S., Wern, S., Shepherd, F., & Athanasiadou, S. (2022). Heather (*Calluna vulgaris*) supplementation does not reduce the trapping capacity of *Duddingtonia flagrans* in the faeces of *Haemonchus contortus*-infected lambs. *Veterinary Parasitology*, 302, Article 109661. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2022.109661>. EDN: <https://elibrary.ru/KFCFEI>
31. Naumann, G. D., Armstrong, S. A., Lambert, B. D., Muir, J., Tedeschi, L. O., & Kottmann, M. M. (2014). Effect of molecular weight and concentration of legume condensed tannins on the inhibition of *Haemonchus contortus* larval migration *in vitro*. *Veterinary Parasitology*, 199(1–2), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.09.025>
32. Novobelsky, A., Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2011). Condensed tannins are effective against nematodes in cattle. *Veterinary Parasitology*, 182(2–4), 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2011.06.003>
33. Pathak, A. K., Datta, N., Banerjee, S., Goswami, T. K., & Sharma, K. (2016). Effect of condensed tannin supplementation through leaf meal mixture on voluntary feed intake, immune response and worm load in sheep infected with *Haemonchus contortus*. *Journal of Parasitic Diseases*, 40(1), 100–105. <https://doi.org/10.1007/s12639-014-0455-1>. EDN: <https://elibrary.ru/KYQGFL>
34. Pathak, A. K., Dutta Narayan, Banerjee, P. S., Pattanaik, A. K., & Sharma, K. (2013). Influence of dietary supplementation of condensed tannins through leaf meal mixture

- on intake, nutrient utilization and performance of *Haemonchus contortus*-infected sheep. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences (AJAS)*, 26(10), 1446–1458. <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13066>
35. Porter, L. D. (1988). Flavens and proanthocyanidins. In D. B. Harborne (Ed.), *Flavonoids* (pp. 21–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2913-6_2
36. Shea, E., Trofimou, J. A., & Constabel, S. (2017). An improved butanol-HCl assay for the quantitative determination of water-soluble, acetone:methanol-soluble, and insoluble proanthocyanidins (condensed tannins). *Plant Methods*, 13, Article 63. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0213-3>. EDN: <https://elibrary.ru/ALSBSQ>
37. Shepherd, F., Houdijk, J. G., Hylinski, S., Hutchings, M. R., Kelly, R. F., Macrae, A., Maurer, V., Salminen, J., Engström, M. T., & Athanasiadou, S. (2024). Feeding heather (*Calluna vulgaris*) to *Teladorsagia circumcincta*-infected lambs reduces parasitism but may have detrimental effects on performance. *Veterinary Parasitology*, 303, Article 106066. <https://doi.org/10.1016/j.tvj.2024.106066>
38. Spiegler, V. (2020). Anthelmintic A-type procyanidins and further characterization of the phenolic composition of *Paullinia pinnata* root extract. *Molecules*, 25(10), Article 2287. <https://doi.org/10.3390/molecules25102287>. EDN: <https://elibrary.ru/BBDEBO>
39. Spiegler, V., Hensel, A., Seggewiss, J., Lubisch, M., & Liebau, E. (2017). Transcriptome analysis reveals molecular anthelmintic effects of procyanidins in *C. elegans*. *Public Library of Science ONE*, 12(9), Article e0184656. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184656>
40. Spiegler, V., Sendker, J., Petereit, F., Liebau, E., & Hensel, A. (2015). Fractionation of a *Combretum mucronatum* leaf extract with anthelmintic activity: Oligomeric procyanidins as active principle. *Molecules*, 20(8), 14810–14832. <https://doi.org/10.3390/molecules200814810>
41. Spiegler, W., Liebau, E., Peppler, K., Raue, K., Wern, S., Strube, K., Hecken-dorn, F., Aguiare, K., Stark, T., Hofmann, T., & Hensel, A. (2016). Hydroalcoholic extract from the roots of *Paullinia pinnata* L. has anthelmintic activity against free-living and parasitic nematodes. *Planta Medica*, 82, 1173–1179. <https://doi.org/10.1055/s-0042-108209>
42. Tibe, O., Sutherland, I. A., Lesperance, L., & Harding, D. R. K. (2013). Effects of purified condensed tannins from forage plants from Botswana on free-living stages of gastrointestinal nematode parasites in livestock. *Veterinary Parasitology*, 197(1–2), 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.07.004>
43. Tong, Z., He, W., Fan, H., & Guo, A. (2022). Biological function of plant tannin and its application in animal health. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, Article 803657. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.803657>. EDN: <https://elibrary.ru/ACJQEF>

44. Torres-Acosta, J. F. J., Sandoval-Castro, C. A., Muller-Harvey, I., Sotiraki, S., Lu-vandini, H., Tamsborg, S. M., & Terrill, T. H. (2015). Tannin-containing legumes as a model for nutraceuticals against digestive parasites in livestock. *Veterinary Parasitology*, 212(1–2), 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2015.06.026>
45. Wang, Y., McAllister, T. A., & Acharya, S. (2015). Condensed tannins in sainfoin: Composition, concentration and effect on nutritional and forage value of sainfoin forage. *Crop Science*, 55(1), 13–22. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.07.0489>
46. Werner, S., Isensee, A., Maurer, W., Perler, E., Dreweck, A., & Heckendorn, F. (2013). Integrated control of gastrointestinal nematodes in lambs using bioactive feed×breed approach. *Veterinary Parasitology*, 198(3–4), 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.09.021>
47. Williams, A. R., Friganas, S., Ramsay, A., Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2014). Direct anthelmintic activity of condensed tannins from different plant sources against *Ascaris suum*. *PLoS ONE*, 9(5), Article e97053. Erratum in *PLoS ONE*, 2014, 9(6), Article e99738. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097053>
48. Williams, A. R., Ropiak, H. M., Friganas, S., Desruys, O., Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2014). Evaluation of the anthelmintic activity of medicinal plant extracts and purified condensed tannins against free-living and parasitic stages of *Oesophagostomum dentatum*. *Parasite Vectors*, 7(1), Article 518. <https://doi.org/10.1186/s13071-014-0518-2>. EDN: <https://elibrary.ru/PHCREI>
49. Williams, A. R., Ramsay, A., Hansen, T. W., Ropiak, H. M., Meyer, H., Neusum, Müller-Harvey, I., & Tamsborg, S. M. (2015). Anthelmintic activity of trans-cinnamic aldehyde and A- and B-type proanthocyanidins from cinnamon (*Cinnamomum verum*). *Scientific Reports*, 5, Article 14791. <https://doi.org/10.1038/srep14791>
50. Zafar, I., Sarwar, M., Jabbar, A., Ahmed, Sh., Nisa, M., Sohail Sajid, M., Nisar Khan, M., Aftab Mufti, K., & Yasin, M. (2007). Direct and indirect anthelmintic action of condensed tannins on sheep. *Veterinary Parasitology*, 144(1–2), 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.09.035>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Мальцева Елена Михайловна, кандидат фармацевтических наук, доцент, заведующий кафедрой фармацевтической и общей химии
ФГБОУ ВО КемГМУ Минздрава России
ул. Ворошилова, 22А, г. Кемерово, 650056, Российская Федерация
elen-malceva@yandex.ru

Пинчук Людмила Григорьевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры фармацевтической и общей химии

*ФГБОУ ВО КемГМУ Минздрава России
ул. Ворошилова, 22А, г. Кемерово, 650056, Российская Федерация
Ludmilapinchuk@mail.ru*

Акбаев Рамазан Магаметович, кандидат ветеринарных наук, доцент, доцент кафедры паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы
*ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина
ул. Академика Скрябина, 23, г. Москва, 109472, Российская Федерация
acbay@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena M. Maltseva, Candidate of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor, Chair of the Department of Pharmaceutical and General Chemistry
*Kemerovo State Medical University
22A, Voroshilova Str., Kemerovo, 650056, Russian Federation
elen-malceva@yandex.ru*

Lyudmila G. Pinchuk, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor in the Department of Pharmaceutical and General Chemistry
*Kemerovo State Medical University
22A, Voroshilova Str., Kemerovo, 650056, Russian Federation
Ludmilapinchuk@mail.ru*

Ramazan M. Akbaev, Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Parasitology and Veterinary and Sanitary Expertise
*Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA named after K.I. Skryabin
23, Akademik Skryabin Str., Moscow, 109472, Russian Federation
acbay@yandex.ru*

Поступила 20.06.2025

После рецензирования 01.08.2025

Принята 05.08.2025

Received 20.06.2025

Revised 01.08.2025

Accepted 05.08.2025

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385)

EDN: [SVWRIV](https://www.edn.ru/SVWRIV)

УДК 639.64:57.081.22



Иммуномоделирующие свойства полисахаридов макроводорослей Балтийского моря

Е.В. Ульрих¹, О.А. Новожилов¹, С.В. Агафонова¹, Е.С. Землякова¹,
Н.Ю. Ключко¹, А.Х. Обрегон², А.В. Качанова¹, О.С. Федорова¹

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Российская Федерация

²Перуанский технологический университет, Лима, Перу

Аннотация

Обоснование. Физиологические свойства биологически активных полисахаридов макроводорослей чрезвычайно разнообразны. Ценными биологически активными свойствами полисахаридов макроводорослей является противовоспалительные и иммуномоделирующие свойства.

Цель. Изучить иммуномоделирующую способность полисахаридов макроводорослей Балтийского моря – *Fucus vesiculosus* и *Furcellaria lumbrifera*.

Материалы и методы. Пробы водорослей *Furcellaria lumbricalis* и *Fucus vesiculosus* отбирались на побережье Балтийского моря в период с 01 по 30 апреля 2025 года (Куршский залив, Калининградская область, Россия), сушилась на воздухе, досушивалась при 40°C в сушильном шкафу и измельчались.

Экстракция проводилась с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. После завершения экстракции горячий раствор отфильтровывался под вакуумом через марлю. К жидкой фазе экстракта добавлялся ледяной изопропиловый спирт для осаждения полисахаридов, которые высушивались в сушильном шкафу.

Противовоспалительные свойства эндо- и экзополисахаридов определялись методом, основанном на применении твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА) с применением иммуноферментного анализатора Mindray MR-96A. Противовоспалительные свойства оценивались с применением цитокинов ИЛ-1β и ФНО-α. Для определения содержания ИЛ-1β использовалось на лунку для каждого образца по 20 мкл супернатанта и 80 мкл питательной среды RPMI-1640, для

определения содержания ФНО- α использовалось на лунку для каждого образца по 100 мкл супернатанта.

Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета прикладных программ Statistica 7.0 (StatSoft, USA).

Результаты. Определено, что полисахариды Фукус-Г, Фукус-М, Фукус-Д и Фукус-Б, выделенные из макроводорослей *F. vesiculosus*, ингибировали продукцию провоспалительного цитокина ИЛ-1 β в сравнении с отрицательным контролем. Пониженное содержание цитокинов ИЛ-1 β для *F. vesiculosus* составило 350,74 $\pm$ 14,49, 402,69 $\pm$ 14,22, 402,12 $\pm$ 21,48 и 401,78 $\pm$ 19,82 пг/мл соответственно. Наибольшее количество цитокинов для *F. vesiculosus* продуцировали образцы полисахаридов Фукус-А, Фукус-Э и Фукус-В (420,36 $\pm$ 21,01, 414,69 $\pm$ 20,80 и 415,78 $\pm$ 19,95 пг/мл, соответственно). Для макроводоросли *F. lumbrifera* ингибировали выработку цитокинов образцы полисахаридов Фурц-Г, Фурц-Э, Фурц-М, Фурц-В и Фурц-Б (402,26 $\pm$ 19,77, 403,03 $\pm$ 21,14, 409,65 $\pm$ 20,95, 402,65 $\pm$ 20,61 и 401,33 $\pm$ 19,82 пг/мл, соответственно). Установлено, что образцы полисахаридов Фурц-А и Фурц-Д для макроводорослей *F. lumbrifera* продуцируют наибольшее количество цитокинов ИЛ-1 β (419,37 $\pm$ 20,59 и 421,47 $\pm$ 19,82 пг/мл, соответственно). Показано, что изучаемые образцы полисахаридов характеризовались отсутствием статистически значимого ингибирующего или стимулирующего эффекта на выработку цитокина ФНО- α в реакционной среде моноклеарами после их добавления в концентрации 20 мкг/мл. Установлено, что в присутствии образцов Фукус-А и Фукус-Э, Фурц-А и Фурц-Э содержание цитокинов ФНО- α наибольшее и составило 36,87 $\pm$ 1,89, 32,81 $\pm$ 1,94, 35,19 $\pm$ 0,15 и 32,51 $\pm$ 1,91 пг/мл, соответственно. Содержание же цитокина ФНО- α при использовании образцов полисахаридов Фукус-М и Фукус-В практически не изменилось по сравнению с отрицательным контролем.

Заключение. Таким образом выявлено, что образцы полисахаридов, выделенных из макроводорослей, они проявляют противовоспалительный эффект и могут быть рекомендованы в качестве ингредиента или фармацевтической субстанции в производстве биологически активных добавок или лекарственных препаратов иммуномодулирующего и противовоспалительного действия.

Ключевые слова: макроводоросли; иммуномодулирующие свойства; провоспалительные цитокины; полисахариды; экстрагент

Для цитирования. Ульрих, Е. В., Новожилов, О. А., Агафонова, С. В., Землякова, Е. С., Ключко, Н. Ю., Обрегон, А.Х., & Качанова, А. В., Федорова О. С. (2026). Иммуномоделирующие свойства полисахаридов макроводорослей Балтийского моря. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 524–540. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385>

Immunomodulatory properties of polysaccharides from Baltic Sea macroalgae

E.V. Ulrikh¹, O.A. Novozhilov¹, S.V. Agafonova¹, E.S. Zemlyakova¹,
N.Yu. Klyuchko¹, A.J. Obregón-La Rosa², A.V. Kachanova¹, O.S. Fedorova¹

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

²Peruvian Technological University, Lima, Peru

Abstract

Background. The physiological properties of biologically active polysaccharides in macroalgae are extremely diverse. Macroalgae polysaccharides have valuable anti-inflammatory and immunomodulating properties.

Purpose. To study the immunomodulating ability of the polysaccharides of macroalgae of the Baltic Sea – *Fucus vesiculosus* и *Furcellaria lumbrifera*.

Materials and methods. Samples of algae *Furcellaria lumbricalis* and *Fucus vesiculosus* were collected on the coast of the Baltic Sea in the period from April 01 to April 30, 2025 (Curonian Bay, Kaliningrad region, Russia), air-dried, finished drying at 40°C in a desiccator, and crushed.

The extraction was performed using dilute mineral acids, an alkali, and water. After extraction was complete, the hot solution was filtered under vacuum through gauze. Then, ice-cold isopropyl alcohol was added to the liquid phase of the extract to precipitate the polysaccharides, which were subsequently dried in a desiccator.

The anti-inflammatory properties of endo- and exopolysaccharides were determined using a solid-phase enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) method with a Mindray MR-96A ELISA analyzer. The anti-inflammatory properties were evaluated using the cytokines IL-1 β and TNF- α . Twenty microliters of supernatant and 80 μ L of RPMI-1640 nutrient medium were used per well for each sample to determine IL-1 β content. To determine TNF- α content, 100 microliters of supernatant were used per well for each sample.

The Statistica 7.0 application program package (StatSoft, USA) was used for statistical processing of the data.

Results. Polysaccharides Fucus-G, Fucus-M, Fucus-D, and Fucus-B, which were isolated from the macroalgae *F. vesiculosus*, were found to inhibit the production of the proinflammatory cytokine IL-1 β compared to the negative control. The IL-1 β content decreased to 350.74 $\pm$ 14.49, 402.69 $\pm$ 14.22, 402.12 $\pm$ 21.48, and 401.78 $\pm$ 19.82 pg/mL, respectively, for *F. vesiculosus*. The highest amount of cytokines for *F. vesiculosus* was produced by Fucus-A, Fucus-E and Fucus-B polysaccharide samples (420.36 $\pm$ 21.01, 414.69 $\pm$ 20.80 and 415.78 $\pm$ 19.95 pg/mL, respectively). For the macroalgae *F. lumbrifera*,

the polysaccharide samples Furcus-G, Furcus-E, Furcus-M, Furcus-B and Furcus-B inhibited cytokine production (402.26 ± 19.77 , 403.03 ± 21.14 , 409.65 ± 20.95 , 402.65 ± 20.61 and 401.33 ± 19.82 pg/mL, respectively). It was found that Furz-A and Furz-D polysaccharide samples for *F. lumbrifera* macroinvertebrates produced the highest amount of IL-1 β cytokines (419.37 ± 20.59 and 421.47 ± 19.82 pg/mL, respectively). It was shown that the studied samples of polysaccharides were characterized by the absence of statistically significant inhibitory or stimulating effect on the production of cytokine TNF- α in the reaction medium by monocleares after their addition at a concentration of 20 μ g/ml. It was found that in the presence of Fukus-A and Fukus-E, Furz-A and Furz-E samples the content of cytokine TNF- α was the highest and amounted to 36.87 ± 1.89 , 32.81 ± 1.94 , 35.19 ± 0.15 and 32.51 ± 1.91 pg/mL, respectively. The content of TNF- α cytokine when using Fucus-M and Fucus-B polysaccharide samples practically did not change in comparison with the negative control.

Conclusion. Thus, it is revealed that polysaccharide samples isolated from macroalgae exhibit an anti-inflammatory effect. These samples can be recommended as ingredients or pharmaceutical substances for the production of dietary supplements or immunomodulatory and anti-inflammatory drugs.

Keywords: macroalgae; immunomodulatory properties; proinflammatory cytokines; polysaccharides; extractant

For citation. Ulrikh, E. V., Novozhilov, O. A., Agafonova, S. V., Zemlyakova, E. S., Klyuchko, N. Yu., Obregón-La Rosa, A.J., Kachanova, A. V., & Fedorova, O. S. (2026). Immunomodulatory properties of polysaccharides from Baltic Sea macroalgae. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 524–540. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385>

Введение

Полисахариды присутствуют во всех живых организмах. Они демонстрируют сложные биохимические структуры, основанные на сочетании гликозидных связей. Полисахариды широко используются в промышленности. В последнее время большое внимание уделяется изучению их биологической активности. Физиологические свойства биологически активных полисахаридов чрезвычайно разнообразны и определяются их структурой. Они играют важную роль в разнообразных микробных сообществах и обеспечивает круговорот углерода и энергии во многих типах клеток, в том числе в клетках макроводорослей [16; 24].

Ежегодное мировое производство макроводорослей оценивается в 100 000–200 000 тонн. Глобальная рыночная стоимость составляет от 0,5 до 5 миллиардов евро. Хотя мировой рынок водорослей, по оценкам, находится

в зачаточном состоянии, он стремительно растет. Основные продуцируемые в промышленности водоросли – *Laminaria* и *Fucales*. Их используют для производства кормов для сельскохозяйственных животных и рыб [17].

Известно, что макроводоросли производят и выделяют в окружающую среду большие количества полисахаридов. Такие полисахариды имеют сложную структуру [2]. Хотя научное сообщество обратило внимание на их биологическую активность, потенциальное использование в качестве гидрогелей в различных отраслях промышленности, недостаточно. Сложность строения ограничивает их исследование [1].

Экзогенные полисахариды, выделяемые макроводорослями, могут либо взаимодействовать с поверхностью клетки, либо выделяться в окружающую среду. [4] Иногда они состоят из внеклеточных полисахаридов, капсульных и сульфатных полисахаридов [5; 6].

У макроводорослей основными этапами экзогенного синтеза полисахаридов являются: синтез с помощью гликозилтрансферазы и полимеризация во внеклеточном пространстве или клеточной мембране [7; 18]. Однако для макроводорослей точный механизм химических взаимодействий при синтезе экзополисахаридов до сих пор не опубликован.

Фенол-серноокислотный метод [9] или хроматографические методы [10; 11] позволяют определить содержание экзогенного полисахарида в водорослевой среде. Для биотехнологических целей должна быть доступна более подробная структурная информация, чтобы установить корреляции между структурой полисахаридов и их биологически активными (противовоспалительными, иммуномодулирующими, противоопухолевыми, противовирусными, противопаразитарными, антиоксидантными, гипогликемическими и гипохолестеринемическими) свойствами.

Благодаря перечисленным свойствам, полисахариды нашли применение в пищевой, нутрицевтической, косметической промышленности, биомедицине и кормопроизводстве.

Цель исследования – изучить иммуномоделирующую способность полисахаридов макроводорослей Балтийского моря – *Fucus vesiculosus* и *Furcellaria lumbrifera*.

Материалы и методы исследования

Методика отбора биомассы водорослей

Пробы водорослей *Furcellaria lumbricalis* и *Fucus vesiculosus* отбирались на побережье Балтийского моря в период с 01 по 30 апреля 2025 года (Куршский залив, Калининградская область, Россия). Отбор образцов про-

извлеклись в период волновой активности, так как именно в этот период на берегу скапливается максимальное количество водорослей *F. lumbricalis* и *F. vesiculosus*. Образцы доставлялись в лабораторию в пластиковых ведрах. После доставки в лабораторию из биомассы удалялись крупные посторонние примеси. В основном, примеси были представлены щепками, полимера, фрагментами животных, листьями. Далее биомасса промывалась водопроводной водой для удаления песка и оставшихся мелких примесей.

Чистая биомасса сушилась на воздухе и досушивалась при 40°C в сушильном шкафу с естественной конвекцией Being серии BO-NL (Being, Шанхай, Китай). Высушенные водоросли хранились в бумажных пакетах в сухом и хорошо проветриваемом помещении. Непосредственно перед анализом водоросли измельчались ножевым лабораторным измельчителем D3V-10 (ООО «Вилитек», Москва, Россия).

Методика выделения полисахаридов из макроводорослей

Экстракцию полисахаридов проводили на установке, оборудованной нагревательным элементом - водяной баней LWB-206A (Daihan Labtech, Сеул, Ю. Корея) и обратным холодильником (ООО «ДВ-эксперт», Москва, Россия).

Экстракцию проводили с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. Для экстракции брали навеску измельченных макроводорослей *F. lumbricalis* и *F. vesiculosus* массой 3.0 г, помещали ее в коническую колбу и добавляли 60 мл раствора щелочи или кислоты [12].

После завершения экстракции горячий раствор отфильтровывали под вакуумом через марлю. К жидкой фазе экстракта добавляли ледяной изопропиловый спирт для осаждения полисахаридов. Соотношение спирта к раствору составляло 1:20.

Осадок повторно отфильтровывали через марлю. Отделенные полисахариды сушили в силиконовой форме в сушильном шкафу с естественной конвекцией Being серии BO-NL (Being, Шанхай, Китай) в течение суток при 60°C до постоянной массы. Массу измеряли гравиметрическим методом. Процесс проводился десятью сериями опытов.

Определение иммуномоделирующих свойств полисахаридов макроводорослей

Противовоспалительные свойства эндо- и экзополисахаридов определяли методом, основанном на применении твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА) с применением иммуноферментного анализатора Mindray MR-96A (Mindray, Китай). Для этого, контрольные и изучаемые образцы эндо- и экзополисахаридов инкубировали в лунках с иммобилизованными моноклональными антителами. Имеющиеся в образцах ци-

токсины связывались с иммобилизованными антителами. Связавшиеся цитокины на следующей стадии взаимодействовали при инкубации с первым конъюгатом (поликлональными антителами к цитокинам человека с биотином). Далее в ходе реакции, связавшиеся конъюгаты взаимодействовали при инкубации со вторым конъюгатом (стрептавидин с пероксидазой хрена). Количество связавшегося второго конъюгата определяли цветной реакцией с использованием субстрата пероксидазы хрена – перекиси водорода и хромогена – тетраметилбензидина. В ходе реакции интенсивность желтого окрашивания пропорциональна концентрации содержащихся в образцах цитокинов. После измерения оптической плотности растворов в лунках при длине волны 450 нм на основании калибровочного графика рассчитывали концентрацию цитокинов в анализируемых образцах.

Противовоспалительные свойства оценивали с применением цитокинов ИЛ-1 β и ФНО- α , так как ранее установлено, что в противовоспалительной активности полисахаридов, экстрагированных из макроводорослей, могут быть задействованы различные механизмы, включая ингибирование ферментов или снижение количества провоспалительных цитокинов [3].

Цитокины ИЛ-1 β и ФНО- α – это ключевые провоспалительные цитокины моноцитов, макрофагов и лимфоцитов. Если добавить к мононуклеарам провоспалительный агент – например, липополисахарид бактериальной стенки, то клетки будут реагировать в первую очередь выбросом именно этих цитокинов, с этого и начинается острая фаза воспаления. Противовоспалительные свойства эндо- и экзополисахаридов, выделенных из макроводорослей оценивали при концентрации 10 и 50 мкг/мл, так как именно при этих концентрациях отсутствует цитотоксический эффект в отношении мононуклеаров.

Для определения содержания ИЛ-1 β брали на лунку для каждого образца по 20 мкл супернатанта и 80 мкл питательной среды RPMI-1640, для определения содержания ФНО- α брали на лунку для каждого образца по 100 мкл супернатанта. Процедуру ИФА проводили согласно протоколу производителей коммерческих наборов.

В качестве положительного контроля использовали клетки, обработанные липополисахаридов, а в качестве отрицательного контроля применяли супернатант стимулированных липополисахаридом мононуклеарных клеток в отсутствии полисахаридов.

Статистический анализ

Результаты измерений были представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения. Достоверность различий между выборочными дисперсиями оценивали с помощью критерия Краскела-Уоллиса

для независимых выборок. Наличие статистически значимой разницы принималось при условии $p < 0.05$. Полученные данные обрабатывали с помощью программного обеспечения SPSS Statistics (IBM Corporation, 28.0.1, Армонке, Нью-Йорк, USA); графики построены в Excel (Microsoft Corporation, Microsoft Office 2016, Редмонд, Вашингтон, USA).

Результаты исследования

Результаты изучения противовоспалительных свойств макроводорослей при концентрации полисахаридов 20 мкг/мл представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Противовоспалительные свойства полисахаридов, выделенных из макроводорослей

Table 1. Anti-inflammatory properties of polysaccharides isolated from macroalgae

Название макроводорослей			
<i>F. vesiculosus</i>			
Экстрагент	Шифр образца	Содержание цитокинов, пг/мл	
		ИЛ-1 β	ФНО- α
Ацетонитрил	Фукус-А	420,36 $\pm$ 21,01	36,87 $\pm$ 1,89
Гексан	Фукус-Г	350,74 $\pm$ 14,49	31,52 $\pm$ 1,87
Этанол	Фукус-Э	414,69 $\pm$ 20,80	32,81 $\pm$ 1,94
Метанол	Фукус-М	402,69 $\pm$ 14,22	30,14 $\pm$ 1,80
Диэтиловый эфир	Фукус-Д	402,12 $\pm$ 21,48	31,72 $\pm$ 1,88
Вода	Фукус-В	415,78 $\pm$ 19,95	30,40 $\pm$ 1,92
Бутанол	Фукус-Б	401,78 $\pm$ 19,82	31,83 $\pm$ 1,89
<i>F. lumbrifera</i>			
Ацетонитрил	Фуру-А	421,47 $\pm$ 19,82	35,19 $\pm$ 0,15
Гексан	Фуру-Г	402,26 $\pm$ 19,77	31,96 $\pm$ 1,88
Этанол	Фуру-Э	403,03 $\pm$ 21,14	32,51 $\pm$ 1,91
Метанол	Фуру-М	409,65 $\pm$ 20,95	31,68 $\pm$ 1,87
Диэтиловый эфир	Фуру-Д	419,37 $\pm$ 20,59	31,25 $\pm$ 1,86
Вода	Фуру-В	402,65 $\pm$ 20,61	31,40 $\pm$ 1,92
Бутанол	Фуру-Б	401,33 $\pm$ 19,82	31,72 $\pm$ 1,88
Положительный контроль	-	402,65 $\pm$ 20,61	29,41 $\pm$ 1,58
Отрицательный контроль	-	409,15 $\pm$ 20,58	30,78 $\pm$ 1,88

Обсуждение

Анализ результатов (таблица 1) изучения противовоспалительных свойств эндополисахаридов макроводорослей, позволил выявить, что не

все изучаемые образцы обладали искомой биологической активностью. Определено, что полисахариды Фукус-Г, Фукус-М, Фукус-Д и Фукус-Б, выделенные из макроводорослей *F. vesiculosus*, ингибировали продукцию провоспалительного цитокина ИЛ-1 β в сравнении с отрицательным контролем. Пониженное содержание цитокинов ИЛ-1 β для *F. vesiculosus* составило 350,74 $\pm$ 14,49, 402,69 $\pm$ 14,22, 402,12 $\pm$ 21,48 и 401,78 $\pm$ 19,82 пг/мл соответственно. Наибольшее количество цитокинов для *F. vesiculosus* продуцировали образцы полисахаридов Фукус-А, Фукус-Э и Фукус-В (420,36 $\pm$ 21,01, 414,69 $\pm$ 20,80 и 415,78 $\pm$ 19,95 пг/мл, соответственно).

Для макроводоросли *F. lumbrifera* ингибировали выработку цитокинов образцы полисахаридов Фурц-Г, Фурц-Э, Фурц-М, Фурц-В и Фурц-Б (402,26 $\pm$ 19,77, 403,03 $\pm$ 21,14, 409,65 $\pm$ 20,95, 402,65 $\pm$ 20,61 и 401,33 $\pm$ 19,82 пг/мл, соответственно). Установлено, что образцы полисахаридов Фурц-А и Фурц-Д для макроводорослей *F. lumbrifera* продуцируют наибольшее количество цитокинов ИЛ-1 β (419,37 $\pm$ 20,59 и 421,47 $\pm$ 19,82 пг/мл, соответственно).

Показано, что изучаемые образцы полисахаридов характеризовались отсутствием статистически значимого ингибирующего или стимулирующего эффекта на выработку цитокина ФНО- α в реакционной среде моноклеарами после их добавления в концентрации 20 мкг/мл. Установлено, что в присутствии образцов Фукус-А и Фукус-Э, Фурц-А и Фурц-Э содержание цитокинов ФНО- α наибольшее и составило 36,87 $\pm$ 1,89, 32,81 $\pm$ 1,94, 35,19 $\pm$ 0,15 и 32,51 $\pm$ 1,91 пг/мл, соответственно. Содержание же цитокина ФНО- α при использовании образцов полисахаридов Фукус-М и Фукус-В практически не изменилось по сравнению с отрицательным контролем.

Выявлено, что при использовании в качестве противовоспалительного агента образцов полисахаридов, выделенных из макроводорослей, увеличилось количество провоспалительных цитокинов ИЛ-1 β и ФНО- α . Они проявляют противовоспалительный эффект и могут быть рекомендованы в качестве ингредиента или фармацевтической субстанции в производстве биологически активных добавок или лекарственных препаратов иммуномодулирующего и противовоспалительного действия.

Так как воспаление - это естественная физиологическая реакция иммунной системы на повреждение тканей, которая возникает, когда организм человека пытается бороться с различными патогенами, токсичными соединениями и поврежденными клетками [14]. Эти триггеры могут вызывать острые или хронические воспалительные реакции в различных органах и вызывать повреждение тканей или некоторые иммунопосре-

дованные заболевания [19]. Макрофаги как иммунные клетки, массово продуцирующие медиаторы воспаления, включая простагландин E2 и оксид азота, играют важную роль в воспалении [14]. Воспаление включает две острую и хроническую фазы. В острой фазе происходит накопление жидкости, повышение кровотока и проницаемости сосудов, увеличение количества лейкоцитов и медиаторов воспаления, тогда как хроническая фаза связана с развитием специфических гуморальных и клеточных иммунных реакций [15].

В традиционной медицине многие соединения природного происхождения используются экспериментально для лечения заболеваний и раневых повреждений [25]. В последние годы морские ресурсы получили признание благодаря разнообразию содержащихся в них биологически активных соединений, которые становятся важными ингредиентами средств по уходу за кожей из-за их сильных противовоспалительных свойств, а также безопасности и низкого риска при их использовании [23]. Потребители все чаще ищут экологически чистую косметику, содержащую меньшее количество синтетических ингредиентов [22]. Широкий спектр биотехнологических применений установлен для полисахаридов водных организмов, особенно водорослей. Высокое содержание противовоспалительных молекул полисахаридов сделало их особенно привлекательными [20]. Таким образом, экстракты водорослей, содержащих полисахариды, имеют потенциал для использования в изготовлении фармацевтических препаратов, косметики, нутрицевтиков, биомедицинских и пищевых продуктов [8].

Экзогенные полисахариды, полученные из макроводорослей, образуют слой биоминералов на поверхности почвы, что приводит к образованию органической почвенной корки, которая, в свою очередь, способствует образованию органических почв. Они также важны в экологическом контексте. Они могут предотвратить инфекции, переносимые макроводорослями [13]. Известно, что макроводоросли является важным производителем экзогенных полисахаридов, но данный процесс недостаточно изучен.

Хотя более ранние изобретения вакцин обеспечивали приобретенный иммунитет, недавние усилия по разработке противовоспалительных препаратов значительно возросли из-за возникновения или (повторного) появления инфекционных заболеваний. Нейхейс и др. предположили, что это может быть связано с тем, что вирусные частицы могут спонтанно манипулировать своим генетическим составом при каждом столкновении со стратегией лечения, что приводит к лекарственной устойчивости [21],

поэтому существует потребность в противовоспалительных молекулах из источников, не загрязненных вирусом.

Заключение

Определено, что наибольшее количество цитокинов для *F. vesiculosus* продуцировали образцы полисахаридов Фукус-А, Фукус-Э и Фукус-В ($420,36 \pm 21,01$, $414,69 \pm 20,80$ и $415,78 \pm 19,95$ пг/мл, соответственно). Образцы полисахаридов Фурц-А и Фурц-Д для макроводорослей *F. lumbrifera* продуцируют наибольшее количество цитокинов ИЛ-1 β ($419,37 \pm 20,59$ и $421,47 \pm 19,82$ пг/мл, соответственно).

Показано, что в присутствии образцов Фукус-А и Фукус-Э, Фурц-А и Фурц-Э содержание цитокинов ФНО- α наибольшее и составило $36,87 \pm 1,89$, $32,81 \pm 1,94$, $35,19 \pm 0,15$ и $32,51 \pm 1,91$ пг/мл, соответственно. Содержание же цитокина ФНО- α при использовании образцов полисахаридов Фукус-М и Фукус-В практически не изменилось по сравнению с отрицательным контролем.

Выявлено, что при использовании в качестве противовоспалительного агента образцов полисахаридов, выделенных из макроводорослей, увеличилось количество провоспалительных цитокинов ИЛ-1 β и ФНО- α . Они проявляют противовоспалительный эффект и могут быть рекомендованы в качестве ингредиента или фармацевтической субстанции в производстве биологически активных добавок или лекарственных препаратов иммуномодулирующего и противовоспалительного действия.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в соответствии с утвержденным планом тематик научных исследований ФГБОУ ВО «КГТУ», осуществляемых за счет средств федерального бюджета (бюджетный цикл 2025-2027, регистрационный номер карты ЕГИСУ НИОКТР 1124072300009-1 от 23.07.2024 г.), соглашением о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Список литературы / References

1. Bica, A., Barbu-Tudoran, L., Druga, B., et al. (2012). *Desmodesmus communis* (Chlorophyta) from Romanian freshwaters: Coenobial morphology and molecular

- taxonomy based on the ITS2 of new isolates. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 17, 16–28.
2. Catarino, M. D., Silva, A. M., & Cardoso, S. M. (2018). Phycochemical constituents and biological activities of *Fucus* spp. *Marine Drugs*, 16(8), 249. <https://doi.org/10.3390/md16080249>. EDN: <https://elibrary.ru/XYSCOL>
 3. Chakraborty, M., Miao, C., McDonald, A., et al. (2012). Concomitant extraction of bio-oil and value-added polysaccharides from *Chlorella sorokiniana* using a unique sequential hydrothermal extraction technology. *Fuel*, 95, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.055>.
 4. Chen, Y., Liu, X., & Wu, L., et al. (2018). Physicochemical characterization of polysaccharides from *Chlorella pyrenoidosa* and its anti-ageing effects in *Drosophila melanogaster*. *Carbohydrate Polymers*, 185, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.077>.
 5. Chen, Y., Lin, Z., Li, Q., et al. (2015). The anti-allergic activity of polyphenol extracted from five marine algae. *Journal of Ocean University of China*, 14(4), 681–684. <https://doi.org/10.1007/s11802-015-2601-5>.
 6. Chen, Y. X., Liu, X. Y., Xiao, Z., et al. (2016). Antioxidant activities of polysaccharides obtained from *Chlorella pyrenoidosa* via different ethanol concentrations. *International Journal of Biological Macromolecules*, 91, 505–509. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.086>.
 7. Cikoš, A. M., Jokić, S., Šubarić, D., et al. (2018). Overview on the application of modern methods for the extraction of bioactive compounds from marine macroalgae. *Marine Drugs*, 16(10), 348. <https://doi.org/10.3390/md16100348>.
 8. Davoodbasha, M., Edachery, B., Nooruddin, T., et al. (2018). An evidence of C16 fatty acid methyl esters extracted from microalga for effective anti-microbial and antioxidant property. *Microbial Pathogenesis*, 115, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.12.049>. EDN: <https://elibrary.ru/VEAWHB>
 9. de Jesus, C. S., de Jesus Assis, D., Rodriguez, M. B., et al. (2019). Pilot-scale isolation and characterization of extracellular polymeric substances (EPS) from cell-free medium of *Spirulina* sp. LEB-18 cultures under outdoor conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 1106–1114. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.016>.
 10. de Morais, M. G., Vaz, B. D. S., de Morais, E. G., et al. (2015). Biologically active metabolites synthesized by microalgae. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/835761>. EDN: <https://elibrary.ru/UOOQCX>
 11. Deamici, K. M., de Morais, M. G., Santos, L. O., et al. (2021). Static magnetic fields effects on polysaccharides production by different microalgae strains. *Applied Sciences*, 11(11), 5299. <https://doi.org/10.3390/app11115299>. EDN: <https://elibrary.ru/UAUBRN>

12. Holden, N. M., Neill, A. M., Stout, J. C., et al. (2022). Biocircularity: A framework to define sustainable, circular bioeconomy. *Circular Economy and Sustainability*, 3, 77–91. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00180-y>. EDN: <https://elibrary.ru/WOGNUD>
13. Kadam, S., Tiwari, B., & O'Donnell, C. J. (2013). Application of novel extraction technologies for bioactives from marine algae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, 4667–4675. <https://doi.org/10.1021/jf400819p>. EDN: <https://elibrary.ru/RJYJCX>
14. Kim, S. K., & Wijesekara, I. (2011). Anticoagulant effect of marine algae. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 64, pp. 235–244). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387669-0.00018-1>. EDN: <https://elibrary.ru/PGZDTL>
15. Lahaye, M., & Robic, A. (2007). Structure and function properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules*, 8, 1765–1774. <https://doi.org/10.1021/bm061185q>.
16. Leandro, A., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. (2019). Diverse applications of marine macroalgae. *Marine Drugs*, 18(1), 17. <https://doi.org/10.3390/md18010017>. EDN: <https://elibrary.ru/CJYVHK>
17. Lind, L., Eckstein, R. L., & Relyea, R. A. (2022). Direct and indirect effects of climate change on distribution and community composition of macrophytes in lentic systems. *Biological Reviews*, 97(4), 1677–1690. <https://doi.org/10.1111/brv.12858>. EDN: <https://elibrary.ru/UPJANZ>
18. Lourenço, C., Fraga-Corral, M., Jimenez-Lopez, C., et al. (2021). Biological action mechanisms of fucoxanthin extracted from algae for application in food and cosmetic industries. *Trends in Food Science & Technology*, 117, 163–181. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.012>. EDN: <https://elibrary.ru/IAHHVH>
19. Matsubara, K. (2005). Recent advances in marine algal anticoagulants. *Cardiovascular & Hematological Agents in Medicinal Chemistry*, 2, 13–19. <https://doi.org/10.2174/1568016043477314>.
20. Montalvo, G. E. B., Thomaz-Soccol, V., Vandenberghe, L. P. S., et al. (2019). Arthrospira maxima OF15 biomass cultivation at laboratory and pilot scale from sugar-cane vinasse for potential biological new peptides production. *Bioresource Technology*, 273, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.081>.
21. Nijhuis, M., van Maarseveen, N. M., & Boucher, C. A. (2008). Antiviral resistance and impact on viral replication capacity: Evolution of viruses under antiviral pressure occurs in three phases. In *Handbook of Experimental Pharmacology* (pp. 299–320). https://doi.org/10.1007/978-3-540-79086-0_11. EDN: <https://elibrary.ru/WQWVFX>
22. Patel, H. M., Rastogi, R. P., Trivedi, U., et al. (2018). Structural characterization and antioxidant potential of phycocyanin from the cyanobacterium Geitlerinema sp. H8DM. *Algal Research*, 32, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.04.024>.
23. Sathishkumar, R. S., Sundaramanickam, A., Srinath, R., et al. (2019). Green syn-

- thesis of silver nanoparticles by bloom-forming marine microalgae *Trichodesmium erythraeum* and its applications in antioxidant, drug-resistant bacteria, and cytotoxicity activity. *Journal of Saudi Chemical Society*, 23(8), 1180–1191. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2019.07.008>.
24. Silva, A., Silva, S. A., Carpena, M., et al. (2020). Macroalgae as a source of valuable antimicrobial compounds: Extraction and applications. *Antibiotics*, 9(10), 642. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9100642>. EDN: <https://elibrary.ru/DBEUKK>
25. Tamala, J. K., Maramag, E. I., Simeon, K. A., et al. (2022). A bibliometric analysis of sustainable oil and gas production research using VOSviewer. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100437>. EDN: <https://elibrary.ru/AWCXSV>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРЕ

Ульрих Елена Викторовна, д-р техн. наук, доцент, директор Химико-аналитического ресурсного центра
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
elen.ulrich@mail.ru

Новожилов Олег Анатольевич, канд. биол. наук, доцент, директор института рыболовства и аквакультуры
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
oleg.novozhilov@klgtu.ru

Агафонова Светлана Викторовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
svetlana.agafonova@klgtu.ru*

Землякова Евгения Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
evgeniya.zemljakova@klgtu.ru*

Ключко Наталия Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
natalya.kluchko@klgtu.ru*

Обрегон Антонио Хосе, доктор наук, профессор
*Перуанский технологический университет
ул. 28 июля, 15046, Лима, Перу
antonio-38@mail.ru*

Качанова Анжелика Валерьевна, аспирант кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
asunyaykina54@gmail.com*

Федорова Олеся Сергеевна, магистрант кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
olesya.fedorova@klgtu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHOR

Elena V. Ulrikh, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Chemical-Analytical Resource Center
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
elen.ulrich@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-7277>
ResearcherID: I-3095-2017
Scopus Author ID: 56764211200

Oleg A. Novozhilov, PhD in Biology, Associate Professor, Director of the Institute of Fisheries and Aquaculture
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
oleg.novozhilov@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9776-4845>
ResearcherID: NKQ-0552-2025
Scopus Author ID: 56711851000

Svetlana V. Agafonova, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
svetlana.agafonova@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5992-414X>
ResearcherID: 2505-4522
Scopus Author ID: 57222610902

Evgeniya S. Zemlyakova, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
evgeniya.zemljakova@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-3914>
ResearcherID: AAF-6701-2019
Scopus Author ID: 57224414427

Natalia Yu. Klyuchko, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology

Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
natalya.kluchko@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6708-9674>
ResearcherID: AAE-8960-2019
Scopus Author ID: 57222610783

Antonio Jose Obregón-La Rosa, Doctor of Science, Professor
Peruvian Technological University
28, July str., Lima, 15046 Peru
antonio-38@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1385-7682>

Anzhelika V. Kachanova, Postgraduate Student of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
asunyaykina54@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1290-0577>
ResearcherID: 7230-8280

Olesya S. Fedorova, Master's student of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
olesya.fedorova@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8226-1408>
ResearcherID: NHQ-0115-2025

Поступила 06.06.2025

После рецензирования 01.08.2025

Принята 18.10.2025

Received 06.06.2025

Revised 01.08.2025

Accepted 18.10.2025

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1751](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1751)EDN: [UMKEQT](#)

UDC 338.43



Sustainable circular bioeconomy and agro-recycling: What do we know about banana fibre industry?

N.A. Tsatsenko¹, L.V. Tsatsenko², A.Ch. Kakunze³¹National Center of Grain named after P.P. Lukyanenko,

Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin,

Krasnodar, Russian Federation

³University of Burundi, Bujumbura, Burundi

Abstract

Background. The recycling of agricultural waste represents one of the practical directions for implementing the principles of circular bioeconomy. The use of biological residues or wastes for creation of environmentally friendly biodegradable materials is the way to achieving sustainable development. The cultivation of popular and nutritionally rich fruit of banana plants is associated with production of a large amount of biomass.

Purpose. This study is aimed to explore the potential of banana fibre under the concept of sustainable circular bioeconomy.

Materials and methods. To achieve the objective, we employ several methods such as an abstract-logical method, graphic method, comparative analysis method, data systematization and generalization. The empirical part of the study was derived from the statistical database from the Food and Agriculture Organization of the United Nations. The theoretical part of the study is based on the investigation the scientific literature from peer-review journals.

Results. The study showed that banana fibers are considered as an ecologically clean material capable of effectively replacing synthetic counterparts. An analysis of scientific papers revealed that presently the demand for utilization of banana by-products (pseudo-stems and banana leaves) for creation new products at the industrial level is growing around the world. We highlighted key botanical features of this plant and showed the banana plant potential for recycling. We found the largest banana and plantains producing countries. Thereafter, we summarized knowledge about the utilization of banana fibre in the textile and the paper industries as well as the biodegradable packaging materials.

Keywords: sustainability; circular economy; bioeconomy; biomass; circular bioeconomy; agricultural waste; banana by-product; banana fibre

For citation. Tsatsenko, N. A., Tsatsenko, L. V., & Kakunze, A. Ch. (2026). Sustainable circular bioeconomy and agro-recycling: What do we know about banana fibre industry?. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 541–555. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1751>

Устойчивая циркулярная биоэкономика и переработка сельскохозяйственной продукции: что мы знаем о производстве бананового волокна?

Н.А. Цаценко¹, Л.В. Цаценко², А.Ш. Какунзе³

¹ФГБНУ «Национальный центр зерна имени П.П. Лукьяненко»,
Краснодар, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, Краснодар, Российская Федерация

³Университет Бурунди, Бужумбура, Бурунди

Аннотация

Обоснование. Переработка сельскохозяйственных отходов является одним из практических направлений реализации принципов циркулярной биоэкономики. Использование биологических остатков или отходов для создания экологически чистых биоразлагаемых материалов – это способ достижения устойчивого развития. Выращивание популярных и богатых питательными веществами плодов растения банана (*Musa spp.*) сопровождается образованием значительного объема биомассы.

Цель – изучить потенциал бананового волокна в рамках концепции устойчивой круговой биоэкономики.

Материалы и методы. В ходе исследования был применен комплекс взаимодополняющих методов, включающий абстрактно-логический, графический, сравнительный анализ, систематизацию и обобщение данных. Эмпирическая основа исследования базируется на статистических данных Продовольственной и Сельскохозяйственной Организации Объединенных Наций. Теоретической основой исследования послужили научные труды из рецензируемых профильных журналов.

Результаты. Исследование показало, что банановые волокна считаются экологически чистым материалом, способным эффективно заменить синтетические аналоги. Анализ научных работ выявил, что в настоящее время в мире растет спрос на использование побочных продуктов производства бананов (псевдостебель и банановых листьев) для создания новых продуктов на промышленном уровне. Приведено ботаническое описание растения банан, что позволяет глубже понять

потенциал данного растения для переработки. Определены и изучены крупнейшие страны производители бананов и плантайнов. Обобщены знания об использовании бананового волокна в текстильной и бумажной промышленности, а также в качестве биоразлагаемого упаковочного материала.

Ключевые слова: устойчивое развитие; экономика замкнутого цикла; биоэкономика; биомасса; циркулярная биоэкономика; сельскохозяйственные отходы; побочный продукт производства бананов; банановое волокно

Для цитирования. Цаценко, Н. А., Цаценко, Л. В., & Какунзе, А. Ш. (2026). Устойчивая циркулярная биоэкономика и переработка сельскохозяйственной продукции: что мы знаем о производстве бананового волокна?. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 541–555. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1751>

1. Introduction

The term circular bioeconomy is seen as a new economic paradigm which is directly connected to the principles of sustainability [1; 4; 8; 18; 23]. In recent years there is a growing interest to understand how bio-economic activities might be integrated into the total economy as a whole and contributed to achieving sustainable development. In scientific literature many papers are devoted to the exploration the boundaries between similar concepts: circular economy and bioeconomy. On the one side, bioeconomy deals with transforming renewable biological resources into various materials, chemicals and energy including food products, feedstocks, bioproducts and bioenergy that ensure competitiveness, economic development and low-carbon growth. Bioeconomy utilizes opportunities provided by bioscience and biotechnology to address economic, social and environmental issues [5; 18; 20]. On the other side, the concept of circular economy is associated with global industrialization and aims at reducing the impact of economic activity on the environment through reuse, recycling and restoration of materials during production processes and consumption. These two aforementioned concepts have come to be viewed as one unified concept known as circular bioeconomy. In the broad view, the promotion of the concept of circular bioeconomy is a consequence of global environmental challenges such as deterioration of the environment, climate change, rapid population growth, accelerated urbanization of large cities, accumulation of significant amounts of waste, energy resource deficit and depletion of fossil fuel reserves, which necessitate rethinking the existing economy based primarily on hydrocarbons [5; 24]. In this regard, there is an increasing need to transition from traditional linear economy to closed-loop circular bioeconomy.

Next, the concept of sustainable development is based on three concepts: social sustainability, economic sustainability and environmental sustainability. Sustainable circular bioeconomy constitutes three pillars, too. It should be mentioned that the circular economy intends to optimize the usage of resources and reduce generation of waste by three principles 3R, including reduce, reuse, recycle [5]. Circular economy and bioeconomy have overlapped. Several papers state [6; 8; 20] that bioeconomy is built upon the three directions: the ecological concept, the biomass-based bioeconomy and the biotechnology-based bioeconomy. Moreover, according to the review paper by Virgolino and Holden, the bioeconomy covers eight areas under the concept of sustainable development where one of them is related to sustainable consumption and the reduction of waste [27]. The concept of the circular bioeconomy has a root to the periodic and the efficient use of renewable non-fossil raw materials and products [25]. Figure 1 illustrates the interconnection between the above-described concepts, their principles and dimensions.

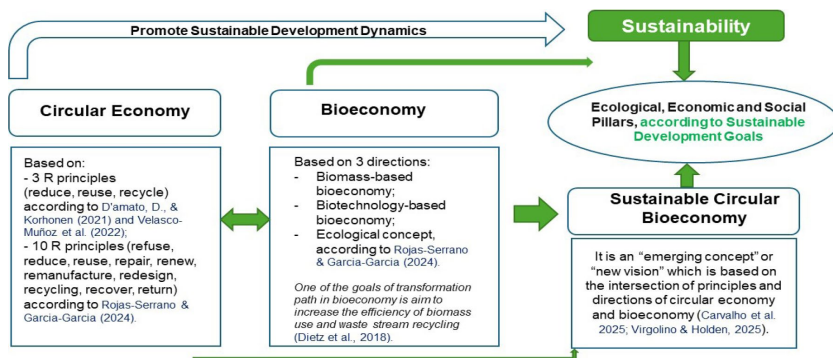


Fig. 1. Relation between circular economy, circular bioeconomy and sustainable circular bioeconomy

Source: compiled by the authors based on the following papers [2; 4-6; 23; 25; 27]

Agro-recycling is one of the applications of circular bioeconomy in the practice [25]. Usage of raw materials from agricultural waste and designing eco-friendly biodegradable products is a highly potential path to achieve sustainable development [4]. Banana fiber is seen as eco-friendly material which might partly substitute for synthetic fibre [3]. A number of studies about the utilization of banana by-products have significantly grown. Indeed, the production of banana plants has been characterized by a long history of crop cultivation by humans. The application of banana by-products under industrial level is an emerging topic under the sustainable circular bioeconomic vision.

This article addresses the questions: How useful is agricultural waste from the banana plant in the context of sustainability? What could we learn from the existing literature about the industrial potential of banana fibre? The aim of this article is to provide an overview of the applications of banana fiber and its connection with sustainable circular bioeconomy concept based on scientific publications.

2. Materials and Methods

The set of methods were applied under this work, including abstract-logical method, graphic method, comparative analysis method, data systematization and generalization. The study was built on the secondary data collection and analysis of scientific literature. The construction of the top banana producer ratings and the key regions of cultivated areas is based on the statistical database of FAOSTAT. The work was based on an analysis of scientific publications on the topic of using banana plant bioproducts within the circular bioeconomy concept. Literature search covered topics related to “biodegradable eco-friendly materials created from banana plants”, “banana fiber” and “agro-biomass recycling”. The literature for this study were searched via databases: Scopus, Google Scholar, SpringerLink.

3. Results

The banana plant (*Musa spp.*) is widely distributed and cultivated in the subtropical and tropical regions around the world [10]. It belongs to ancient forms of the plant community and go along with people since humans had begun their struggle with forests for creating crops adapted to their lifestyle [19]. The genetic diversity of *Musa* cultivars around the world is pretty high. Modern varieties of edible banana fruits have been genetically bred by combining two wild diploid species: *Musa acuminata Colla* (genome AA) и *Musa balbisiana Colla* (genome BB). At present, there are more than a thousand domesticated *Musa* cultivars in the world [10].

From the botanical view, the banana plant is one of the largest herbs which commonly grows up to 3 m in height [10]. In some case this giant plant can reach more than 5 meters [12; 17]. It should be mentioned that the banana plant is mainly cultivated for fruits. The fruit itself makes up about 12% of the entire plant. The exact proportion of biomass from the entire plant depends on the banana variety, so there may be some differences. Mostly, scientific literature states that 88% of the total plant mass is referred to the remaining parts of banana plant that is called banana by-products. Leaves, inflorescences, fruit stalks,

pseudo-stem, and peels are banana by-products [26]. For instance, banana pseudo-stem is considered as a major part of the agricultural biomass and can likely contribute to the economy as renewable source [19]. Many papers argue that banana by-products are considered as the biomass or agricultural waste which have a great potential for recycling [11; 13; 16; 26].

Currently, bananas are grown in 135 countries around the world to obtain a nutritious fruit [15]. The term banana includes dessert bananas, plantains and cooking bananas. The differences between the three groups of the banana plant are related to the specific properties of the banana fruit and its usage [10; 15]. The statistical office of Food and Agricultural Organization (FAO) divides bananas into two groups. The first group are bananas (dessert bananas). The second group is plantains and cooking bananas [7]. The total annual production of banana fruits in the world amounts to 139.3 million tons (Table 1). India is the largest banana producing country with 26.3% of the total production in the world. The annual output of bananas in India is about 36.6 million tones. Top 15 countries of banana production are widely distributed by the world regions. The leading production countries along India in Asia are China, Indonesia, Philippines, Viet Nam. In the African continent there are Nigeria, Angola, Tanzania and Kenya. In Latin American countries the major banana producing countries belong to Ecuador, Brazil, Colombia, Guatemala, Costa Rica. All in all, the top 15 countries account for about 79.8 % of the world's banana production (Table 1). In 2023 the total production of plantains and cooking bananas fruits reaches 44.4 million tons. Uganda is the leading producer of plantains and cooking bananas with 25.0 % of the total production in the world. The annual output of plantains and cooking bananas in this country is about 11.1 million tones. Other main producers are DR Congo, Cameroon, Ghana, Philippines, Colombia. About 96% of the world's plantain and cooking banana production is formed by the top 15 countries (Table 1).

Table 1.

**Top fifteen leading producers of bananas, plantains and cooking bananas
by country in the world, in 2023**

Bananas				Plantains and cooking bananas			
Rank	Country	Production (Mt)	Share of the total production (%)	Rank	Country	Production (Mt)	Share of the total production (%)
1	India	36.6	26.3	1	Uganda	11.1	25.0
2	China	11.7	8.4	2	DR Congo	4.9	11.0
3	Indonesia	9.3	6.7	3	Cameroon	4.6	10.4

4	Nigeria	7.3	5.2	4	Ghana	4.4	10.0
5	Ecuador	7.2	5.2	5	Philippines	3.1	7.1
6	Brazil	6.8	4.9	6	Colombia	2.6	5.8
7	Philippines	5.9	4.2	7	Côte d'Ivoire	2.1	4.8
8	Angola	4.9	3.5	8	Myanmar	1.4	3.2
9	Guatemala	4.4	3.2	9	Dominican Republic	1.3	3.0
10	Tanzania	3.7	2.6	10	Rwanda	1.0	2.4
11	Kenya	2.9	2.1	11	Ecuador	0.8	1.9
12	Mexico	2.6	1.9	12	Sri Lanka	0.8	1.8
13	Viet Nam	2.6	1.9	13	Guinea	0.7	1.6
14	Colombia	2.6	1.8	14	Cuba	0.7	1.6
15	Costa Rica	2.5	1.8	15	Venezuela	0.7	1.5
	Other countries	28.2	20.2		Other countries	4.0	8.9
	World	139.3	100.0		World	44.4	100.0

Source: own calculation based on the FAO STAT 2025 (retrieved 14.09.2025) [7]

The total cultivated area of banana constitutes 5973.3 thousand ha. The three key plantation banana regions by area are Southern Asia (18.6% out of the world), Eastern Africa (17.2%) and South America (16.7%). Area of production plantains and cooking bananas amounts to 6959.3 thousand ha in the world. The top three plantain and cooking bananas plantation regions are in Africa (Table 2).

Table 2.

**Cultivated areas of bananas, plantains and cooking bananas
by regions in the world, in 2023**

Bananas			Plantains and cooking bananas		
Region	Cultivated area (thousand ha)	Share from the total cultivated area (%)	Region	Cultivated area (thousand ha)	Share from the total cultivated area (%)
Eastern Africa	1026.9	17.2	Eastern Africa	2907.4	41.8
Middle Africa	502.5	8.4	Middle Africa	1738.7	25.0
Southern Africa	10.1	0.2	South Africa	0.0	0.0
Western Africa	692.7	11.6	Western Africa	1147.9	16.5
Central America	234.7	3.9	Central America	61.3	0.9
Caribbean	132.7	2.2	Caribbean	170.2	2.4

South America	998.9	16.7	South America	503.5	7.2
Southern Asia	1111.5	18.6	Southern Asia	58.1	0.8
South-eastern Asia	683.8	11.4	South-eastern Asia	370.8	5.3
Western Asia	32.3	0.5	Western Asia	0.0	0.0
Other regions	547.1	9.2	Other regions	1.4	0.0
Total cultivated area in the world	5973.3	100.0	Total cultivated area in the world	6959.3	100.0

Source: own calculation based on the FAO STAT 2025 (retrieved 14.09.2025) [7]

4. Discussion

The recycling agricultural waste from banana plants after harvesting has a long history in the tropical and subtropical countries where this crop is grown abundantly.

One hectare of banana plantation generates around 220 tons of biomass [3]. Geographical distribution of banana production and size of cultivated areas shows that farmers from many countries meet the problems of how to utilize the banana pseudo-stem and leaves as agricultural waste after harvesting. For example, the largest amount of bio-waste is accounted for by the banana pseudo-stem. The extraction fibre from pseudo-stem is expected to reduce environmental problems [13; 26].

The transformation of banana cultivation by-products into non-food industry requires good knowledge about the properties of the plant passed down from generation to generation, on one hand, and creative and innovative solutions, on the other hand. Banana fiber is produced from banana pseudo-stems and has several eco-friendly applications such as textile industry, pulp and paper industry, food industry, and natural fibre-based composites. We will briefly view the application of banana leaves as an eco-friendly packaging material. We will take a closer look at banana fibre served ecofriendly and economical materials for on textile and paper industry.

4.1 An eco-friendly packaging material from banana leaves

The leaves of *Musa spp.* are used fresh as plates or plates for food, and packaging for steaming food because of their fiber content. In dry form, they are cut into strips for weaving various products and covering roofs of houses and shelters. The species most utilized for these purposes include *Musa ornata* and *Musa textilis* [10].

Compared to conventional plastic, a significant advantage of biodegradable materials such as banana leaf-based tableware and wrapping is that they do not contribute to the waste crisis caused by plastics and are relatively inexpensive

and widely available in the banana-growing countries. Key characteristics include moisture retention prevention in foods and preservation of nutritional value during transportation. For instance, banana-leaf based product storage packaging has become increasingly common in Asian supermarkets [22].

The use of banana leaves as a wrapper for cooking dishes is quite widespread in Southeast Asian countries (for example India, Thailand, Malaysia, Sri Lanka) and in the Great African Lakes region countries (such as Burundi, Tanzania, Uganda, DR Congo, Kenya).

In India, especially in its southern states, leaf size is considered when setting the table, which is a unique practice. The large size of the leaf allows serving such multi-component dishes as rice, curry, and sweets. Thick leaves, particularly those of *Musa paradisiaca*, are used as wrapping food material because they retain moisture in the dish [12]. The filling wrapped in banana leaves is protected from the scorching effect of flame while retaining the aroma of the leaves [12; 17]. Leaves from banana plant are employed either for decorations or eco-friendly wrapping material for steaming, frying or grilling food in everyday life.

Furthermore, using banana leaves instead of foil and plastic packaging to preserve and cook food in banana-growing countries has been a long-standing tradition passed down through generations. In Burundi and Uganda, banana leaves are used to prepare dishes like Uburobe or Ubuswage. In this case, the banana leaf acting as a packaging material allows cooked vegetables to be preserved for several weeks [11].

Thus, banana leaves are being used in the food and non-food industry as environmentally friendly materials. The application of banana leaves as packaging materials is actively developing in many countries. If earlier it started at the household level, today the use of banana leaves as packaging materials has moved to the industrial level.

4.2 Application in the textile and paper industry from banana pseudo-stem

The transformation of banana cultivation by-products into non-food industry requires good knowledge about the properties of the plant passed down from generation to generation, on one hand, and creative and innovative solutions, on the other hand. Banana fiber is produced from banana pseudo-stems and has several eco-friendly applications such as textile industry, pulp and paper industry, food industry, and natural fibre based composites. Next, we will take a closer look at banana fibre served ecofriendly and economical materials for on textile and paper industry.

Scientific publications provide insight into the history of production papers and textiles from banana fibre. For example, in Japan banana fibers can be used for the manufacture of general-purpose paper, banknotes, check paper, grease-proof paper. Banana fiber was employed in paper manufacturing both separately and in combination with other types of pulp [3; 9]. In the Philippines the banana fibre obtained from Abaca (*Musa textilis* Nee.) is the key source for textile [14]. The production of fabric from banana fibre has a long history in India and Bangladesh, too [17]. There is growing interest to new technology in African and South American countries.

Table 3 presents a short summary of review articles devoted to banana pseudo-stem as a valuable resource for advancing circular bioeconomy and sustainability.

Table 3.

Review studies of scientific literature on recycling biomass of banana pseudo-stems

Authors (year)	Journal	Key findings
Balda et al. (2021)	<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	This study performs the comparison between various industrial applications of banana fibre by publications. The fiber content and strength determine the suitability of banana fibers for the different applications. Due to their high cellulose content and low lignin levels, banana fibers are ideally suited for the paper industry. This industry has a significant adverse environmental impact. So the usage of eco-friendly materials like banana fibre is expected to reduce the negative pressure on the environment.
Provin et al. (2024)	<i>Journal of Cleaner Production</i>	A systematic integrative review of the scientific literature on banana farming waste shows importance of banana fiber in the textile industry. This fiber can be considered as an alternative to synthetic and natural fibers such as expensive cotton. A study of 71 scientific papers revealed that banana fibers are characterized by excellent textile properties and environmental safety.
Vinay et al. (2024)	<i>Journal of Packaging Technology and Research</i>	The utilization of banana pseudo-stem in industry level grows. The investigation of the properties of banana fibre shows that this fibre is rich by elements like cellulose, hemicellulose and lignin. This study presents the holistic description of extraction methods of fibre from banana pseudo-stem which is grouped by mechanical, biological and chemical. Overview of diversity packaging materials derived from BPS is discussed. For example, diversity of applications from banana pseudo-stems include fiber, cellulose film, film, bioplastic film, etc.

Source: compiled by the authors based on the following papers [3; 21; 26]

5. Conclusion

In this article we focused on the biomass produced after the banana fruit harvesting and analyzed the publications related to the use of banana plant parts in non-food industry. Special attention is paid to two directions: leaves and pseudo-stems.

Having investigated the statistical data and the published scientific papers on this topic, we can draw the following conclusions:

1. This paper highlighted that the issues of sustainable development and the production of environmentally friendly materials and products from renewable bio-resources are an open space for discussion between science and business.

2. The results shown in this study pointed out that the production of bananas is growing around world. In this case, the search for ways to post-harvesting utilization from banana cultivation is an urgent task. Banana by-products is considered as the natural abundant raw material for the different environmentally friendly applications in industry based on principles of the sustainable circular bioeconomy. The properties of banana by-products allow them to be used for recycling and creating new products.

3. Pseudo-stem of banana plants are renewable sources for production of natural fibre with high quality. So that there is a huge demand for banana fibre in the textile industry to produce soft, low eco-footprint, biodegradable and hypoallergenic fabrics. Moreover, pseudo-stems have great potential for paper production due to their high cellulose content and low hemicellulose and lignin content compared to other non-wood materials. Paper production based on non-wood raw materials is more economical than wood-based paper production.

4. The findings allows us to make a statement that the integration of the banana waste valorization to produce textiles, paper and plastics might be a sustainable strategy rooted in the concept of circular bioeconomy.

5. We can suggest that as the production of the banana plant as an agricultural crop increases, it will be necessary to find new technological and innovative solutions for the use of by-products.

6. Future research can go deeply to investigate product sets manufactured from banana fibre and estimate their potential competitiveness compared to counterpart.

References / Список литературы

1. Adarchenko, I., Kurbatova, A., Porotnikova, N., Savenkova, E., Kumar, V., & Skorokhodova, Y. (2024). Advanced technologies for bioeconomy: The case of microalgae production. *Foresight and STI Governance*, 18(2), 69–83. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2024.2.69.83>. EDN: <https://elibrary.ru/YORTXJ>
2. Albinelli, I., Gomez San Juan, M., Lester, G., Nijmeijer, M., & Neretin, L. (2024). *Bioeconomy for food and agriculture: A global stocktaking study* (Environment and Natural Resources Management Working Paper No. 101). FAO.
3. Balda, S., Sharma, A., Capalash, N., & Sharma, P. (2021). Banana fibre: A natural and sustainable bioresource for eco-friendly applications. *Clean Technologies and Envi-*

- ronmental Policy*, 23(5), 1389–1401. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02041-y>. EDN: <https://elibrary.ru/SAECPJ>
4. Carvalho, A. C. F., Ghosh, S., Hoffmann, T. G., Prudêncio, E. S., de Souza, C. K., & Roy, S. (2025). Valuing agro-industrial waste in the development of sustainable food packaging based on the system of a circular bioeconomy: A review. *Cleaner Waste Systems*, 100275. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100275>. EDN: <https://elibrary.ru/XTLQGO>
 5. D'Amato, D., & Korhonen, J. (2021). Integrating the green economy, circular economy and bioeconomy in a strategic sustainability framework. *Ecological Economics*, 188, 107143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107143>. EDN: <https://elibrary.ru/GPFIWP>
 6. Dietz, T., Börner, J., Förster, J. J., & Von Braun, J. (2018). Governance of the bioeconomy: A global comparative study of national bioeconomy strategies. *Sustainability*, 10(9), 3190. <https://doi.org/10.3390/su10093190>
 7. FAOSTAT. (2025). *Crop production, yield, harvested area*. Retrieved September 14, 2025, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
 8. Ferraz, D., & Pyka, A. (2023). Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: A systematic literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29632-0>. EDN: <https://elibrary.ru/SSRPFM>
 9. Hendrickx, K. (2007). *The origins of banana-fibre cloth in the Ryukyus, Japan* (Vol. 12). Leuven University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt9qf0tz>
 10. Heslop-Harrison, J. S., & Schwarzacher, T. (2007). Domestication, genomics and the future for banana. *Annals of Botany*, 100(5), 1073–1084. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm191>. EDN: <https://elibrary.ru/XPXFTT>
 11. Kakunze, A. C., Tsatsenko, N. A., Mbonihankuye, C., & Tsatsenko, L. V. (2025, March). Food and non-food usage of banana plant in Burundi: A narrative review. In *International conference on innovations in sustainable agricultural systems* (pp. 166–177). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98127-2_17
 12. Kora, A. J. (2019). Leaves as dining plates, food wraps and food packing material: Importance of renewable resources in Indian culture. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 205. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0231-6>. EDN: <https://elibrary.ru/QAXHPJ>
 13. Kumari, S., Debbarma, R., Habibi, M., Haque, S., & Suprasanna, P. (2025). Banana waste valorisation and the development of biodegradable biofilms. *Waste Management Bulletin*, 3(3), 100213. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100213>. EDN: <https://elibrary.ru/YXHKHO>

14. Lalusin, A. G., & Villavicencio, M. L. H. (2014). Abaca (*Musa textilis* Nee) breeding in the Philippines. In *Industrial crops: Breeding for bioenergy and bioproducts* (pp. 265–289). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1447-0_12
15. Maseko, K. H., Regnier, T., Meiring, B., Wokadala, O. C., & Anyasi, T. A. (2024). Musa species variation, production, and the application of its processed flour: A review. *Scientia Horticulturae*, 325, 112688. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112688>. EDN: <https://elibrary.ru/CBUMRT>
16. Mohiuddin, A. K. M., Saha, M. K., Hossian, M. S., & Ferdoushi, A. (2014). Usefulness of banana (*Musa paradisiaca*) wastes in manufacturing of bio-products: A review. *The Agriculturists*, 12(1), 148–158. <https://doi.org/10.3329/agric.v12i1.19870>
17. Mostafa, H. S. (2021). Banana plant as a source of valuable antimicrobial compounds and its current applications in the food sector. *Journal of Food Science*, 86(9), 3778–3797. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15854>. EDN: <https://elibrary.ru/NENEQT>
18. Muscat, A., de Olde, E. M., Ripoll-Bosch, R., Van Zanten, H. H., Metze, T. A., Termeer, C. J., & de Boer, I. J. (2021). Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*, 2(8), 561–566. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00340-7>. EDN: <https://elibrary.ru/GJQVJR>
19. Padam, B. S., Tin, H. S., Chye, F. Y., & Abdullah, M. I. (2014). Banana by-products: An under-utilized renewable food biomass with great potential. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3527–3545. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0861-2>. EDN: <https://elibrary.ru/ZIVUNG>
20. Prodanova, N. A., Savin, A. A., Kosnikov, S. N., & Sorgutov, I. V. (2021). Conceptual approaches to the development of the agricultural sector in terms of the closed-cycle economy. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(3), 321–331. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-3-321-331>. EDN: <https://elibrary.ru/LFTJIV>
21. Provin, A. P., d'Alva, A. M., de Aguiar Dutra, A. R., de Andrade, J. B. S. O., & Cubas, A. L. V. (2024). Closing the cycle: Circular economy strategies for the textile industry using banana farming waste. *Journal of Cleaner Production*, 470, 143352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143352>. EDN: <https://elibrary.ru/PXRDMB>
22. Rikasa, A. M., & Mufeez, M. S. M. (2023). Banana leaf food packaging: An alternative and eco-friendly solution for food industry in Sri Lanka. In *Multisectoral approaches to accelerate economic transformation in the face of crisis in Sri Lanka* (p. 104). Retrieved September 14, 2025, from https://www.nastec.gov.lk/files/ysf/ysf_publication/Multisectoral_Approach_to_Accelerate_Economic_Growth.pdf#page=116
23. Rojas-Serrano, F., García-García, G., Parra-López, C., & Sayadi-Gmada, S. (2024). Sustainability, circular economy and bioeconomy: A conceptual review and integration into the notion of sustainable circular bioeconomy. *New Medit*. <https://doi.org/10.30682/nm2402a>. EDN: <https://elibrary.ru/BROYLR>

24. Stark, S., Biber-Freudenberger, L., Dietz, T., Escobar, N., Förster, J. J., Henderson, J., & Börner, J. (2022). Sustainability implications of transformation pathways for the bioeconomy. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.011>. EDN: <https://elibrary.ru/JHZBUQ>
25. Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., López-Felices, B., & Román-Sánchez, I. M. (2022). Circular economy in agriculture. An analysis of the state of research based on the life cycle. *Sustainable Production and Consumption*, 34, 257–270. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.017>. EDN: <https://elibrary.ru/ZRGWYJ>
26. Vinay, G. M., Modi, R. B., & Prakasha, R. (2024). Banana pseudostem: An innovative and sustainable packaging material: A review. *Journal of Packaging Technology and Research*, 8(2), 95–107. <https://doi.org/10.1007/s41783-024-00167-0>. EDN: <https://elibrary.ru/MLRCGX>
27. Virgolino, J. L. F., & Holden, N. M. (2025). Does the bioeconomy literature provide a balanced view of sustainability? *Sustainability Science*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11625-025-01642-6>. EDN: <https://elibrary.ru/PJAAO>

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalia A. Tsatsenko, PhD in Economics, Head of Department of International Relationship and Economics

National Center of Grain named after P.P. Lukyanenko

38, Academician P.P. Lukyanenko Str., Krasnodar, 350012, Russian Federation

natalia27tsatsenko@yandex.ru

SPIN-code: 5028-8748

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4258-1865>

Ludmila V. Tsatsenko, Professor, Dr. of Biology Science

Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin

13, Kalinin Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

cacenko.l@kubsau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1022-1942>

SPIN-cod: 2120-6510

Scopus ID: 55952841000

ResearcherIDAAS-5658-2020

Alain Charles Kakunze, PhD in Varietal Selection, Seed Production and Plant Biotechnology, Lecturer at the Higher School of Education

University of Burundi

Bujumbura, Burundi

akakunze@gmail.com

SPIN-code: 7907-1372

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6424-0847>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Цаценко Наталья Андреевна, PhD в области экономики, начальник отдела международных связей и экономики

ФГБНУ «Национальный центр зерна имени П.П. Лукьяненко»

ул. им. Академика Лукьяненко П.П., 38, г. Краснодар, 350012, Российская Федерация

natalia27tsatsenko@yandex.ru

Цаценко Людмила Владимировна, д.б.н., профессор, кафедра генетики, селекции и семеноводства

ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ

ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Российская Федерация

cacenko.l@kubsau.ru

Какунзе Ален Шарль, PhD в области селекции, семеноводства и биотехнологии растений, преподаватель Высшей школы образования

Университет Бурунди

Бужумбура, Бурунди

akakunze@gmail.com

Поступила 06.10.2025

После рецензирования 30.10.2025

Принята 04.11.2025

Received 06.10.2025

Revised 30.10.2025

Accepted 04.11.2025

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1417](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1417)

EDN: [URUSCJ](https://www.edn.ru/URUSCJ)

УДК 573.6.086



Оценка влияния продуктов переработки овса и льна на качество и биологическую ценность продуктов народного потребления

Д.Е. Колпакова, А. Naik, И.И. Плешивцев,
И.С. Милентьева, Л.К. Асякина

*Кемеровский государственный университет, Кемерово,
Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Современные тенденции в питании населения характеризуются повышенным потреблением рафинированных продуктов, что приводит к дефициту ценных нутриентов и возрастанию рисков развития хронических заболеваний. Обогащение хлеба, являющегося одним из основных продуктов народного потребления, нетрадиционными видами муки, такими как овсяная и льняная, а также применение закваски, способствует повышению его пищевой и биологической ценности.

Цель – оценить результаты введения овсяной и льняной муки, а также применения закваски на физико-химические, органолептические и нутриентные свойства пшеничного хлеба.

Материалы и методы. Микробиологический анализ проводили с использованием Petrifilm (YM – дрожжи и плесени, CC – колиформы, STX – *S. aureus*). Оптимальную температуру роста микрофлоры определяли на средах Чапека-Докса (дрожжи) и MRS (молочнокислые бактерии). Содержание белка в муке определяли спектрофотометрически. Аминокислотный состав и содержание катионов анализировали методом капиллярного электрофореза. Органолептическую оценку хлеба проводили по ГОСТ Р 58233-2018. Физико-химические показатели (пористость, кислотность, влажность) определяли по ГОСТ 5669-96, ГОСТ 5670-96 и ГОСТ 21094-2022 соответственно.

Результаты. Установлено, что закваска, используемая для выпечки хлеба является безопасной и содержит молочнокислые бактерии и дрожжи, присутствующие

щие в сырье. Добавление овсяной и льняной муки, а также применение закваски, приводит к повышению содержания белка (на 41,3–74,6 %), некоторых аминокислот (более чем в 2 раза) и минералов (в 2–5,5 раз) в хлебе. При этом наблюдаются улучшенные органолептические характеристики и увеличение срока хранения хлеба. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования овсяной и льняной муки, а также закваски, для повышения пищевой и биологической ценности хлеба.

Ключевые слова: хлеб; закваска; нетрадиционное сырье; овсяная мука; льняная мука; минералы; белки; аминокислоты

Для цитирования. Колпакова, Д. Е., Naik, A., Плешивцев, И. И., Милентьева, И. С., & Асякина, Л. К. (2026). Оценка влияния продуктов переработки овса и льна на качество и биологическую ценность продуктов народного потребления. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 556–578. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1417>

Evaluation of the influence of oat and flax processing products on the quality and biological value of consumer products

D.E. Kolpakova, A. Naik, I.I. Pleshivtsev,
I.S. Milentyeva, L.K. Asyakina

Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

Abstract

Background. Modern trends in the nutrition of the population are characterized by increased consumption of refined products, which leads to a deficiency of valuable nutrients and an increased risk of developing chronic diseases. Enrichment of bread, which is one of the main products of national consumption, with non-traditional types of flour, such as oat and flax, as well as the use of sourdough, helps to increase its nutritional and biological value.

Purpose. To evaluate the effects of adding oat and flaxseed flour and using sourdough on the physicochemical, organoleptic and nutritional properties of wheat bread.

Materials and methods. Microbiological analysis was performed using Petrifilm (YM – yeast and mold, CC – coliforms, STX – *S. aureus*). The optimal temperature for microflora growth was determined on Czapek-Dox (yeast) and MRS (lactic acid bacteria) media. The protein content in flour was determined spectrophotometrically. The amino acid composition and cation content were analyzed by capillary electrophoresis. Organoleptic assessment of bread was carried out according to GOST R 58233-2018.

Physicochemical indicators (porosity, acidity, moisture) were determined according to GOST 5669-96, GOST 5670-96 and GOST 21094-2022, respectively.

Results. It has been established that the sourdough used for baking bread is safe and contains lactic acid bacteria and yeast present in the raw materials. The addition of oat and flax flour, as well as the use of sourdough, leads to an increase in the protein content (by 41,3–74,6 %), some amino acids (more than 2 times) and minerals (2–5,5 times) in bread. At the same time, improved organoleptic characteristics and an increase in the shelf life of bread are observed. The data obtained indicate the prospects of using oat and flax flour, as well as sourdough, to increase the nutritional and biological value of bread.

Keywords: bread; sourdough; non-traditional raw materials; oat flour; flaxseed flour; minerals; proteins; amino acids

For citation. Kolpakova, D. E., Naik, A., Pleshivtsev, I. I., Milentyeva, I. S., Asyakina, L. K. (2026). Evaluation of the influence of oat and flax processing products on the quality and biological value of consumer products. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 556–578. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1417>

Введение

Современный образ жизни, характеризующийся низкой физической активностью, воздействием неблагоприятных экологических факторов и несбалансированным питанием, приводит к развитию дефицита эссенциальных нутриентов у значительной части населения [7]. Данная проблема имеет серьезные последствия для общественного здравоохранения, увеличивая риск развития хронических заболеваний и снижая качество жизни. Хлеб, являясь одним из основных продуктов питания, играет важную роль в обеспечении организма энергией, однако зачастую содержит большое количество «пустых» калорий, преимущественно представленных легкоусвояемыми углеводами [6]. В связи с этим, актуальной задачей является не только обеспечение населения достаточным количеством калорий, но и повышение пищевой и биологической ценности потребляемых продуктов [13]. Перспективным подходом в этом направлении представляется обогащение хлеба нетрадиционными видами муки с повышенным содержанием биологически активных веществ. К таким видам муки относятся, например, овсяная и льняная, богатые клетчаткой, витаминами, минералами и полиненасыщенными жирными кислотами. Кроме того, использование закваски вместо дрожжей может способствовать улучшению усвояемости хлеба и обогащению его микрофлорой [1].

Овес, являясь ценным источником питательных веществ, широко используется в пищевой промышленности, в том числе для производства

муки. Добавление овса в товары народного потребления, в частности в хлеб, позволяет не только повысить их пищевую ценность, но и придать им функциональные свойства, способствуя профилактике и коррекции заболеваний, ассоциированных с несбалансированным, рафинированным питанием, в том числе сердечно-сосудистых патологий [12]. Овес богат полифенолами и γ -аминомасляной кислотой, обладающими антидиабетическим, антигипертензивным, кардио- и церебропротекторным действием [23]. Значительное содержание β -глюкана (2–8 %), растворимого пищевого волокна с доказанными свойствами, полезными для здоровья, дополнительно повышает биологическую ценность овса [11].

Использование овса в качестве пищевой культуры обусловлено его высокой питательной ценностью [15]. Помимо благоприятного влияния на липидный профиль (гипохолестеринемический эффект), регуляцию уровня глюкозы в крови и состав кишечной микробиоты, овес отличается высоким содержанием белка (12–20 %) по сравнению с другими зерновыми культурами [16]. Аминокислотный состав овсяного белка характеризуется высоким содержанием лизина, аспарагина и аланина, что определяет его высокую биологическую ценность и превосходство над другими зерновыми белками [26]. При этом голозерный овес содержит большее количество незаменимых аминокислот по сравнению с шелушеным. Наряду с β -глюканами, овсяный белок является объектом научных исследований, направленных на изучение его физико-химических свойств и возможностей применения в пищевой промышленности [17].

Семена льна – богатый источник белка (до 23% от общей массы, и до 35–40 % после экстракции масла). Льняной белок является полноценным, содержащим все незаменимые аминокислоты, включая аргинин, аланин, глицин, изолейцин, гистидин, лизин и лейцин [19]. Низкое соотношение лизина к аргинину (0,25) делает его перспективным компонентом для лекарственных препаратов и детского питания. Льняная мука, побочный продукт производства льняного масла, также представляет собой ценный источник белка [25]. Растительные белки, в том числе льняной, способствуют снижению риска сердечно-сосудистых заболеваний и уровня холестерина. Современные методы экстракции, например, с использованием ферментов, позволяют повысить эффективность извлечения белка и масла из семян льна [24]. Кроме того, семена льна богаты пищевыми волокнами (до 40 %), включающими растворимую (25 %) и нерастворимую (75%) фракции. Растворимая клетчатка (камеди, пектины, β -глюканы) способствует снижению уровня глюкозы и холестерина, а также служит

питательным субстратом для кишечной микрофлоры [16]. Нерастворимая клетчатка (целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза) также оказывает положительное влияние на здоровье.

Семена льна богаты как жиро-, так и водорастворимыми витаминами [22]. Высокое содержание γ -токоферола (витамина Е) обеспечивает антиоксидантную защиту, регулирует экскрецию натрия и снижает риск сердечно-сосудистых заболеваний, некоторых видов рака и болезни Альцгеймера. Присутствие витамина К (филлохинона) играет важную роль в коагуляции и метаболизме кальция [21]. Семена льна являются ценным источником макро- и микроэлементов. Помимо основных нутриентов (углеводы, белки, жиры), семена льна содержат значительное количество минералов, включая магний, калий, натрий, цинк, марганец, медь и железо [14]. В недавних исследованиях выявлено высокое содержание калия (763,66 мг/100 г), железа (5,13 мг/100 г), магния (406,60 мг/100 г), фосфора (581,46 мг/100 г) и цинка (3,30 мг/100 г) в семенах льна [20]. Данные элементы играют ключевую роль в регуляции метаболических процессов и поддержании здоровья населения. Включение семян льна в рацион питания способно компенсировать дефицит минералов, возникающий при потреблении продуктов из рафинированной муки, и обеспечить организм необходимыми микроэлементами для роста и развития [15].

Применение ферментированных продуктов, в частности закваски, в хлебопечении оказывает многостороннее влияние на характеристики готового продукта. Закваска, в отличие от дрожжей, представляет собой сложную симбиотическую культуру, включающую разнообразные штаммы молочнокислых бактерий (*Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* и др.) и дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*, *Candida milleri* и др.). Метаболическая активность молочнокислых бактерий, приводящая к образованию молочной и уксусной кислот, обуславливает характерный кислотный вкус хлеба, приготовленного на закваске. Более того, молочнокислые бактерии оказывают существенное влияние на реологические свойства теста, изменяя его вязкость, эластичность и способность удерживать газ. Это, в свою очередь, положительно влияет на объем, пористость, текстуру и скорость черствения хлеба. Кроме того, метаболиты молочнокислых бактерий и дрожжей взаимодействуют с компонентами муки, влияя на органолептические характеристики хлеба, такие как аромат, вкус и цвет [10].

Целью работы является исследование влияние добавления овсяной и льняной муки, а также применения закваски на качество и питательные свойства пшеничного хлеба.

Материалы и методы

Объектами исследований являлись:

1. Нетрадиционные виды муки (овсяная и льняная).
3. Хлеб на закваске с добавлением нетрадиционных видов муки и дрожжевой пшеничный хлеб, изготовленный по традиционной технологии.
4. Закваска, полученная методом спонтанной ферментации.

Исследование показателей качества и безопасности закваски

Для оценки микробиологических параметров закваски применялся метод посева серийных разведений на питательные плёнки Petrifilm. Количественный анализ дрожжей и плесеней проводился с использованием 3M Petrifilm Yeast and Mold (YM) с инкубацией при 25 ± 1 °C в течение 72 ± 2 часов. Колиформные бактерии и бактерии группы кишечной палочки определялись на 3M Petrifilm Coliform Count Plate (CC) и наличие золотистого стафилококка – с помощью 3M Petrifilm Staph Express Count Plate (STX) при 37 ± 1 °C в течение 24 ± 2 часов.

Процедура анализа включала разведение 1 мл закваски в 9 мл стерильной дистиллированной воды с последующим приготовлением серийных разведений до 10^{-9} . Аликвоты (1 мл) разведений от 10^{-6} до 10^{-9} высевались на соответствующие Petrifilm, инкубировались, после чего подсчитывалось количество колониеобразующих единиц.

Оптимальная температура роста микрофлоры закваски изучалась путем глубинного посева разведений 10^{-6} – 10^{-9} на селективные среды: агаризованную среду Чапека-Докса для дрожжей и среду MRS (Мана, Рогозы и Шарпа) для молочнокислых бактерий. Культивирование проводилось при температурах 25, 28 и 30 °C.

Активность молочнокислых бактерий определяли по методу Г.М. Смирновой и М.П. Юргенсон.

Исследование нетрадиционных видов муки и готовой продукции

Определение содержания белков в нетрадиционных видах муки проводили по методике М.М. Трусова и др. с использованием спектрофотометра ЮНИКО 1201 [9].

Для исследования содержания аминокислот использовали метод капиллярного электрофореза.

Для исследования содержания катионов 5 г муки растворяли в 100 см³ воды и выдерживали в течение часа на качалке. После чего образцы центрифугировали 10 минут при 4000 об/мин. Далее промывали прибор стандартными растворами, проводили анализ и обрабатывали результаты.

Процесс приготовления хлеба на закваске, включая рецептуру, был адаптирован из предыдущего исследования автора с модификацией, заключающейся в добавлении 20 % нетрадиционного сырья. Контрольный образец (пшеничный хлеб на дрожжах) выпекали по рецептуре, разработанной автором ранее [8], с заменой смеси пшеничной и ржаной обдирной муки на пшеничную муку высшего сорта.

Органолептическую оценку образцов хлеба проводили по методике, изложенной в ГОСТ Р 58233-2018 «Хлеб из пшеничной муки. Технические условия» [5]. Физико-химические параметры хлеба, приготовленного на закваске с добавлением нетрадиционных ингредиентов, определяли стандартными методами. Пористость измеряли согласно ГОСТ 5669-96 «Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости» [3]. Кислотность определяли титриметрическим методом по ГОСТ 5670-96 «Хлебобулочные изделия [4]. Методы определения кислотности». Влажность образцов анализировали в соответствии с ГОСТ 21094-2022 «Изделия хлебобулочные. Методы определения влажности» [2].

Эксперименты проводились в трехкратной повторности для достоверности и правильности результатов.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены данные о показателях качества и безопасности закваски, используемой для приготовления всех видов хлеба.

Таблица 1.

Результаты исследования показателей качества закваски

Table 1. Results of the Study on Starter Culture Quality Indicators

Наименование показателя	Полученное значение
Подъемная сила, мин	36,0±1,2
Активность молочнокислых бактерий, мин	30,0±0,8
Наличие патогенных видов грибов и дрожжей	н.о.
Наличие золотистого стафилококка (<i>Staphylococcus aureus</i>)	н.о.
Наличие кишечной палочки (<i>Escherichia coli</i>)	н.о.
Общая обсемененность, КОЕ/г	5×10 ³

Примечание: н.о. – не обнаружено

Анализ данных, представленных в таблице 1, свидетельствует о микробиологической безопасности исследуемой закваски, обусловленной отсутствием патогенных микроорганизмов. Высокий уровень общей ми-

кробной обсемененности объясняется преобладанием молочнокислых бактерий (МКБ) и непатогенных штаммов дрожжей, составляющих основную микрофлору закваски. Высокая активность МКБ подтверждает их активное участие в процессах ферментации. Несмотря на то, что подъемная сила закваски ниже по сравнению с промышленными штаммами дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, более продолжительная ферментация, вероятно, способствует более полному и качественному протеканию биохимических процессов, влияющих на органолептические свойства конечного продукта.

Также подобрана оптимальная температура для развития культур дрожжей и молочнокислых бактерий, она составляет 25 °С. Выводы сделаны в соответствии с рисунком 1.

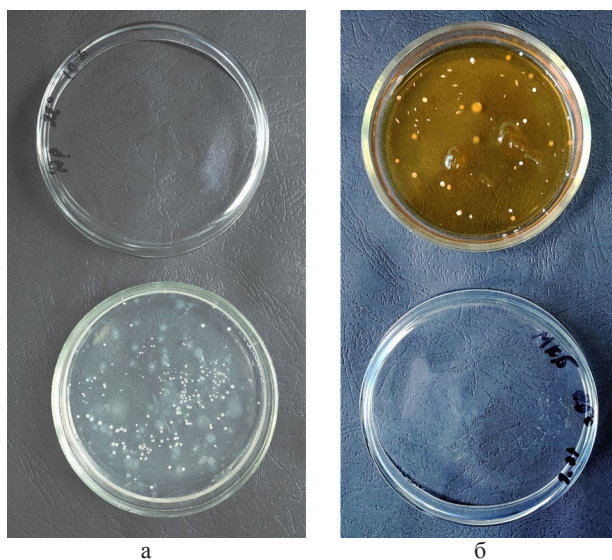


Рис. 1. Рост дрожжевых культур (а) и молочнокислых бактерий (б)

Fig. 1. Growth of yeast cultures (a) and lactic acid bacteria (b)

На рисунке 2 представлены результаты содержания белков в нетрадиционных видах муки и готовом хлебе с добавлением нетрадиционного вида сырья.

Результаты исследования содержания белка в различных видах муки демонстрирует существенное преимущество нетрадиционных вариантов, таких как льняная (больше на 17,5 г/100 г) и овсяная (больше на 5,8 г/100 г),

в сравнении с пшеничной. Повышение пищевой ценности современного рациона является актуальной задачей, и в этом контексте использование нетрадиционных видов муки, богатых белком, представляет особый интерес.

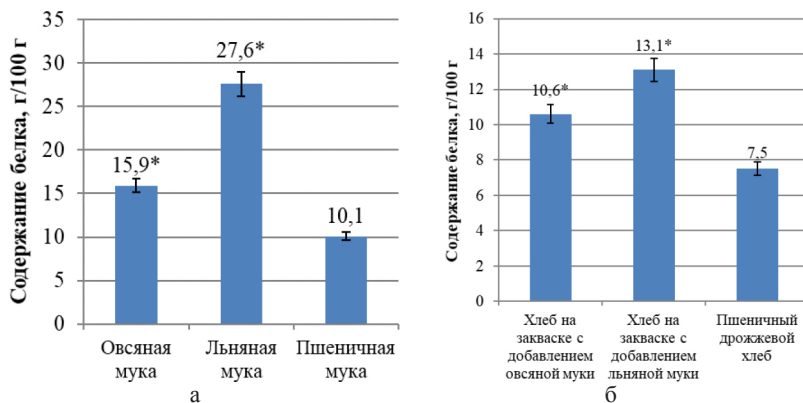


Рис. 2. Результаты содержания белка в муке и в хлебе

Fig. 2. Protein content in flour and bread

Примечание: * – различие статистически значимое ($p \leq 0,05$) по t-критерию Стьюдента

Анализ содержания белка в исследуемых образцах хлеба выявил зависимость этого показателя от рецептуры. Хлеб на закваске, приготовленный с добавлением овсяной (10,6 г/100 г) и особенно льняной (13,1 г/100 г) муки, характеризуется более высоким содержанием белка по сравнению с контрольным образцом пшеничного дрожжевого хлеба (7,5 г/100 г). Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что использование овсяной и льняной муки при приготовлении хлеба на закваске способствует повышению его пищевой ценности за счет увеличения содержания белка.

В таблице 2 представлены результаты содержания аминокислот в нетрадиционных видах муки.

Как льняная, так и овсяная мука демонстрируют статистически значимое ($p \leq 0,05$) более высокое содержание большинства аминокислот по сравнению с пшеничной мукой. Исключение составляет пролин, содержание которого выше в пшеничной муке. Льняная мука характеризуется самым высоким содержанием большинства проанализированных аминокислот, включая аргинин, лизин, фенилаланин, лейцин/изолейцин, валин, треонин, серин, аланин и глицин. Заметное превосходство льняной муки

наблюдается, в частности, по содержанию аргинина (1924,40 мг/100 г), что более чем в пять раз превышает его концентрацию в пшеничной муке (368,59 мг/100 г).

Таблица 2.

Результаты содержания аминокислот в нетрадиционных видах муки**Table 2. Results on the amino acid content of non-traditional types of flour**

Наименование аминокислоты	Содержание в муке, мг/100 г		
	льняная мука	овсяная мука	пшеничная мука (контроль)
аргинин	1924,40*±92,21	826,36*±33,88	368,59±12,94
лизин	896,08*±41,66	472,03*±15,34	251,36±7,76
тирозин	501,89*±19,42	510,63*±19,96	248,12±9,03
фенилаланин	961,73*±44,04	634,70*±26,14	459,67±17,65
гистидин	468,45*±17,28	271,50*±9,20	198,49±6,51
лейцин и изолейцин	1968,63*±92,59	947,55±39,32	879,35±39,66
метионин	374,83*±14,39	145,99±4,67	142,94±4,42
валин	1067,40*±48,67	632,44*±24,41	423,59±17,36
пролин	805,29±33,74	712,27±27,85	854,60±39,23
треонин	766,08*±31,79	441,56*±14,44	310,25±12,09
серин	971,58*±43,91	572,17*±24,20	486,57±15,57
аланин	931,00*±38,96	549,50*±21,98	329,97±12,01
глицин	1251,00*±54,59	1146,77*±51,86	356,11±13,60

Примечание: * – различие статистически значимое ($p \leq 0,05$) по t-критерию Стьюдента

Овсяная мука занимает промежуточное положение по содержанию большинства аминокислот, превосходя пшеничную муку, но уступая льняной. Исключение составляют тирозин, содержание которого примерно одинаково в овсяной и льняной муке, и пролин, концентрация которого выше в пшеничной муке. Полученные результаты свидетельствуют о том, что включение льняной и овсяной муки в рацион способствует повышению его питательной ценности за счет увеличения потребления ряда незаменимых и заменимых аминокислот.

В таблице 3 представлены результаты исследования содержания катионов кальция, магния, калия и натрия в нетрадиционных видах муки.

Анализ минерального состава показал, что льняная и овсяная мука содержат значительно больше калия, натрия, магния и кальция по сравнению с контрольным образцом пшеничной муки. Различия статистически значимы ($p \leq 0,05$). Льняная мука характеризуется наибольшей концентрацией

всех исследуемых минералов, значительно превосходя по этому показателю как овсяную, так и пшеничную муку. Пшеничная мука, в свою очередь, демонстрирует наименьшее содержание всех анализируемых элементов. Таким образом, использование овсяной и льняной муки способно обогатить хлеб ценными минеральными веществами.

Таблица 3.

Результаты содержания минералов в нетрадиционных видах муки**Table 3. Mineral Content Results for Non-Traditional Types of Flour**

Наименование минералов	Содержание в муке, мг/100 г		
	Льняная мука	Овсяная мука	Пшеничная мука (контроль)
Калий	798,92*±36,11	276,91*±10,93	106,37±3,24
Натрий	29,41*±1,41	19,83*±0,81	2,96±0,10
Магний	381,29*±17,85	116,47*±4,43	17,63±0,69
Кальций	235,39*±10,64	61,16*±2,41	17,12±0,56

Примечание: * – различие статистически значимое ($p \leq 0,05$) по t-критерию Стьюдента

Органолептическая оценка трех образцов хлеба – пшеничного дрожжевого и двух вариантов хлеба на закваске с добавлением льняной и овсяной муки соответственно – выявила ряд различий. Все образцы соответствовали общим требованиям ГОСТ Р 58233-2018 «Хлеб из пшеничной муки. Технические условия» к пропеченности, влажности, эластичности и пористости мякиша. Однако, в то время как дрожжевой хлеб характеризовался стандартным вкусом с присутствием дрожжевого привкуса и светло-коричневым цветом, образцы на закваске продемонстрировали более насыщенный пшеничный вкус без дрожжевых нот. Хлеб на закваске с добавлением льняной муки имел коричневый цвет корки, а с добавлением овсяной муки – светло-коричневый. Оба варианта на закваске отличались более мягким и насыщенным ароматом по сравнению с дрожжевым хлебом. Таким образом, хлеб на закваске, независимо от добавок, обладал более выраженными и предположительно более привлекательными органолептическими характеристиками, особенно в отношении вкуса и запаха.

На рисунке 3 представлены результаты исследования физико-химических показателей в хлебе на закваске с добавлением нетрадиционных видов сырья и в контрольном образце.

Результаты исследования демонстрируют различия в кислотности образцов хлеба в зависимости от способа приготовления и используемых ингредиентов. Хлеб на закваске, как с добавлением овсяной муки, так и с

добавлением льняной муки, проявляет более низкие значения по сравнению с контрольным образцом пшеничного дрожжевого хлеба. Это, возможно, связано с более активным образованием органических кислот в процессе ферментации закваски. Наблюдаемые различия, хотя и незначительные, способны влиять на органолептические свойства хлеба, а также на кинетику технологического процесса. Более низкая кислотность хлеба на закваске потенциально может способствовать улучшению его пищевой ценности за счет более эффективного усвоения некоторых нутриентов.

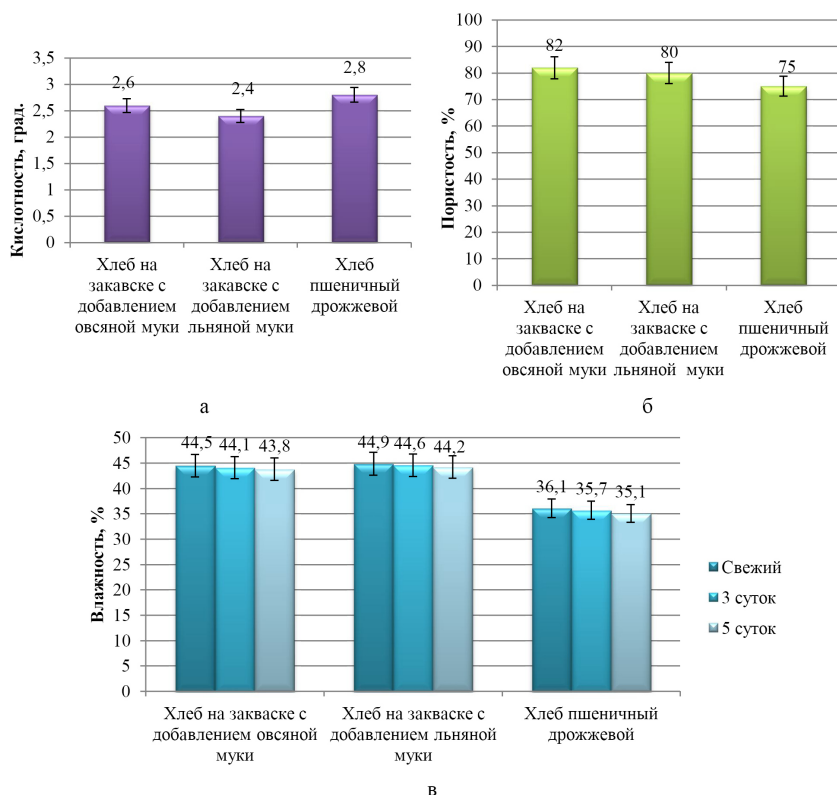


Рис. 3. Результаты исследования физико-химических показателей хлеба, где: а – результаты исследования кислотности; б – результаты исследования пористости; в – результаты исследования влажности на 1, 3 и 5 сутки

Fig. 3. Results of the analysis of the physicochemical properties of bread, where:

а – acidity test results; б – porosity test results;
с – moisture content test results on days 1, 3, and 5

Анализ пористости исследуемых образцов хлеба показал, что хлеб на закваске, как с добавлением овсяной муки, так и с добавлением льняной муки, обладает более высокой пористостью по сравнению с контрольным образцом пшеничного дрожжевого хлеба. Это может быть обусловлено различиями в газообразующей способности закваски и дрожжей, а также влиянием добавок (овсяной и льняной муки) на реологические свойства теста. Более высокая пористость хлеба на закваске положительно сказывается на его органолептических характеристиках, таких как мягкость и воздушность мякиша.

Исследование динамики влажности хлеба в течение 5 суток хранения выявило следующие закономерности. Хлеб на закваске, как с добавлением овсяной муки, так и с добавлением льняной муки, изначально характеризуется более высокой влажностью по сравнению с пшеничным дрожжевым хлебом. В течение периода хранения наблюдается незначительное снижение влажности во всех образцах, что является естественным процессом. Однако, даже на 5 сутки хранения, хлеб на закваске сохраняет более высокую влажность (43,8 % и 44,2 % для хлеба с овсяной и льняной мукой соответственно) по сравнению с дрожжевым хлебом (35,1 %). Полученные данные свидетельствуют о том, что технология приготовления на закваске способствует лучшему удержанию влаги в хлебе, что может положительно влиять на его свежесть и органолептические свойства в течение более длительного периода хранения.

В таблице 4 представлены результаты содержания аминокислот в хлебе на закваске с добавлением нетрадиционных видов сырья и в контрольном образце.

Добавление овсяной и льняной муки, в сочетании с использованием закваски, статистически достоверно ($p \leq 0,05$) увеличивает содержание всех исследуемых аминокислот в пшеничном хлебе по сравнению с контрольным образцом (дрожжевой хлеб). Наиболее выраженные различия наблюдаются в содержании таких аминокислот, как аргинин, лизин, фенилаланин, метионин, валин, треонин и серин. Хлеб на закваске с добавлением льняной муки выделяется повышенным содержанием аргинина, лизина, фенилаланина, валина, пролина, треонина, серина, аланина и глицина. В хлебе на закваске с добавлением овсяной муки отмечено значительно более высокое содержание метионина. Полученные данные свидетельствуют о том, что использование закваски и добавление овсяной или льняной муки положительно влияет на аминокислотный состав хлеба, повышая его пищевую ценность.

Таблица 4.

Результаты содержания аминокислот в хлебе**Table 4. Results of Amino Acid Content in Bread**

Наименование аминокислоты	Содержание в хлебе, мг/100 г		
	Хлеб на закваске с добавлением льняной муки	Хлеб на закваске с добавлением овсяной муки	Хлеб пшеничный дрожжевой (контроль)
аргинин	695,64*±29,15	476,96*±19,22	311,97±10,26
лизин	365,85*±16,53	280,36*±11,10	186,26±6,72
тирозин	297,36*±14,06	298,24*±11,75	196,89±5,94
фенилаланин	554,79*±26,96	488,86*±17,94	362,35±14,27
гистидин	245,85*±11,62	218,78*±8,31	152,17±5,48
лейцин, изолейцин	1203,98*±59,24	1003,98*±47,48	810,34±34,76
метионин	187,56*±6,92	383,52*±11,85	113,26±4,02
валин	567,56*±18,21	480,49*±16,67	354,54±12,44
пролин	873,12*±40,94	854,11±40,63	712,78±32,64
треонин	363,55*±16,43	298,55*±10,76	210,59±9,20
серин	562,09*±23,44	482,02*±22,41	368,75±12,09
аланин	423,15*±17,60	346,15*±14,88	237,98±7,35
глицин	511,71*±23,79	490,74*±22,13	261,64±9,36

Примечание: * – различие статистически значимое ($p \leq 0,05$) по t-критерию Стьюдента

В таблице 5 представлены результаты определения содержания некоторых минералов в хлебе на закваске с нетрадиционными видами муки и контрольном образце.

Таблица 5.

Результаты содержания минералов в хлебе**Table 5. Results of Mineral Content in Bread**

Содержание минералов	Содержание в хлебе, мг/100 г		
	Хлеб на закваске с добавлением овсяной муки	Хлеб на закваске с добавлением льняной муки	Дрожжевой пшеничный хлеб без добавок
Калий	192,60*±7,32	283,00*±13,86	119,41±4,08
Натрий	10,80*±0,45	12,60*±0,56	5,64±0,19
Магний	43,77*±2,02	97,17*±4,26	17,29±0,84
Кальций	35,07*±1,69	73,45*±4,69	21,95±1,06

Примечание: * – различие статистически значимое ($p \leq 0,05$) по t-критерию Стьюдента

Результаты исследования демонстрируют влияние выбора типа хлеба на потребление биологически значимых минеральных веществ. Хлеб, приготовленный на закваске с добавлением овсяной или льняной муки, характеризуется более высоким содержанием макроэлементов, таких как калий, натрий, магний и кальций, по сравнению с традиционным пшеничным хлебом на дрожжах. Различия минерального состава обусловлена двумя основными факторами: применением закваски, предположительно способствующей более полной биодоступности минералов из зернового сырья, и внесением овсяной и льняной муки, являющихся источниками данных элементов. Значительное превышение концентраций магния и кальция в хлебе на закваске с добавлением льняной муки по сравнению с контрольным образцом (дрожжевой пшеничный хлеб) подчеркивает перспективность использования обогащенных сортов хлеба для коррекции минерального баланса в рационе питания.

Статистически достоверное увеличение содержания калия, натрия, магния и кальция наблюдается в обоих экспериментальных образцах по сравнению с контрольным (дрожжевой хлеб без добавок).

Заключение

1. Использованная закваска обладает микробиологической чистотой, содержит молочнокислые бактерии и непатогенные дрожжи, что способствует повышению качества хлеба.

2. Льняная и овсяная мука превосходят пшеничную по содержанию белка (на 17,5 г/100 г и 5,8 г/100 г соответственно), аминокислот (аргинина – 1924,40 мг/100 г в льняной против 368,59 мг/100 г в пшеничной) и минералов (овсяная мука богаче калием, натрием, магнием и кальцием). Добавление этих видов муки повышает пищевую ценность хлеба.

3. Хлеб на закваске с добавлением овсяной (10,6 г/100 г белка) и льняной (13,1 г/100 г белка) муки имеет более высокое содержание белка по сравнению с контрольным образцом (7,5 г/100 г). Хлеб на закваске с добавлением овсяной или льняной муки превосходит по аминокислотному составу традиционный дрожжевой хлеб. Хлеб с льняной мукой содержит больше аргинина (695,64 мг/100 г, что на 223 % больше к контролю), лизина (365,85 мг/100 г, больше на 196 %), и других аминокислот (валина, пролина, треонина, серина, аланина – превышение от 54 % до 77 %). Хлеб с овсяной мукой, содержит меньшее количество большинства аминокислот по сравнению с льняным, однако, выделяется наибольшим содержанием метионина (383,52 мг/100 г, больше 338% по отношению к контролю).

Хлеб на закваске с овсяной или льняной мукой значительно богаче минералами, чем дрожжевой. Льняной хлеб лидирует по содержанию калия – на

137 % по отношению к контролю, натрия – на 123%, магния – на 461 % и кальция – на 234 %. Овсяный хлеб также превосходит контроль по всем показателям, особенно по содержанию магния – на 153 % и кальция – на 60 %.

Также хлеб на закваске с добавлением нетрадиционных видов муки характеризуется более низкой кислотностью, повышенной пористостью, что благоприятно влияет на его органолептические свойства и продлевает срок хранения.

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

Информация о спонсорстве. Работы выполнены в рамках государственного задания FZSR-2024-0009.

Благодарности. Работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии» на базе КемГУ.

Список литературы

1. Алехина, Н. Н., Пономарева, Е. И., Жаркова, И. М., & Гребенщиков, А. В. (2021). Оценка функциональных свойств и показателей безопасности зернового хлеба с амарантовой мукой. *Техника и технология пищевых производств*, 51(2), 323–332. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-323-332>. EDN: <https://elibrary.ru/BSQLEY>
2. ГОСТ 21094-2022. *Изделия хлебобулочные. Методы определения влажности*. М.: Изд-во стандартов, 2022. 11 с.
3. ГОСТ 5669-96. *Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости*. М.: Изд-во стандартов, 2006. 2 с.
4. ГОСТ 5670-96. *Хлебобулочные изделия. Методы определения кислотности*. М.: Изд-во стандартов, 1997. 5 с.
5. ГОСТ 58233-2018. *Хлеб из пшеничной муки. Технические условия*. М.: Изд-во стандартов, 2019. 14 с.
6. Жаркова, И. М., Росляков, Ю. Ф., & Иванчиков, Д. С. (2023). Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве. *Техника и технология пищевых производств*, 53(3), 525–544. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>. EDN: <https://elibrary.ru/LQEJER>
7. Кандроков, Р. Х., Катин, С. А., Сивцев, А. О., Верьемьев, Д. Н., & Пестова, Е. В. (2025). Использование цельносомлотой пшенично-тритикалевой муки для производства хлебобулочных изделий. *Siberian Journal of Life Sciences and*

- Agriculture*, 17(1), 518–543. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1084>. EDN: <https://elibrary.ru/ZPRLTT>
8. Колпакова, Д. Е. (2025). Потенциал растительного сырья в функциональном хлебопечении. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 13(1), 19–29. <https://doi.org/10.14529/food250103>. EDN: <https://elibrary.ru/EAYZUK>
 9. Трусова, М. М., Павлова, О. В. (2020). Разработка комбинированного сорбента для стабилизации коллоидной системы напитков брожения. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 4(13), 103–110. [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4\(50\)-103-110](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-103-110). EDN: <https://elibrary.ru/FKKMND>
 10. Bartkiene, E., Schleining, G., Juodeikiene, G., Vidmantienė, D., Krungleviciute, V., Rekštyte, T., ... & Maruska, A. (2014). The influence of lactic acid fermentation on biogenic amines and volatile compounds formation in flaxseed and the effect of flaxseed sourdough on the quality of wheat bread. *LWT — Food Science and Technology*, 56(2), 445–450. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.11.033>
 11. Cao, H., Gao, F., Shen, H., Su, Q., Guan, X., Sun, Z., & Yu, Z. (2023). Influence of partial substitution of wheat flour with sprouted oat flours on physicochemical and textural characteristics of wheat bread. *Journal of Cereal Science*, 110, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103649>. EDN: <https://elibrary.ru/EGHQZE>
 12. Gu, Y., Qian, X., Sun, B., Ma, S., Tian, X., & Wang, X. (2022). Nutritional composition and physicochemical properties of oat flour sieving fractions with different particle size. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 154, 113266. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113266>. EDN: <https://elibrary.ru/VBTQYK>
 13. Kandrov, R. Kh., Bekshokov, K. S., & Bekshokova, P. A. (2024). Amaranth grain processing products as sources of plant protein, starch, fat, and antioxidant. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(2), 403–430. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-2-824>. EDN: <https://elibrary.ru/DHZGBY>
 14. Kaur, M., Kaur, R., & Gill, B. S. (2017). Mineral and amino acid contents of different flaxseed cultivars in relation to its selected functional properties. *Food Measure*, 11, 500–511. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9417-x>. EDN: <https://elibrary.ru/QPLYZZ>
 15. Kauser, S., Hussain, A., Ashraf, S., Fatima, G., Ambreen, Javaria, S., ... & Korma, S. A. (2024). Flaxseed (*Linum usitatissimum*); phytochemistry, pharmacological characteristics and functional food applications. *Food Chemistry Advances*, 4, 100573. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100573>. EDN: <https://elibrary.ru/UMVZPF>
 16. Martínez-Villaluenga, C., & Peñas, E. (2017). Health benefits of oat: Current evidence and molecular mechanisms. *Current Opinion in Food Science*, 14, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.01.004>

17. Mel, R., & Malalgoda, M. (2021). Oat protein as a novel protein ingredient: Structure, functionality, and factors impacting utilization. *Cereal Chemistry*, 99(1), 21–36. <https://doi.org/10.1002/cche.10488>. EDN: <https://elibrary.ru/YSPHYA>
18. Nieto-Nieto, T. V., Wang, Y. X., Ozimek, L., & Chen, L. (2015). Inulin at low concentrations significantly improves the gelling properties of oat protein—A molecular mechanism study. *Food Hydrocolloids*, 50, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.03.031>
19. Noreen, S., Tufail, T., Bader Ul Ain, H., Ali A., Aadil, R. M., Nemat, A., & Manzoor, M. F. (2023). Antioxidant activity and phytochemical analysis of fennel seeds and flaxseed. *Food Sci Nutr*, 11(3), 1309–1317. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3165>. EDN: <https://elibrary.ru/FEGXMG>
20. Nowak, W., & Jeziorek, M. (2023). The role of flaxseed in improving human health. *Healthcare*, 11(3), 395. <https://doi.org/10.3390/healthcare11030395>. EDN: <https://elibrary.ru/MSVAZT>
21. Plissonneau, C., Sivignon, A., Chassaing, B., Capel, F., Martin, V., Etienne, M., ... & Barnich, N. (2022). Beneficial effects of linseed supplementation on gut mucosa-associated microbiota in a physically active mouse model of Crohn's disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(11), 5891. <https://doi.org/10.3390/ijms23115891>. EDN: <https://elibrary.ru/AEYUYV>
22. Rizvi, Q.-H., Shams, R., Pandey, V. K., Dar, A. H., Tripathi, A., & Singh, R. (2022). A descriptive review on nutraceutical constituents, detoxification methods and potential health benefits of flaxseed. *Applied Food Research*, 2(2), 100239. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100239>. EDN: <https://elibrary.ru/ZVKLID>
23. Saka, M., Özkaya, B., & Saka, İ. (2021). The effect of bread-making methods on functional and quality characteristics of oat bran blended bread. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 26, 100439. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100439>. EDN: <https://elibrary.ru/ABVJYR>
24. Sharma, M., Dadhwal, K., Gat, Y., Kumar, V., Panghal, A., Prasad, R., ... & Gat, P. (2019). A review on newer techniques in extraction of oleaginous flaxseed constituents. *OCL*, 26, 14. <https://doi.org/10.1051/ocl/2019006>
25. Yang, J., Duan, Y., Zhang, H., Huang, F., Wan, C., Cheng, C., ... & Deng, Q. (2023). Ultrasound coupled with weak alkali cycling-induced exchange of free sulfhydryl-disulfide bond for remodeling interfacial flexibility of flaxseed protein isolates. *Food Hydrocolloids*, 140, 108597. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108597>. EDN: <https://elibrary.ru/TOVBKX>
26. Zhong, L., Ma, N., Wu, Y., Zhao, L., Ma, G., Pei, F., & Hu, Q. (2019). Characterization and functional evaluation of oat protein isolate-*Pleurotus ostreatus* β -glucan conjugates formed via Maillard reaction. *Food Hydrocolloids*, 87, 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.034>. EDN: <https://elibrary.ru/VILHAW>

References

1. Alekhina, N. N., Ponomareva, E. I., Zharkova, I. M., & Grebenshchikov, A. V. (2021). Evaluation of the functional properties and safety indicators of grain bread with amaranth flour. *Tekhnika i Tekhnologiya Pishchevykh Proizvodstv* [Technique and Technology of Food Production], 51(2), 323–332. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-323-332>. EDN: <https://elibrary.ru/BSQLEY>
2. GOST 21094-2022. *Bakery products. Methods for determining moisture content*. Moscow: Publishing House of Standards, 2022. 11 p.
3. GOST 5669-96. *Bakery products. Method for determining porosity*. Moscow: Publishing House of Standards, 2006. 2 p.
4. GOST 5670-96. *Bakery products. Methods for determining acidity*. Moscow: Publishing House of Standards, 1997. 5 p.
5. GOST 58233-2018. *Wheat flour bread. Specifications*. Moscow: Publishing House of Standards, 2019. 14 p.
6. Zharkova, I. M., Roslyakov, Yu. F., & Ivanchikov, D. S. (2023). Spontaneous (natural) fermentation starters: features of the technology and their role in modern bakery production. *Tekhnika i Tekhnologiya Pishchevykh Proizvodstv* [Technique and Technology of Food Production], 53(3), 525–544. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>. EDN: <https://elibrary.ru/LQEJER>
7. Kandrov, R. Kh., Katin, S. A., Sivtsev, A. O., Ver'miev, D. N., & Pestova, E. V. (2025). Use of whole-ground wheat-triticale flour for the production of bakery products. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 518–543. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1084>. EDN: <https://elibrary.ru/ZPRLTT>
8. Kolpakova, D. E. (2025). Potential of plant raw materials in functional breadmaking. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Pishcheve i Biotekhnologii* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology], 13(1), 19–29. <https://doi.org/10.14529/food250103>. EDN: <https://elibrary.ru/EAYZUK>
9. Trusova, M. M., & Pavlova, O. V. (2020). Development of a combined sorbent for stabilizing the colloidal system of fermented beverages. *Pishchevaya Promyshlennost': Nauka i Tekhnologii* [Food Industry: Science and Technology], 4(13), 103–110. [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4\(50\)-103-110](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-103-110). EDN: <https://elibrary.ru/FKKMND>
10. Bartkiene, E., Schleining, G., Juodeikiene, G., Vidmantienė, D., Krungleviciute, V., Rekštyte, T., ... & Maruska, A. (2014). The influence of lactic acid fermentation on biogenic amines and volatile compounds formation in flaxseed and the effect of flaxseed sourdough on the quality of wheat bread. *LWT — Food Science and Technology*, 56(2), 445–450. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.11.033>

11. Cao, H., Gao, F., Shen, H., Su, Q., Guan, X., Sun, Z., & Yu, Z. (2023). Influence of partial substitution of wheat flour with sprouted oat flours on physicochemical and textural characteristics of wheat bread. *Journal of Cereal Science*, 110, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103649>. EDN: <https://elibrary.ru/EGHQZE>
12. Gu, Y., Qian, X., Sun, B., Ma, S., Tian, X., & Wang, X. (2022). Nutritional composition and physicochemical properties of oat flour sieving fractions with different particle size. *Lebensm. Wiss. Technol*, 154, 113266. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113266>. EDN: <https://elibrary.ru/VBTQYK>
13. Kandrov, R. Kh., Bekshokov, K. S., & Bekshokova, P. A. (2024). Amaranth grain processing products as sources of plant protein, starch, fat, and antioxidant. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(2), 403–430. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-2-824>. EDN: <https://elibrary.ru/DHZGBY>
14. Kaur, M., Kaur, R., & Gill, B. S. (2017). Mineral and amino acid contents of different flaxseed cultivars in relation to its selected functional properties. *Food Measure*, 11, 500–511. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9417-x>. EDN: <https://elibrary.ru/QPLYZZ>
15. Kauser, S., Hussain, A., Ashraf, S., Fatima, G., Ambreen, Javaria, S., ... & Korma, S. A. (2024). Flaxseed (*Linum usitatissimum*); phytochemistry, pharmacological characteristics and functional food applications. *Food Chemistry Advances*, 4, 100573. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100573>. EDN: <https://elibrary.ru/UMVZPF>
16. Martínez-Villaluenga, C., & Peñas, E. (2017). Health benefits of oat: Current evidence and molecular mechanisms. *Current Opinion in Food Science*, 14, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.01.004>
17. Mel, R., & Malalgoda, M. (2021). Oat protein as a novel protein ingredient: Structure, functionality, and factors impacting utilization. *Cereal Chemistry*, 99(1), 21–36. <https://doi.org/10.1002/cche.10488>. EDN: <https://elibrary.ru/YSPHYA>
18. Nieto-Nieto, T. V., Wang, Y. X., Ozimek, L., & Chen, L. (2015). Inulin at low concentrations significantly improves the gelling properties of oat protein—A molecular mechanism study. *Food Hydrocolloids*, 50, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.03.031>
19. Noreen, S., Tufail, T., Bader Ul Ain, H., Ali A., Aadil, R. M., Nemat, A., & Manzoor, M. F. (2023). Antioxidant activity and phytochemical analysis of fennel seeds and flaxseed. *Food Sci Nutr*, 11(3), 1309–1317. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3165>. EDN: <https://elibrary.ru/FEGXMG>
20. Nowak, W., & Jeziorek, M. (2023). The role of flaxseed in improving human health. *Healthcare*, 11(3), 395. <https://doi.org/10.3390/healthcare11030395>. EDN: <https://elibrary.ru/MSVAZT>
21. Plissonneau, C., Sivignon, A., Chassaing, B., Capel, F., Martin, V., Etienne, M., ... & Barnich, N. (2022). Beneficial effects of linseed supplementation on gut muco-

- sa-associated microbiota in a physically active mouse model of Crohn's disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(11), 5891. <https://doi.org/10.3390/ijms23115891>. EDN: <https://elibrary.ru/AEYUYV>
22. Rizvi, Q.-H., Shams, R., Pandey, V. K., Dar, A. H., Tripathi, A., & Singh, R. (2022). A descriptive review on nutraceutical constituents, detoxification methods and potential health benefits of flaxseed. *Applied Food Research*, 2(2), 100239. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100239>. EDN: <https://elibrary.ru/ZVKLID>
23. Saka, M., Özkaya, B., & Saka, İ. (2021). The effect of bread-making methods on functional and quality characteristics of oat bran blended bread. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 26, 100439. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100439>. EDN: <https://elibrary.ru/ABVJYR>
24. Sharma, M., Dadhwal, K., Gat, Y., Kumar, V., Panghal, A., Prasad, R., ... & Gat, P. (2019). A review on newer techniques in extraction of oleaginous flaxseed constituents. *OCL*, 26, 14. <https://doi.org/10.1051/ocl/2019006>
25. Yang, J., Duan, Y., Zhang, H., Huang, F., Wan, C., Cheng, C., ... & Deng, Q. (2023). Ultrasound coupled with weak alkali cycling-induced exchange of free sulfhydryl-disulfide bond for remodeling interfacial flexibility of flaxseed protein isolates. *Food Hydrocolloids*, 140, 108597. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108597>. EDN: <https://elibrary.ru/TOVBKX>
26. Zhong, L., Ma, N., Wu, Y., Zhao, L., Ma, G., Pei, F., & Hu, Q. (2019). Characterization and functional evaluation of oat protein isolate-*Pleurotus ostreatus* β -glucan conjugates formed via Maillard reaction. *Food Hydrocolloids*, 87, 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.034>. EDN: <https://elibrary.ru/VILHAW>

ВКЛАД АВТОРОВ

Колпакова Д.Е.: разработка концепции исследования, формулировка ключевых целей и задач; проведение исследований, подготовка и редактирование текста рукописи.

Naik A.: проведение исследований, подготовка текста рукописи.

Плешивцев И.И.: проведение исследований, подготовка текста рукописи.

Милентьева И.С.: проведение статистического анализа, редактирование статьи с целью повышения ее научной значимости.

Асякина Л.К.: редактирование статьи с целью повышения ее научной значимости, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Daria E. Kolpakova: development of the research concept, formulation of key goals and objectives; conducting research, preparation, and editing of the manuscript text.

Adarsh Naik: conducting research, preparation of the manuscript text.

Ivan I. Pleshivtsev: conducting research, preparation of the manuscript text.

Irina S. Milentyeva: conducting statistical analysis, editing the article to enhance its scientific significance.

Lyudmila K. Asyakina: editing the article to enhance its scientific significance, approval of the final version of the article for publication.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Колпакова Дарья Евгеньевна, аспирант, младший научный сотрудник молодежной лаборатории НИУ, ассистент кафедры бионанотехнологии
*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Российская Федерация
kolpakova1205@mail.ru*

Adarsh Naik, аспирант
*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Российская Федерация
tinkforeveradarshh@gmail.com*

Плешивцев Иван Игоревич, аспирант
*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Российская Федерация
ivanpleshivsev@gmail.com*

Милентьева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры бионанотехнологии, заведующий молодежной лабораторией
*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Российская Федерация
irazumnikova@mail.ru*

Асякина Людмила Константиновна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры бионанотехнологии, заведующий молодежной лабораторией
*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Российская Федерация
alk_kem@kemsu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Daria E. Kolpakova, Postgraduate Student, Junior Research Fellow at the Youth Laboratory, Assistant at the Department of Bionanotechnology
Kemerovo State University

6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation
kolpakova1205@mail.ru
SPIN-code: 5576-4258
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8508-3372>
Scopus Author ID: 58860788800

Adarsh Naik, Postgraduate Student

Kemerovo State University
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation
tinkforeveradarshh@gmail.com

Ivan I. Pleshivtsev, Postgraduate Student at the Department of Bionanotechnology

Kemerovo State University
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation
ivanpleshivsev@gmail.com
SPIN-code: 5774-4748
ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-4085-4045>

Irina S. Milentyeva, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Bionanotechnology, Head of the Youth Laboratory

Kemerovo State University
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation
irazumnikova@mail.ru
SPIN-code: 8227-2844
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3536-562X>
Scopus Author ID: 57041280000

Lyudmila K. Asyakina, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Bionanotechnology, Head of the Youth Laboratory

Kemerovo State University
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation
alk_kem@kemsu.ru
SPIN-code: 4479-3384
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4988-8197>
Scopus Author ID: 57041180800

Поступила 05.10.2025

После рецензирования 09.11.2025

Принята 12.11.2025

Received 05.10.2025

Revised 09.11.2025

Accepted 12.11.2025

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1409](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1409)EDN: [VNLAVZ](https://www.edn.ru/VNLAVZ)

УДК 636.92.085



Анализ переваримости кормов у дикого и фермерского соболя (*Martes zibellina*) в Якутии (Северо-Восточная Азия)

Н.Н. Захарова¹, В.Б. Кудрявцев², Е.С. Захаров¹¹Северо-Восточный федеральный университет, Якутск, Российская Федерация²ООО «ЗПЗ Савватьево», Савватьево, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Якутия всегда славилась традициями разведения серебристо-черной лисицы, белого (полярного) и «голубого» (вуалевого) песца, однако промышленное разведение соболей в республике не практиковалось. Одной из главных проблем звероводства здесь всегда было обеспечение дешевыми высококалорийными кормами. В период СССР кормовая база якутского звероводства обеспечивалась при мощной государственной поддержке. Большие расходы на корма оправдывались высоким спросом и стоимостью пушнины. В современный период конъюнктура мехового рынка существенно изменилась, упал спрос и рыночная цена на пушнину, подорожали корма. Снижение рентабельности зверохозяйств определило необходимость изменений в традиционной системе кормления пушных зверей.

Цель – представленная работа посвящена сравнительному анализу питательности и переваримости кормов фермерского и дикого соболя в условиях Якутии.

Материалы и методы. Материал по кормлению фермерского и дикого соболя был собран в октябре 2023–2024 гг. на звероферме ООО «Покровская звероферма» Республика Саха (Якутия). Химический состав и питательная ценность кормов анализировалась в ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Расчет переваримости кормов проводился по разнице количества питательных веществ (белков, жиров и углеводов) в кормах и в их экскрементах.

Результаты. В природных популяциях соболь выраженный полифаг, что способствует устойчивости популяций этого вида, особенно в суровых условиях северной Азии. На звероферме кормовая смесь приготавливается из отходов мясорыбоперерабатывающих предприятий и из павших сельскохозяйственных животных, комби-

кормов. Переваримость кормов фермерскими соболями, при разведении в Якутии, была сопоставима с показателями у соболей из хозяйств других регионов России: сырого протеина – 83,8-90,2%, жира – 92,3-96,5% и углеводов – 67,7-74,0%. Данные сравнительного анализа переваримости кормов у диких и фермерских соболей свидетельствуют о более высокой усваиваемости питательных веществ domesticированной формой. Вероятно, в условиях клеточного разведения, шел отбор на форму с более эффективным пищеварением и высоким коэффициентом конверсии корма.

Ключевые слова: соболь; *Martes zibellina*; Якутия; соболеводство; переваримость корма; питательность корма

Для цитирования. Захарова, Н. Н., Кудрявцев, В. Б., & Захаров, Е. С. (2026). Анализ переваримости кормов у дикого и фермерского соболя (*Martes zibellina*) в Якутии (Северо-Восточная Азия). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 579–592. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1409>

Analysis of Feed Digestibility in Wild and Farmed Sable (*Martes zibellina*) in Yakutia (Northeast Asia)

N.N. Zakharova¹, V.B. Kudryavtsev², E.S. Zakharov¹

¹North-Eastern Federal University in Yakutsk, Yakutsk, Russian Federation

²Zveroplenzavod Savvatevo LLC, Savvatevo, Russian Federation

Abstract

Background. Yakutia has always been famous for its traditions of breeding silver-black foxes, white (polar) and “blue” (veil) arctic foxes, but industrial breeding of sables has not been practiced in the republic. One of the main problems of fur farming here has always been the provision of cheap high-calorie feed. During the Soviet period, the forage base of Yakut fur farming was provided with powerful state support. Large expenditures on forage were justified by the high demand and cost of furs. In the modern period, the fur market situation has changed significantly, the demand and market price for furs have fallen, and forage has become more expensive. The decline in the profitability of fur farms has determined the need for changes in the traditional system of feeding fur animals.

Purpose. The presented work is devoted to a comparative analysis of the nutritional value and digestibility of feed for farmed and wild sable in the conditions of Yakutia.

Materials and methods. The material on feeding farmed and wild sable was collected in October 2023-2024 at the fur farm of Pokrovskaya Fur Farm LLC, Republic of Sakha (Yakutia). The chemical composition and nutritional value of the feed was analyzed at the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry and Animal Science. The digestibility of the feed was calculated based on the difference in the

amount of nutrients (proteins, fats, and carbohydrates) in the feed and in their excrement.

Results. In natural populations, the sable is a pronounced polyphagous, which contributes to the stability of the populations of this species, especially in the harsh conditions of northern Asia. At the fur farm, the feed mixture is prepared from waste from meat and fish processing plants and from dead farm animals, compound feed. The digestibility of feed by farmed sables bred in Yakutia was comparable to that of sables from farms in other regions of Russia: crude protein – 83.8-90.2%, fat – 92.3-96.5% and carbohydrates – 67.7-74.0%. The data of comparative analysis of digestibility of feeds in wild and farmed sables indicate a higher assimilation of nutrients by the domesticated form. Probably, under conditions of cage breeding, there was selection for a form with more effective digestion and a high feed conversion coefficient.

Keywords: sable; *Martes zibellina*; Yakutia; sable breeding; feed digestibility; feed nutritional value

For citation. Zakharova, N. N., Kudryavtsev, V. B., & Zakharov, E. S. (2026). Analysis of Feed Digestibility in Wild and Farmed Sable (*Martes zibellina*) in Yakutia (Northeast Asia). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 579–592. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1409>

Введение

Якутия всегда славилась традициями разведения серебристо-черной лисы, белого (полярного) и «голубого» (вуалевого) песца, однако промышленное разведение соболей здесь не практиковалось (Веселов, 1955; Буковская, 1999).

Фермерского соболеводство в республике начали развивать в 2000-х годах, когда спрос на длинноволосый мех лисы и песца резко снизился. Для создания маточного поголовья соболи были завезены из звероферм европейской части России и юга Сибири. На начальном этапе, вероятно, под воздействием суровых климатических условий, основные показатели оборота стада находились на уровне природных популяций Якутии. Ожидаемая плодовитость была близка к средним значениям этого признака в природе, что соответствует нижнему уровню плодовитости фермерского соболя (Захаров и др., 2024). Содержащиеся в стандартных вольерах соболи тяжело переносили наиболее холодные периоды якутской зимы. В большие морозы зверьки основное время проводили в утепленных домиках, покидали их только на период кормления. Крайне суровые зимние температурные условия региона требуют качественного сбалансированного кормления этих хищников. Особенности питания этого хищника в природных популяциях Якутии сравнительно хорошо изучены (Захаров и др., 2016; и др.), однако большого научно-практического задела по кормле-

нию фермерского соболя в регионе нет. Исследования, связанные с оптимизацией и повышением, качества кормления пушных зверей в условиях Якутии немногочисленны, в основном посвящены различным адаптогенам (Скрябина, Черкашина, 2020; Новикова и др., 2021; Черкашина, Черкашина, 2022; Черкашина, 2023). Обеспечение высокопитательными дешевыми кормами остается одной из главных проблем современного пушного звероводства в Якутии. В период СССР кормовая база якутского звероводства обеспечивалась при мощной государственной поддержке. Большие расходы на корма оправдывались высоким спросом и стоимостью пушнины. В современный период конъюнктура мехового рынка существенно изменилась, упал спрос и рыночная цена на пушнину, подорожали корма. Снижение рентабельности зверохозяйств определило необходимость изменений в традиционной системе кормления пушных зверей.

Представленная работа посвящена сравнительному анализу питательности и переваримости кормов фермерского и дикого соболя в Якутии.

Материал и методы

Материал по кормлению фермерского и дикого соболя был собран в октябре 2023 года и марте-апреле 2024 года на звероферме ООО «Покровская звероферма» Республика Саха (Якутия), расположенной в 75 км южнее г. Якутска. Для зоотехнического анализа, характеристики питательности и перевариваемости кормов на звероферме были отобраны пробы кормовой смеси и экскрементов соболей. Также для сравнительного анализа питания фермерских и диких соболей, в природе были отловлены мышевидные грызуны. Для получения данных по переваримости кормов у трех соболей в течение трех дней перед кормлением корм взвешивался. Под клетками соболей выкладывались поддоны, в которые собирались все экскременты в течение трех суток и также взвешивались. Кроме корма соболей кормили лабораторными мышами и крысами, полученными в виварии Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова и республиканском зоопарке им. В.Г. Алексеева «Орто-дойду». Ежесуточно, после кормления мышевидными грызунами также собирались экскременты и взвешивались. Пробы анализировались в химико-аналитической лаборатории Федерального исследовательского центра «Всероссийский институт животноводства им. Л.К. Эрнста». Расчет переваримости кормов проводился по разнице количества питательных веществ (белков, жиров и углеводов) в кормах, съеденных соболями за 3 суток и в их экскрементах.

Состав кормов в природных популяциях соболя Якутии приведен по данным предыдущих наших исследований (Захаров и др., 2016).

Результаты

Кормление фермерских соболей на звероферме ООО «Покровская звероферма» производится один раз в сутки, в 8.00-8.30 часов утра. Кормовая смесь готовится в кормовом цеху и развозится по шедам. Раскладка корма производится звероведами вручную внутрь выгула на деревянную дощечку.

Корма на звероферму поступают в виде мясных отходов из республиканских животноводческих хозяйств (СХПК «Хатасский», «Якутская птицефабрика» и др.) и в виде отходов переработки рыбы с предприятий Дальнего Востока и республики. Также мясо от павших сельскохозяйственных животных поставляет местное население. Мясное и рыбное кормовое сырье хранится в ледниках зверофермы. Зерновые поступают в виде комбикормов.

В Якутии широко распространено использование в пищу внутренностей и внутренних органов сельскохозяйственных животных, что наряду с малочисленностью населения и отдаленностью от крупных мясо- и рыбоперерабатывающих комбинатов существенно ограничивает возможности заготовки дешевого местного кормового сырья для пушных зверей.

Результаты исследований химического состава кормов и питательной ценности представлены в таблице 1. В рационах зверохозяйства ООО «Покровское» в марте содержание белка составляло – 88,1 г/кг, жира – 45,5 г/кг, углеводов – 48,5 г/кг, в октябре – 66,7 г, 158,2 г и 53,0 г соответственно. В кормовых смесях наблюдался, по сравнению с нормами кормления клеточных соболей (Нормы кормления ..., 2007; Перельдик и др., 1987), недостаток белка в 1,3–1,5 раза и углеводов в 1,2–1,4 раза, количество жира напротив было выше нормы – в марте в 1,2 раза, в октябре в 3 раза.

Кормовая смесь и мышевидные грызуны (корм сходный с пищей соболей в природной среде) существенно различаются по основным показателям. Мышевидные грызуны были значительно богаче протеином по сравнению с кормосмесью, но уступали в жирах. Также наблюдается существенная разница в содержании клетчатки между мышевидными грызунами и октябрьской кормовой смесью.

Данные переваримости кормовой смеси зверофермы ООО «Покровская звероферма» и мышевидных грызунов (корм природных популяций) у фермерского и дикого соболя представлены в таблице 2. Полученные данные демонстрируют сравнительно высокую переваримость корма у фермерского соболя по сравнению с диким, в том числе основных традиционных кормов в природе – мышевидных грызунов. Различия особенно заметны при оценке переваримости кормовой смеси, насыщенной углево-

дами. Разница по переваримости белка и БЭВ может свидетельствовать об отборе зверей в условиях клеточного разведения на конверсию корма, на более эффективное использование питательных веществ.

Таблица 1.

Результаты анализа кормов (химический состав и питательная ценность)**Table 1. Feed Analysis Results (Chemical Composition and Nutritional Value)**

Показатели питательной ценности	Кормление мышевидными грызунами			Кормление кормовой смесью 2023 г		Кормление кормовой смесью 2024 г			НД на методы испытаний
	Мышевидные грызуны	Экскременты фермерский	Экскременты дикий	Кормосмесь октябрь 2023	Экскременты фермерский	Кормосмесь март 2024	Экскременты фермерский	Экскременты дикий	
Первоначальная влага, г/кг	697,1	523,4	502,1	728,7	680,6	679,1	701,5	639,1	ГОСТ Р 54951-2012
Воздушно-сухое вещество, г/кг	302,9	476,6	497,9	271,3	319,4	320,9	298,5	360,9	ГОСТ 31640-2012
Протеин, г/кг	144,45	193,79	225,05	88,09	52,64	66,84	56,36	97,48	ГОСТ 13496.4-2019
Жир, г/кг	41,47	12,06	15,53	45,52	21,37	158,2	31,9	34,94	ГОСТ 32905-2014
Клетчатка, г/кг	8,15	13,25	0	30,28	32,84	5,42	32,81	15,84	ГОСТ 31675-2012
БЭВ, г/кг в т.ч.	33,65	72,4	51,48	48,48	84,61	53,04	104,71	99,57	Расчетным методом
Зола, г/кг	36,08	146,65	160,97	33,37	98,89	20,51	82,39	88,42	ГОСТ 32933-2014
Кальций, г/кг	9,44	46,68	52,81	9,31	28,94	5,78	27,59	28,43	ГОСТ 32904-2014
Фосфор, г/кг	5,56	18,18	21,28	2,98	13,47	2,3	9,83	10,47	ГОСТ 26657-97
Магний, г/кг	0,56	1,36	1,66	0,63	1,92	0,27	1,34	1,43	Определение общего магния с титановым желтым
Валовая энергия, МДж/кг	5,77	6,51	6,8	5,24	4,1	8,85	3,81	5,65	Расчетным методом
Обменная энергия, МДж/кг	4,11	4,29	4,83	3,43	2,05	5,85	1,59	3,06	Расчетным методом
ЭКЕ	0,41	0,43	0,48	0,34	0,21	0,59	0,16	0,31	Расчетным методом
Переваримый протеин, г/кг	115,56	164,72	191,29	70,47	42,11	57,8	47,91	82,86	Расчетным методом

Таблица 2.

Расчет переваримости кормов у фермерского и дикого соболя

Table 2. Calculation of Feed Digestibility in Farm-Raised and Wild Sable

№			I эксперимент					переваримость пит. в-в, %
			кол-во кормо дней	кол-во питательных в-в				
				всего в корме	корма на 1 го- лову в сутки	всего в экс- кре-ментах	на 1 голову в сутки	
1	Фермерский соболь	Количество корма (мышь и крысы лабораторные)	9	1200	133,3	145	16,1	
		протеин (г/кг)		144,5	19,3	193,8	3,1	83,8
		жир (г/кг)		41,5	5,5	12,1	0,2	96,5
		БЭВ (г/кг)		33,7	4,5	72,4	1,2	74,0
2	Фермерский соболь	Кол-во в кормосмеси 1	3	450	150,0	73,7	24,6	
		протеин (г/кг)		66,8	10,0	56,4	1,4	86,2
		жир (г/кг)		158,2	23,7	31,9	0,1	96,7
		БЭВ (г/кг)		53,0	8,0	104,7	2,6	67,7
3	Фермерский соболь	Кол-во в кормосмеси 2	9	2150	238,9	352	39,1	
		протеин (г/кг)		88,1	21,0	52,6	2,1	90,2
		жир (г/кг)		45,5	10,9	21,4	0,8	92,3
		БЭВ (г/кг)		48,5	11,6	84,6	3,3	71,4
4	Дикий соболь	Количество корма (мышь и крысы лабораторные)	3	431	143,7	78	26,0	
		протеин (г/кг)		144,5	20,8	225,1	5,9	71,8
		жир (г/кг)		41,5	6,0	15,5	0,4	93,2
		БЭВ (г/кг)		33,7	4,8	51,5	1,3	72,3
5	Дикий соболь	Кол-во в кормосмеси 1	3	450	150,0	106,7	35,6	
		протеин (г/кг)		66,8	10,0	97,5	3,5	65,4
		жир (г/кг)		158,2	23,7	34,9	1,2	94,8
		БЭВ (г/кг)		53,0	8,0	99,6	3,5	55,5
6	Дикий соболь	Кол-во в кормосмеси 2	3	1000	333,3	237	79,0	
		протеин (г/кг)		88,1	29,4	52,6	4,2	85,8
		жир (г/кг)		45,5	15,2	21,4	1,7	88,9
		БЭВ г/кг)		48,5	16,2	84,6	6,7	58,6

Обсуждение

В природе соболь типичный полифаг, его рацион весьма разнообразен и может включать млекопитающих, птиц, рыб, насекомых, моллюсков, плоды растений, мед и др. (Захаров и др., 2016; Ткаченко, 2022; и др.). Соотношение кормов в питании обычно зависит от их обилия и доступности,

особенно в низкопродуктивных биоценозах севера Азии. Зимой соболь отдает предпочтение высококалорийным кормам, которые могут компенсировать энергетические затраты. В Якутии зимний рацион соболя преимущественно плотоядный (рис.), однако во всех природных популяциях региона отмечены и растительные корма. Наиболее высока растительность в районах произрастания кедра и кедрового стланика – в Юго-Западной и Северо-Восточной Якутии. В урожайные годы соболь до середины зимы может быть сконцентрирован в зарослях кедрового стланика, где вероятно он находит также и животный корм. Использование такого типа рационов диким соболем связано с высоким количеством жира (68,7 г в 100 г орехов, в т.ч. полиненасыщенные жиры – 34,1 г) и углеводов (13,1 г, в т.ч. крахмала и сахара – 5 г) в кедровых орехах и белка в мышевидных грызунах. На юге ареала в пище соболя нередко преобладают растительные корма (Бакеев, Курис, 1975; Бакеев и др., 2003; Черников, 2006; и др.), что свидетельствует об эволюционной способности к усвоению углеводов.

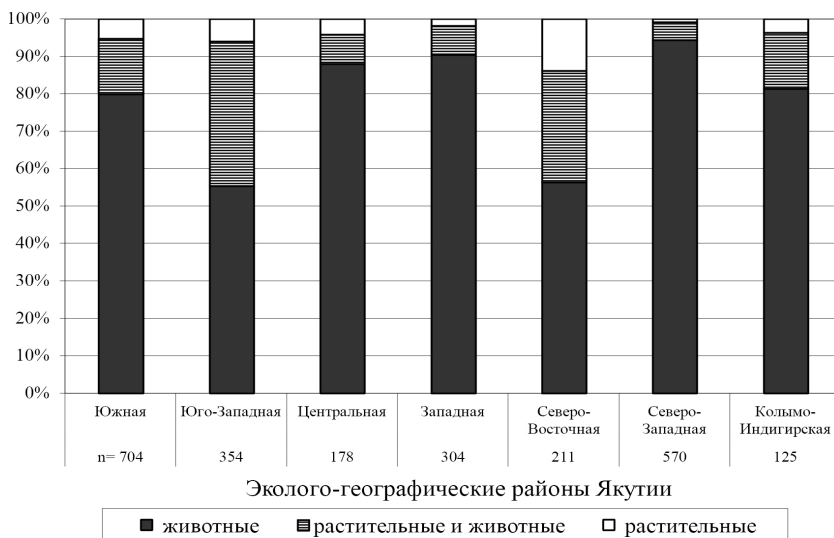


Рис. Соотношение кормов животного и растительного происхождения в зимнем питании соболя Якутии

Fig. Ratio of animal- and plant-based foods in the winter diet of the Yakutian sable

В процессе domestikации у животных произошли существенные изменения в поведении, морфологии и физиологии по сравнению с их дикими предками (Dugatkin, 2018; Ahmad et al., 2020; Hecht et al., 2021).

Для хищных млекопитающих известно изменение пищеварительной системы в процессе доместикации. Адаптации, позволившие ранним предкам собак питаться пищей, богатой крахмалом, по сравнению с плотоядным рационом волков, стали решающим шагом в одомашнивании (Axelsson et al., 2013; Liu et al., 2021). В процессе промышленной доместикации американской норки, также происходил отбор на форму с более эффективным гидролизом углеводов. Фермерские американские норки отличаются более высокой активностью фермента амилазы от диких собратьев (Свечкина, Тютюнник, 2007). Активность пищеварительных ферментов отличается у норок с агрессивным и "ручным" типами поведения по отношению к человеку (Калинина и др., 2022).

Переваримость питательных веществ кормов клеточными якутскими соболями аналогична у соболей из хозяйств других регионов России. В зависимости от состава рационов перевариваемость сырых органических питательных веществ у фермерского соболя в среднем составляет – 76-85%, в т.ч. протеин – 80-87%, сырой жир – 90-96%, углеводы – 70-85% (Нормы кормления ..., 2007). Результаты наших исследований по переваримости кормов клеточными соболями, при разведении в Якутии, были аналогичны – сырого протеина – 83,8-90,2%, жира – 92,3-96,5% и углеводов – 67,7-74,0%. Кормовая смесь ООО «Покровская звероферма» из-за ограниченности кормовой базы Республики Саха (Якутия) несколько уступала нормам кормления соболей в период воспроизводства (ноябрь-май) и в период роста молодняка (июнь-октябрь), а также по уровню протеина в мышевидных грызунах, использованных в контрольном опыте (Перельдик и др., 1986; Нормы кормления ..., 2007). Несоблюдение норм кормления соболя может приводить к снижению выхода щенков и ухудшению товарного качества мехового покрова.

Заключение

В природных популяциях соболь использует в пищу широкий спектр животных и растительных кормов. Полифагия способствует устойчивости популяций этого вида, особенно в суровых условиях северной Азии. Рацион хищника обычно зависит от обилия и доступности вида корма, а в зимний период определенное значение имеет его энергетическая ценность. Нередко соболи могут переходить на преобладающее питание растительными кормами.

Данные сравнительного анализа переваримости кормов у диких и фермерских соболей свидетельствуют о более высокой усваиваемости пи-

тательных веществ доместичированной формой. Вероятно, в условиях клеточного разведения, шел отбор на форму с более эффективным пищеварением и соответственно более высоким коэффициентом конверсии корма.

Обеспечение высокопитательными дешевыми кормами является главной проблемой фермерского соболеводства Якутии, без решения которой невозможно интенсивное развитие отрасли в регионе. Полноценное кормление имеет определяющее значение для здоровья маточного поголовья и качества воспроизводственных показателей, влияет на товарные свойства мехового покрова.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00072, <https://rscf.ru/project/23-26-00072/>

Список литературы

1. Бакеев, Н. Н., & Курис, Н. М. (1975). Растительность соболя и ее возможное влияние на воспроизводительность и численность популяций. *Тр. ВНИИ-ОЗ*, (25), 46–58.
2. Бакеев, Н. Н., Монахов, Г. И., & Сеницын, А. А. (2003). *Соболь*. Вятка.
3. Буковская, З. И. (1999). *Пушное звероводство Якутии*. Якутск: Сахаполиграфиздат.
4. Веселов, В. И. (1955). *Колхозное звероводство в Якутии*. Якутск: Якутское книжное издательство.
5. Захаров, Е. С., Саввина, М. С., Васильев, М. Э., Корякина, Л. П., & Захарова, Н. Н. (2024). К соболеводству в Якутии. *Кролиководство и звероводство*, (6), 4–10. https://doi.org/10.52178/00234885_2024_6_4. EDN: <https://elibrary.ru/XLRWRK>
6. Захаров, Е. С., Сафронов, В. М., & Павлова, А. И. (2016). Зимнее питание соболя (*Martes zibellina* L.) в Якутии. *Достижения науки и техники АПК*, 30(11), 82–87. EDN: <https://elibrary.ru/XRUVAX>
7. Калинина, С. Н., Илюха, В. А., Трапезов, О. В., Морозов, А. В., Трапезова, Л. И., Некрасова, М. А., Степанова, М. А., & Сысоева, Е. А. (2022). Активность пищеварительных ферментов у американских норок (*Neovison vison*) при отборе на агрессивное и ручное поведение. *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*, 58(1), 61–68. <https://doi.org/10.31857/S0044452922010028>. EDN: <https://elibrary.ru/QMJKXI>
8. Новикова, Н. Н., Черкашина, А. Г., & Скрыбина, Т. Н. (2021). Применение лимонника китайского в кормлении молодняка лисиц в условиях Якутии. *Кролиководство и звероводство*, (2), 21–28. https://doi.org/10.52178/00234885_2021_2_21. EDN: <https://elibrary.ru/IBASCO>

9. Нормы кормления и нормативы затрат кормов для пушных зверей и кроликов (2007). РАСХН ГНУ НИИ ПЗК.
10. Перельдик, Н. Ш., Милованов, Л. В., & Ерин, А. Т. (1987). *Кормление пушных зверей*. Москва: Агропромиздат.
11. Свечкина, Е. Б., & Тютюнник, Н. Н. (2007). Изменение в ходе промышленной доместики активности пищеварительных ферментов у различных генотипов американской норки (*Mustela vison* Schreber, 1777). *Информационный вестник ВОГуС*, 11(1), 99–108. EDN: <https://elibrary.ru/IBVJOV>
12. Скрыбина, Т. Н., & Черкашина, А. Г. (2020). Рост и развитие молодняка лисиц в условиях Центральной Якутии при использовании лимонника китайского. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, (163), 169–178. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-163-013>. EDN: <https://elibrary.ru/VNCVGG>
13. Ткаченко, К. Н. (2022). Питание соболя (*Martes zibellina*, CARNIVORA, MUSTELIDAE) в разные сезоны года в Большехехцирском заповеднике (Хабаровский край). *Зоологический журнал*, 101(6), 709–717. <https://doi.org/10.31857/S0044513422040110>. EDN: <https://elibrary.ru/QRFCCC>
14. Черкашина, А. Г. (2023). Янтарная кислота в соболеводстве Республики Саха (Якутия). *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*, (4), 90–92. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/4/90-92>. EDN: <https://elibrary.ru/DOPRRP>
15. Черкашина, А. Г., & Черкашина, М. И. (2022). Сохранность соболей в условиях МУП «Золотинка» Республики Саха (Якутия) при использовании адаптогенов. *Научный журнал КубГАУ*, (177), 297–305. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-177-019>. EDN: <https://elibrary.ru/PDYIRP>
16. Черников, Е. М. (2006). *Экология соболя (Martes zibellina) Lunneus, 1758 в Баргузинском заповеднике*. Улан-Удэ: Издательство Бурятского госуниверситета.
17. Ahmad, H. I., Ahmad, M. J., Jabbir, F., Ahmar, S., Ahmad, N., Elokil, A. A., & Chen, J. (2020). The domestication makeup: Evolution, survival, and challenges. *Front. Ecol. Evol.*, (8), 103. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00103>. EDN: <https://elibrary.ru/MPYCEF>
18. Axelsson, E., Ratnakumar, A., Arendt, M.-L., Maqbool, K., Webster, M. T., Perloski, M., Liberg, O., Arnemo, J. M., Hedhammar, A., & Lindblad-Toh, K. (2013). The genomic signature of dog domestication reveals adaptation to a starch-rich diet. *Nature*, (495), 360–364. <https://doi.org/10.1038/nature11837>. EDN: <https://elibrary.ru/RKFAWP>
19. Dugatkin, L. A. (2018). The silver fox domestication experiment. *Evo Edu Outreach*, (11), 16. <https://doi.org/10.1186/s12052-018-0090-x>. EDN: <https://elibrary.ru/YHUZZF>
20. Hecht, E. E., Kukekova, A. V., Gutman, D. A., Acland, G. M., Preuss, T. M., & Trut, L. N. (2021). *Journal of Neuroscience*, 41(28), 6144–6156. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3114-20.2021>. EDN: <https://elibrary.ru/QFJJCUC>

21. Liu, Y., Liu, B., Liu, C., Hu, Y., Liu, C., Li, X., Li, X., Zhang, X., Irwin, D. M., Wu, Z., Chen, Z., Jin, Q., & Zhang, S. (2021). Differences in the gut microbiomes of dogs and wolves: Roles of antibiotics and starch. *BMC Veterinary Research*, (17), 112. EDN: <https://doi.org/10.1186/s12917-021-02815-y>. EDN: <https://elibrary.ru/WUEKNU>

References

1. Bakeev, N. N., & Kuris, N. M. (1975). The herbivory of the sable and its possible impact on the reproductive capacity and population size. *Proceedings of VNIIOZ*, (25), 46–58.
2. Bakeev, N. N., Monakhov, G. I., & Sinitsyn, A. A. (2003). *Sable*. Vyatka.
3. Bukovskaya, Z. I. (1999). *Fur farming in Yakutia*. Yakutsk: Sakhapoligrafizdat.
4. Veselov, V. I. (1955). *Collective-farm fur farming in Yakutia*. Yakutsk: Yakutsk Book Publishing House.
5. Zakharov, E. S., Savvina, M. S., Vasiliev, M. E., Koryakina, L. P., & Zakharova, N. N. (2024). On sable farming in Yakutia. *Rabbit and Fur Farming*, (6), 4–10. https://doi.org/10.52178/00234885_2024_6_4. EDN: <https://elibrary.ru/XLRWRK>
6. Zakharov, E. S., Safronov, V. M., & Pavlova, A. I. (2016). Winter diet of the sable (*Martes zibellina* L.) in Yakutia. *Achievements of Science and Technology of AIC*, 30(11), 82–87. EDN: <https://elibrary.ru/XRUVAX>
7. Kalinina, S. N., Ilyukha, V. A., Trapezov, O. V., Morozov, A. V., Trapezova, L. I., Nekrasova, M. A., Stepanova, M. A., & Sysoeva, E. A. (2022). Activity of digestive enzymes in American minks (*Neovison vison*) during selection for aggressive and tame behavior. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 58(1), 61–68. <https://doi.org/10.31857/S0044452922010028>. EDN: <https://elibrary.ru/QMJKXI>
8. Novikova, N. N., Cherkashina, A. G., & Skryabina, T. N. (2021). Application of Chinese magnolia vine in feeding young foxes under Yakutia conditions. *Rabbit and Fur Farming*, (2), 21–28. https://doi.org/10.52178/00234885_2021_2_21. EDN: <https://elibrary.ru/IBASCO>
9. *Feeding standards and feed consumption rates for fur-bearing animals and rabbits* (2007). RASKhN GNU NII PZK.
10. Pereldik, N. Sh., Milovanov, L. V., & Erin, A. T. (1987). *Feeding of fur-bearing animals*. Moscow: Agropromizdat.
11. Svechkina, E. B., & Tyutyunnik, N. N. (2007). Changes in the activity of digestive enzymes during industrial domestication in different genotypes of the American mink (*Mustela vison* Schreber, 1777). *Information Bulletin of VOGiS*, 11(1), 99–108. EDN: <https://elibrary.ru/IBVJOV>
12. Skryabina, T. N., & Cherkashina, A. G. (2020). Growth and development of young foxes in Central Yakutia when using Chinese magnolia vine. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, (163), 169–178. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-163-013>. EDN: <https://elibrary.ru/VNCVGG>

13. Tkachenko, K. N. (2022). Diet of the sable (*Martes zibellina*, Carnivora, Mustelidae) in different seasons in the Bolshekhokhtsirsky Nature Reserve (Khabarovsk Territory). *Zoological Journal*, 101(6), 709–717. <https://doi.org/10.31857/S0044513422040110>. EDN: <https://elibrary.ru/QRFCCC>
14. Cherkashina, A. G. (2023). Succinic acid in sable farming in the Republic of Sakha (Yakutia). *Bulletin of the Russian Agricultural Science*, (4), 90–92. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/4/90-92>. EDN: <https://elibrary.ru/DOPRRP>
15. Cherkashina, A. G., & Cherkashina, M. I. (2022). Survival rate of sables under the conditions of the Municipal Unitary Enterprise “Zolotinka” in the Republic of Sakha (Yakutia) with the use of adaptogens. *Scientific Journal of KubSAU*, (177), 297–305. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-177-019>. EDN: <https://elibrary.ru/PDYIRP>
16. Chernikin, E. M. (2006). *Ecology of the sable (Martes zibellina Lunneus, 1758) in the Barguzin Nature Reserve*. Ulan-Ude: Publishing House of Buryat State University.
17. Ahmad, H. I., Ahmad, M. J., Jabbir, F., Ahmar, S., Ahmad, N., Elokil, A. A., & Chen, J. (2020). The domestication makeup: Evolution, survival, and challenges. *Front. Ecol. Evol.*, (8), 103. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00103>. EDN: <https://elibrary.ru/MPYCEF>
18. Axelsson, E., Ratnakumar, A., Arendt, M.-L., Maqbool, K., Webster, M. T., Perlo-ski, M., Liberg, O., Arnemo, J. M., Hedhammar, A., & Lindblad-Toh, K. (2013). The genomic signature of dog domestication reveals adaptation to a starch-rich diet. *Nature*, (495), 360–364. <https://doi.org/10.1038/nature11837>. EDN: <https://elibrary.ru/RKFAWP>
19. Dugatkin, L. A. (2018). The silver fox domestication experiment. *Evo Edu Outreach*, (11), 16. <https://doi.org/10.1186/s12052-018-0090-x>. EDN: <https://elibrary.ru/YHUZZF>
20. Hecht, E. E., Kukekova, A. V., Gutman, D. A., Acland, G. M., Preuss, T. M., & Trut, L. N. (2021). *Journal of Neuroscience*, 41(28), 6144–6156. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3114-20.2021>. EDN: <https://elibrary.ru/QFJJCJ>
21. Liu, Y., Liu, B., Liu, C., Hu, Y., Liu, C., Li, X., Li, X., Zhang, X., Irwin, D. M., Wu, Z., Chen, Z., Jin, Q., & Zhang, S. (2021). Differences in the gut microbiomes of dogs and wolves: Roles of antibiotics and starch. *BMC Veterinary Research*, (17), 112. <https://doi.org/10.1186/s12917-021-02815-y>. EDN: <https://elibrary.ru/WUEKNU>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Захарова Надежда Николаевна, аспирант, Институт естественных наук
Северо-Восточный федеральный университет
ул. Белинского, 58, г. Якутск, 677000, Российская Федерация
zikbrazz92@mail.ru

Кудрявцев Владимир Борисович, кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора

ООО «Звероплемзавод Савватьево»

Савватьево, Калининский р-он, Тверская обл., 170538, Российская Федерация

Kudrvb@mail.ru

Захаров Евгений Сергеевич, кандидат биологических наук, доцент эколого-географического отделения, Институт естественных наук

Северо-Восточный федеральный университет

ул. Белинского, 58, г. Якутск, 677000, Российская Федерация

zevsable@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda N. Zakharova, PhD student

North-Eastern Federal University in Yakutsk

58, Belinsky Str., Yakutsk, 677000, Russian Federation

SPIN-code: 3653-2315

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8814-9624>

Scopus Author ID: 57226354150

zikrazz92@mail.ru

Vladimir B. Kudryavtsev, PhD in Agricultural Sciences

Zveroplemzavod Savvatevo LLC

Savvatyevo, Kalinin District, Tver Region, 170538, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6090-2582>

Kudrvb@mail.ru

Evgeny S. Zakharov, PhD in Biological Sciences, Associate Professor

North-Eastern Federal University in Yakutsk

58, Belinsky Str., Yakutsk, 677000, Russian Federation

SPIN-code: 5962-1760

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4982-0301>

Scopus Author ID: 57211860198

zevsale@gmail.com

Academia.edu: <https://independent.academia.edu/EvgenyZakharov4>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Evgenii-Zakharov-2?ev=hdr_xprf

Поступила 06.09.2025

После рецензирования 30.09.2025

Принята 25.10.2025

Received 06.09.2025

Revised 30.09.2025

Accepted 25.10.2025

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1433](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1433)EDN: [WGFNGK](https://www.edn.ru/WGFNGK)

УДК 612.017.1:616.33-02.27



Анализ стейкхолдеров и потребительских предпочтений на рынке кормов для аквакультуры

М.В. Кольган, Ю.Ю. Медведева*Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Аквакультура в России активно развивается с 2014 года, обеспечивая продовольственный суверенитет страны. Рынок кормов для аквакультуры обеспечивает потребности агропродовольственного сектора. В связи с этим актуальным является идентификация заинтересованных сторон производителей кормов аквакультуры, обеспечивающая учет интересов всех участников цепи создания ценности от производителей сырья до конечных потребителей продукции аквакультуры, ориентированная на переход от простой эффективности производителей кормов к устойчивости, экологичности и прозрачности.

Цель – проведение комплексного рыночного анализа интересов ключевых стейкхолдеров и потребительских предпочтений на рынке кормов для аквакультуры с целью повышения эффективности стратегий развития и удовлетворения растущих потребностей отрасли.

Материалы и методы. В рамках исследования использовались методы кабинетного анализа отраслевой статистики, глубинных интервью с представителями бизнеса, анкетирования потребителей (фермеров и представителей малых хозяйств), а также SWOT- и PEST-анализ внешней и внутренней среды.

Результаты. В результате анализа были выделены ключевые группы стейкхолдеров (производители, дистрибьюторы, фермерские хозяйства, регуляторы и НИ-ОКР-центры) и проанализированы их интересы, влияющие на структуру спроса. Установлено, что основными критериями выбора кормов являются: биологическая эффективность, экологическая безопасность, цена и происхождение ингредиентов. Также выявлены ключевые потребительские сегменты и даны рекомендации по адаптации маркетинговых стратегий в соответствии с ними.

Ключевые слова: рынок аквакультуры; стейкхолдеры; потребительские предпочтения; корма для рыбы; устойчивое развитие; анализ рынка

Для цитирования. Кольган, М. В., & Медведева, Ю. Ю. (2026). Анализ стейкхолдеров и потребительских предпочтений на рынке кормов для аквакультуры. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 593–609. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1433>

Analysis of stakeholders and consumer preferences in the aquaculture feed market

M.V. Kolgan, Y.Y. Medvedeva

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Background. Aquaculture in Russia has seen significant growth since 2014, playing a vital role in ensuring the country's food security. The market for aquaculture feed meets the needs of the agricultural and food sector. It is therefore essential to identify the key stakeholders in the aquaculture feed industry, ensuring that all parties involved in the supply chain are taken into consideration, from raw material producers to end users. The focus should be on moving beyond mere efficiency in feed production towards sustainability, environmental responsibility, and transparency.

Purpose. Conducting a comprehensive market analysis of the interests of key stakeholders and consumer preferences in the aquaculture feed market to increase the effectiveness of development strategies and meet the growing demands of the industry.

Materials and methods. The research used the methods of desk analysis of industry statistics, in-depth interviews with business representatives, consumer surveys (farmer and small farm representatives), as well as SWOT and PEST analysis of external and internal environments.

Results. As a result of the analysis, key groups of stakeholders (manufacturers, distributors, farms, regulators, and R&D centers) were identified, and their interests influencing the structure of demand were analyzed. It was established that the main criteria for selecting feeds are biological efficiency, environmental safety, price, and origin of ingredients. Key consumer segments were also identified, and recommendations were made on adapting marketing strategies to them.

Keywords: aquaculture market; stakeholders; consumer preferences; fish feed; sustainable development; market analysis

For citation. Kolgan, M. V., & Medvedeva, Y. Y. (2026). Analysis of stakeholders and consumer preferences in the aquaculture feed market. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 593–609. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1433>

Введение

Современное развитие аквакультуры как важного сектора продовольственной безопасности требует пересмотра подходов к маркетингу, особенно в отношении кормов, играющих ключевую роль в эффективности производства. Растущий спрос на продукцию аквакультуры в условиях ограничения природных ресурсов приводит к трансформации традиционных рыночных механизмов и актуализирует необходимость комплексного анализа взаимодействий между стейкхолдерами, а также предпочтений конечных потребителей.

В 2020, 2021 и 2022 годах мировое производство продукции аквакультуры продолжало расти, несмотря на пандемию COVID-19 [1]. Темпы роста различались в зависимости от региона, страны и территории, при этом наблюдались значительные различия в масштабах производства, распределении, технологиях ведения сельского хозяйства, производительности и управлении.

Мировое производство продукции аквакультуры в 2022 году достигло рекордного уровня в 130,9 млн тонн, что на 8,1 млн тонн больше, чем в 2020 году, когда было произведено 122,8 млн тонн. По оценкам, в 2022 году стоимость продукции на фермах составила 312,8 млрд долларов США, что на 34,2 млрд долларов США больше, чем в 2020 году, когда эта сумма составляла 278,5 млрд долларов США [4]. Он включал в себя 94,4 млн тонн (в эквиваленте живого веса; на сумму 295,7 млрд долларов США) водных животных и 36,5 млн тонн (в эквиваленте сырого веса; на сумму 17 млрд долларов США) водорослей (морских и микроводорослей), а также ещё 2700 тонн (на сумму 138,5 млн долларов США) раковин и жемчуга [9].

Производство продукции аквакультуры в России в 2023 году прибавило 5% в годовом выражении, достигнув 402 000 тонн (рис.1). Рыбоводство активно развивается с 2014 года, тогда заработал закон об аквакультуре и одновременно началось импортозамещение на продовольственном рынке [2]. За 10 лет объём выращивания удвоен. Быстрее всего растёт производство лососёвых – форели и сёмги – и ценных морепродуктов: мидий, устриц, гребешков и других гидробионтов.

Мировой рынок кормов для аквакультуры находится на этапе активного роста. По оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций, к 2030 году объем продукции аквакультуры превысит объем дикой добычи рыбы [9].

В условиях конкуренции и ужесточения экологических норм требуется системный подход к формированию маркетинговых стратегий. Это

предполагает учет интересов всех участников цепи создания ценности: от производителей сырья до конечных потребителей продукции аквакультуры. Особенно важно учитывать смещение ценностей от простой эффективности к устойчивости, экологичности и прозрачности.

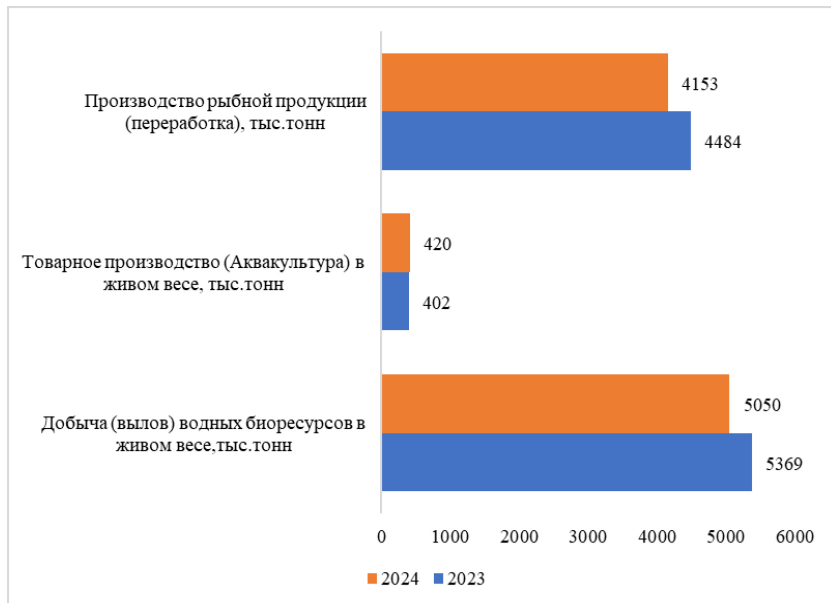


Рис. 1. Динамика показателей российского рынка рыболовства и аквакультуры [2]
Fig. 1. Trends in Key Indicators of the Russian Fisheries and Aquaculture Market [2]

Тем не менее, несмотря на растущую значимость, исследования рынка в данной сфере остаются фрагментарными [3; 12; 14], что затрудняет стратегическое планирование производителей кормов аквакультуры. Это исследование призвано восполнить данный пробел и предоставить целостную картину интересов, мотиваций и предпочтений, формирующих современный рынок кормов для аквакультуры.

Цель настоящего исследования заключается в выявлении и аналитическом осмыслении механизмов взаимодействия ключевых стейкхолдеров и потребителей на рынке кормов для аквакультуры, с целью формирования эффективных маркетинговых стратегий, соответствующих современным требованиям устойчивого развития. В условиях растущего спроса на продукцию аквакультуры и усиления конкуренции в сегменте специализиро-

ванных кормов, важно не только учитывать технические характеристики продукта, но и понимать структуру предпочтений потребителей, а также интересы всех участников цепочки создания ценности: от производителей до конечных пользователей.

Исследование направлено на изучение мотиваций и поведенческих моделей различных потребительских групп, а также на структурный анализ влияния внешних и внутренних факторов на рыночные отношения. Особое внимание уделяется трансформации потребительского поведения под влиянием экологических, экономических и технологических изменений.

В рамках исследования была выдвинута гипотеза о том, что современные потребители кормов для аквакультуры всё чаще ориентируются не только на цену и питательные характеристики, но и на нефинансовые параметры, такие как экологическая сертификация, происхождение ингредиентов, открытость бренда и устойчивые производственные практики. Это, в свою очередь, требует от производителей более точной сегментации аудитории и адаптации маркетинговых коммуникаций под новые ценности и ожидания целевых групп.

Таким образом, предполагается, что только при условии комплексного подхода к анализу рынка, с учётом интересов стейкхолдеров, структурной сегментации спроса и факторов устойчивости возможно создание конкурентоспособной маркетинговой стратегии, способной обеспечивать не только рост продаж кормов аквакультуры, но и долгосрочную лояльность со стороны потребителей.

Материалы и методы

В основе проведённого исследования лежал многоуровневый подход, предполагающий комплексное сочетание количественных и качественных методов. Такой подход позволил охватить как поведенческие, так и стратегические аспекты функционирования рынка кормов для аквакультуры, обеспечив достоверность и целостность результатов.

Для изучения потребительских предпочтений и анализа влияния стейкхолдеров выбран комплексный подход, объединяющий качественные и количественные методы (Brugman, 2016) [8]. Такой подход позволяет получить как структурированные данные, так и глубокое понимание мотивов поведения. Методология исследования опирается на работы в области маркетинга и агробизнеса, например, исследования Kotler и Keller (2016) по анализу рынка и потребительского поведения, а также Shoko, A.P. et al. (2020), изучающие предпочтения в агропродовольственном секторе [11; 14]. Идентифи-

кация ключевых участников рынка кормов проводится на основе методики Freeman (1984), которая определяет стейкхолдера как любую группу или индивида, влияющих на организацию или находящихся под её воздействием [10]. Вопрос о наиболее влиятельных стейкхолдерах является ключевым в стейкхолдерском подходе формирования рыночной стратегии, руководители ожидают, что государственные структуры и их регуляторы, а также клиенты окажут наибольшее влияние на стоимость их компаний. Организация работы компании по внешним связям, взаимодействие с заинтересованными сторонами и определение повестки дня по внешним связям, является базисом в анализе реакций стейкхолдеров на воздействие бизнеса [6]. Возможности улучшить и быть более активными при взаимодействии дает понимание стейкхолдерской стоимости (ценности). Стейкхолдерский подход направлен на агрегирование ценности необходимой для заинтересованных сторон от компании. Для идентификации стейкхолдеров и анализа их влияния и заинтересованности в исследовании применяется модель (Mitchell et al., 1997), что позволяет ранжировать заинтересованные стороны и правильно определить приоритеты взаимодействия [13].

Исследование началось с кабинетного анализа, в рамках которого была изучена актуальная информация из вторичных источников: аналитические отчёты российских и международных организаций (в том числе Федеральное агентство по рыболовству [2], FAO [9], Aqua-Spark [4]), обзоры независимых исследовательских центров, маркетинговые публикации, отраслевые обзоры и статистика производителей. Это позволило сформировать базовое представление о динамике рынка, основных тенденциях, а также определить потенциальные зоны интереса для дальнейшего углублённого анализа.

Для получения эмпирических данных были проведены глубинные интервью с ключевыми представителями отрасли. Эти глубинные интервью охватывали широкий спектр вопросов, включая особенности спроса, логистические ограничения, восприятие брендов, инновационные инициативы, а также изменения в предпочтениях потребителей. Участниками стали производители кормов, дистрибьюторы, фермерские хозяйства, научные сотрудники и представители регуляторных органов, что позволило зафиксировать разные точки зрения и уточнить контекст развития отрасли.

На следующем этапе был проведён количественный онлайн-опрос с участием 143 потребителей кормов (преимущественно мелкие и средние фермеры). Респондентам предлагалось оценить значимость различных характеристик кормов, уровень доверия к брендам, отношение к устойчивому производству и роль ценовых факторов при выборе поставщика.

Дополнительно в исследовании были задействованы инструменты стратегического анализа: SWOT и PEST. Их использование обеспечило структурированную оценку сильных и слабых сторон рыночных игроков, а также влияния внешней среды [5]. Это позволило выявить не только барьеры и угрозы, но и перспективные зоны роста.

Контент-анализ маркетинговых коммуникаций ведущих брендов дополнил исследование поведенческими и визуальными характеристиками рынка. Сравнительный анализ стратегий глобальных и локальных производителей дал возможность понять, в чём состоят ключевые различия в позиционировании, клиентоориентированности и ценностных подходах.

Результаты и обсуждение

Анализ стейкхолдеров был реализован в несколько этапов с использованием метода картирования заинтересованных сторон [6]. На первом этапе, на основе кабинетного исследования и предварительных интервью с участниками отрасли, была составлена обобщённая карта цепочки создания ценности на рынке кормов для аквакультуры. Это позволило систематизировать роли различных субъектов и выделить пять ключевых групп: производители кормов, дистрибьюторы, фермерские хозяйства (потребители), регуляторы и НИОКР-центры (рисунок 2).



Рис. 2. Карта цепочки создания ценности на рынке кормов для аквакультуры

Fig. 2. Value chain map for the aquaculture feed market

Для углублённого анализа интересов каждой из групп были проведены глубинные интервью. Представителям каждой категории предлагались тематические блоки вопросов, направленные на выявление их приоритетов в закупке, продвижении, разработке и регулировании кормов. Так, произ-

водители акцентировали внимание на инновационных формулах, ценовой устойчивости и логистике. Дистрибьюторы подчеркивали важность бренда, поддержки со стороны поставщика и стабильности поставок. Фермеры выражали заинтересованность в предсказуемом результате (приросте массы), ценовой гибкости и прозрачности состава. Представители регуляторов и научных учреждений сосредоточились на соответствии стандартам, биобезопасности и внедрении устойчивых технологий.

На основании перекрёстного анализа интересов и факторов принятия решений была сформирована матрица влияния, которая позволила выявить совпадающие и противоречивые ожидания между группами, а также определить точки синергии и потенциальные риски.

Матрицу влияния представляется в виде двумерной таблицы или сетки взаимовлияния между стейкхолдерами, где: оси X и Y – это ключевые группы стейкхолдеров (производители, дистрибьюторы, фермеры, регуляторы, НИОКР-центры). Ячейки таблицы 1 описывают характер взаимодействия между ними:

- – зелёный круг, отражает синергию (совпадение интересов),
- – желтый круг, отражает нейтральное влияние,
- – красный круг, отражает противоречие / риск (конфликт интересов).

Таблица 1.

Матрица влияния, отражающая совпадающие и противоречивые ожидания между группами стейкхолдеров

Table 1. Influence Matrix Reflecting Aligned and Conflicting Expectations Among Stakeholder Groups

Субъекты взаимодействия	Производители	Дистрибьюторы	Фермеры	Регуляторы	НИОКР
Производители	●	●	●	●	●
Дистрибьюторы	●	●	●	●	●
Фермеры	●	●	●	●	●
Регуляторы	●	●	●	●	●
НИОКР	●	●	●	●	●

При интерпретации данной матрицы нами было выявлено: во взаимодействии между фермерами и регуляторами: фермеры недовольны бюрократией и сложностью сертификации. Во взаимодействии между НИОКР и производителями наблюдается высокий интерес к совместным разработкам.

кам. Во взаимодействии между дистрибьюторами и НИОКР: слабая связь, редко используется потенциал науки в продвижении.

Основные критерии выбора кормов были установлены по результатам онлайн-опроса 143 фермеров. Респондентам предлагалось ранжировать по степени важности ряд факторов, влияющих на их решение о покупке. С помощью факторного анализа были выделены четыре доминирующих кластера: биологическая эффективность, экологическая безопасность, цена и происхождение ингредиентов. Этот метод статистически объединяет коррелирующие ответы и выделяет 4 устойчивых кластера предпочтений: биологическая эффективность, экологическая безопасность (наличие сертификации, отсутствие вредных добавок), цена (доступность, скидки), происхождение ингредиентов.

Результаты анкетирования представлены на рис. 3, в процентах ответивших о влиянии факторов, детерминирующих потребительские решения.

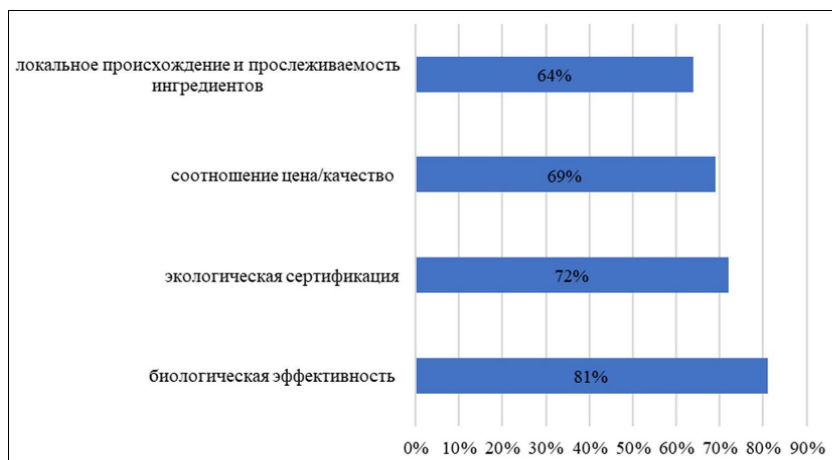


Рис. 3. Факторы, определяющие поведение потребителей на рынке кормов аквакультуры России, (по результатам опроса, проведённого авторами, N=143)

Fig. 3. Factors influencing consumer behavior in the Russian aquaculture feed market (based on the results of a survey conducted by the authors, N=143)

Сегментация рынка была проведена по итогам количественных данных опроса и качественных характеристик из интервью. Таким образом, выделены три устойчивых сегмента потребителей:

1. Экологически ориентированные: высоко ценят устойчивое производство и прозрачность происхождения ингредиентов. Экологический

аспект получает всё большее значение. Мировые объёмы использования рыбной муки в кормах снизились на $\approx 29\%$ с 2006 по 2022 г. (FAO, 2022), в то время как растёт доля растительных и альтернативных источников белка. 53 % производителей в ЕС внедрили системы отслеживания происхождения ингредиентов, а 41 % респондентов исследования Rabobank (2023) считают наличие экологических сертификатов обязательным для выхода на экспортные рынки. Пример внедрения экологических практик – компания BioMar, у которой доля кормов с сертификатом ASC выросла с 21 % в 2017 г. до 48 % в 2022 г. [7]

2. Прагматичные: руководствуются соотношением цены и производительности. По данным отчёта Rabobank (2023), расходы на корма составляют от 50 % до 75 % всех операционных издержек хозяйств по выращиванию рыбы и ракообразных. Согласно исследованиям в себестоимости производства лосося и форели доля расходов на корм достигает 60–65 % [13]. Исследование Ahmed, N., Thompson, S. & Turchini, G.M. (2020) показало, что для большинства рыбоводческих хозяйств, особенно в развивающихся странах, именно цена становится определяющим фактором выбора, даже в ущерб качеству [3]. Тем не менее, в сегменте премиальных производителей, ориентированных на экспорт, наблюдается компромисс между стоимостью и долгосрочной эффективностью кормов.

3. Традиционные покупатели: ориентируются на привычные бренды и стабильные поставки. Европейский регламент EC No 1831/2003 устанавливает нормативы по составу и безопасности кормов для аквакультуры. Согласно опросу Skretting (2024), 82 % респондентов отметили, что стабильное качество корма снижает смертность рыбы на 18–23 % [15].

На основе полученных данных были разработаны рекомендации по адаптации маркетинговых стратегий. Для первого сегмента рекомендуется делать акцент на экологические сертификаты, прозрачность состава и миссию бренда. Для второго, предлагать конкурентные цены, гибкие условия и доказанные результаты по приросту массы. Третьему сегменту важна стабильность, простота коммуникации и локальное присутствие поставщика.

Этот комплексный подход позволил не только описать структуру спроса, но и связать интересы стейкхолдеров с реальными механизмами принятия решений на рынке, обеспечив тем самым практическую ценность результатов.

SWOT-анализ был использован для оценки внутреннего потенциала и уязвимостей участников рынка (производителей кормов, дистрибьюторов, локальных брендов) в сочетании с анализом внешней среды.

Этапы включали: сбор эмпирических данных через интервью с представителями бизнеса, анализ маркетинговых практик, продуктовых решений и операционных процессов. далее был сделан сравнительный анализ стратегий локальных и глобальных производителей. Группировка и структурирование информации по четырём категориям.

Таблица 2.

SWOT-анализ сильных и слабых сторон компаний, а также возможностей и угроз рыночной среды

Table 2. SWOT Analysis of Companies' Strengths and Weaknesses, as well as Opportunities and Threats in the Market Environment

Факторы	Влияние на рынок аквакультурных кормов
Сильные стороны	Высокий уровень научно-исследовательских разработок в области кормов, наличие международных стандартов качества, устойчивый спрос в связи с ростом аквакультуры.
Слабые стороны	Высокая зависимость от импортных компонентов, недостаточная представленность брендов на локальных рынках, слабое использование digital-маркетинга среди локальных производителей.
Возможности	Рост спроса в развивающихся странах, интерес к экологичным кормам, государственные меры поддержки устойчивого сельского хозяйства.
Угрозы	Рост цен на сырье (рыбная мука, соя), изменение регуляторных норм (например, запрет на использование определённых добавок в ЕС), изменение климата, влияющее на состав кормов.

SWOT-анализ дал структурированную картину конкурентоспособности игроков на разных уровнях зрелости. Он позволил выделить стратегические разрывы, например: локальные производители недооценивают ценность коммуникации и дифференциации, а международные компании лучше используют науку, но могут упустить локальные особенности.

PEST-анализ позволяет системно оценить внешние факторы макросреды, воздействующие на рынок кормов аквакультуры. Каждый фактор анализировался на основе данных из отраслевых отчётов, регуляторных инициатив и глобальных трендов.

Политические факторы (P): Рост числа ограничений на использование кормовых добавок, субсидии на устойчивое производство в отдельных странах.

Экономические факторы (E): Волатильность сырьевых рынков (особенно рыбной муки и сои), зависимость от валютных курсов, инвестиции в автоматизацию.

Социальные факторы (S): Увеличение доли потребителей, ориентированных на этическое потребление; усиление требований к необходимости обеспечения прозрачности происхождения и отслеживаемости всего пути продукта: от сырья до конечного потребителя.

Технологические факторы (Т): Быстрое развитие альтернативных источников белка (насекомые, микроводоросли), внедрение цифровых решений в управление кормлением и логистике.

Этот анализ позволил выявить внешние драйверы и барьеры, влияющие на формирование маркетинговой стратегии. Например, растущий интерес к экологически чистым кормам и нормативное давление на качество стимулируют производителей инвестировать в сертификацию и открытость цепочки поставок.

Таблица 3.

Результаты PEST-анализа рынка кормов для аквакультуры в России

Table 3. Results of the PEST Analysis of the Aquaculture Feed Market in Russia

Фактор	Воздействие на рынок
Политические	Повышенные требования к экологическим стандартам, торговые барьеры, субсидии на развитие устойчивой аквакультуры.
Экономические	Волатильность цен на корма и сырьё, колебания валютных курсов, инвестиции в устойчивое производство.
Социальные	Рост интереса к экологически чистой продукции, повышение информированности потребителей, расширение сегмента «осознанных потребителей»
Технологические	Развитие цифровых решений (мониторинг, управление кормлением), биотехнологии, новые рецептуры на основе растительных и насекомых белков.

Контент-анализ маркетинговых коммуникаций, заключающийся в анализе сайтов и социальных сетей 5 ведущих брендов (Skretting, BioMar, Aller Aqua, Corpens и «Аквакорм» РФ) показал:

1. Skretting и BioMar акцентируют внимание на устойчивом развитии, инвестициях в НИОКР, миссии и социальных проектах.

2. Aller Aqua делает упор на гибкость, локализацию и поддержку фермеров.

3. Corpens активно использует визуальный сторителлинг, демонстрирует кейсы клиентов.

4. «Аквакорм» ограничивается технической информацией, слабо представлен в социальных сетях, отсутствуют элементы брендинга.

Таблица 4.

Сравнительный анализ стратегий ведущих брендов кормов аквакультуры**Table 4. Comparative Analysis of Strategies Used by Leading Aquaculture Feed Brands**

Критерий	Глобальные бренды (Skretting, BioMar)	Локальные производители (например, «Аквакорм» РФ)
Продуктовая линейка	Расширена, адаптирована под виды рыб и регион	Унифицированные рецептуры, ограниченный ассортимент
Маркетинговые каналы	Онлайн-платформы, соц-сети, обучение фермеров	Участие в выставках, офлайн-продажи через посредников
Подход к устойчивости	Активные инвестиции, экологические отчёты	Пассивное следование нормам, без инициатив
Клиентоориентированность	Индивидуальные консультации, CRM-системы	Отсутствие системной работы с клиентом

Полученные данные указывают на необходимость гибкого взаимодействия с потребителями кормов аквакультуры, ориентированного на ценности аудитории. Эко-ориентированные фермеры склонны доверять сертифицированной продукции и открытым поставщикам, в то время как прагматики оценивают в первую очередь стабильность и цену. Для производителей это означает: необходимость сегментированной коммуникации; развитие бренда через доверие и устойчивость; усиление образовательной функции маркетинга.

Комплекс представленных выше факторов и их значимость изменяется в зависимости от региона, уровня развития хозяйства и рыночной ориентации (локальный либо экспортный рынок). Государственное участие также должно быть направлено на стимулирование сертификации, упрощение логистики и поддержку инноваций через гранты и НИОКР.

Заключение

Рынок кормов для аквакультуры требует глубокой трансформации маркетинговых стратегий в сторону устойчивого развития, транспарентности и персонализации. Анализ показал, что поведение потребителей и влияние стейкхолдеров изменяются в сторону повышения требований к экологичности и эффективности.

Для устойчивого развития необходимы:

- адаптация маркетинговых стратегий под тип потребителей;
- развитие цифровых и просветительских платформ;
- усиление роли сертификации и прозрачности поставок.

По результатам анализа наиболее эффективные элементы коммуникаций производителей кормов аквакультуры следующие: подчёркивание

научной базы и результатов НИОКР; клиентские истории и видео с хозяйств; демонстрация экологических сертификатов и traceability-систем.

Отметим, ограничение данного исследования. SWOT и PEST-анализ представляет собой полезную схему, которая может помочь в выявлении проблем, принятии решений, планировании, внедрении соответствующих технологий и принятии мер предосторожности для ускорения устойчивого развития аквакультуры. Однако представленные традиционные методы, несмотря на свои преимущества, имеют ряд недостатков, связанных с составлением неполного и неточного списка факторов, зависимостью от субъективного мнения и отсутствием определения приоритетности важности каждого фактора SWOT-анализа.

В перспективе исследования стейкхолдеров на растущем и трансформирующемся российском рынке кормов для аквакультуры необходимо оценить их внимание к устойчивым технологиям и инновационным решениям в области кормов, чтобы повышать производительность и снижать воздействие на окружающую среду.

Список литературы

1. Колончин, К. В., Труба, М. А., & Кузичева, Н. Ю. (2023). Тенденции развития аквакультуры в России: перспективы качественного улучшения продовольственной безопасности и устойчивого роста экономического потенциала отрасли. *Продовольственная политика и безопасность*, 10(3), 533–546. <https://doi.org/10.18334/ppib.10.3.118265>. EDN: <https://elibrary.ru/SVDUGD>
2. Федеральное агентство по рыболовству. (2023). *Коллегия. Итоги деятельности Федерального агентства по рыболовству в 2023 году и задачи на 2024 год*. <https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/2024/03/sbornik-25-03-2024.pdf>
3. Ahmed, N., Thompson, S., & Turchini, G. M. (2020). Organic aquaculture productivity, environmental sustainability, and food security: Insights from organic agriculture. *Food Security*, 12, 1253–1267. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01090-3>. EDN: <https://elibrary.ru/WCGTBC>
4. Aqua-Spark. (2022). *Sustainable aquaculture feed: A global review*.
5. Babatunde, A., Deborah, R. A., Gan, M., & Simon, T. (2021). A quantitative SWOT analyses of key aquaculture players in Africa. *Aquaculture International*, 29(4), 1753–1770. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00715-4>. EDN: <https://elibrary.ru/FNKGSI>
6. Bernstein, S. L., Weiss, J., & Curry, L. (2020). Visualizing implementation: Contextual and organizational support mapping of stakeholders (COSMOS). *Implementation Science Communications*, 1, 48. <https://doi.org/10.1186/s43058-020-00030-8>. EDN: <https://elibrary.ru/LRHAKB>

7. BioMar. (2024). *Global sustainability report*. <https://www.biomar.com/our-promise/sustainability-report>
8. Bryman, A. (2006). Integrating quantitative and qualitative research: How is it done? *Qualitative Research*, 6(1), 97–113. <https://doi.org/10.1177/1468794106058877>
9. FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
10. Freeman, R. E. (1984). *Stakeholder management: A stakeholder approach*. Pitman Publishing.
11. Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). *Marketing management* (15th ed.). Pearson Education.
12. Medvedeva, Y., Konkin, V., Krayevsky, V., & Osadchaya, S. (2024). Revolutionizing agro-industrial business models through sustainable marketing strategies. *BIO Web of Conferences*, 141, 04051. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414104051>. EDN: <https://elibrary.ru/WSDSVK>
13. Mitchell, R. K., Agle, B. R., & Wood, D. J. (1997). Toward a theory of stakeholder identification and salience: Defining the principle of who and what really counts. *The Academy of Management Review*, 22(4), 853–886. <https://doi.org/10.2307/259247>. EDN: <https://elibrary.ru/CRIHOB>
14. Shoko, A. P., Limbu, S. M., Ulotu, E. E., Shayo, S. D., Silas, M. O., Chimatiro, S. K., et al. (2023). Fish seed and feed value chains analysis and their critical factors for aquaculture development in Tanzania. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 3, 35–50. <https://doi.org/10.1002/aff2.84>. EDN: <https://elibrary.ru/HQRWUT>
15. Skretting. (2024). *Impact report*. <https://www.skretting.com/siteassets/global/sustainability/pdfs/skretting-impact-report-2024.pdf?v=49d72b>

References

1. Kolonchin, K. V., Truba, M. A., & Kuzicheva, N. Yu. (2023). Trends in the development of aquaculture in Russia: Prospects for improving food security and ensuring sustainable growth of the industry's economic potential. *Food Policy and Security*, 10(3), 533–546. <https://doi.org/10.18334/ppib.10.3.118265>. EDN: <https://elibrary.ru/SVDUGD>
2. Federal Agency for Fisheries. (2023). *Board. Results of the Federal Agency for Fisheries' activities in 2023 and tasks for 2024*. <https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/2024/03/sbornik-25-03-2024.pdf>
3. Ahmed, N., Thompson, S., & Turchini, G. M. (2020). Organic aquaculture productivity, environmental sustainability, and food security: Insights from organic agriculture. *Food Security*, 12, 1253–1267. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01090-3>. EDN: <https://elibrary.ru/WCGTBC>

4. Aqua-Spark. (2022). *Sustainable aquaculture feed: A global review*.
5. Babatunde, A., Deborah, R. A., Gan, M., & Simon, T. (2021). A quantitative SWOT analyses of key aquaculture players in Africa. *Aquaculture International*, 29(4), 1753–1770. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00715-4>. EDN: <https://elibrary.ru/FNKGSI>
6. Bernstein, S. L., Weiss, J., & Curry, L. (2020). Visualizing implementation: Contextual and organizational support mapping of stakeholders (COSMOS). *Implementation Science Communications*, 1, 48. <https://doi.org/10.1186/s43058-020-00030-8>. EDN: <https://elibrary.ru/LRHAKB>
7. BioMar. (2024). *Global sustainability report*. <https://www.biomar.com/our-promise/sustainability-report>
8. Bryman, A. (2006). Integrating quantitative and qualitative research: How is it done? *Qualitative Research*, 6(1), 97–113. <https://doi.org/10.1177/1468794106058877>
9. FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
10. Freeman, R. E. (1984). *Stakeholder management: A stakeholder approach*. Pitman Publishing.
11. Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). *Marketing management* (15th ed.). Pearson Education.
12. Medvedeva, Y., Konkin, V., Krayevsky, V., & Osadchaya, S. (2024). Revolutionizing agro-industrial business models through sustainable marketing strategies. *BIO Web of Conferences*, 141, 04051. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414104051>. EDN: <https://elibrary.ru/WSDSVK>
13. Mitchell, R. K., Agle, B. R., & Wood, D. J. (1997). Toward a theory of stakeholder identification and salience: Defining the principle of who and what really counts. *The Academy of Management Review*, 22(4), 853–886. <https://doi.org/10.2307/259247>. EDN: <https://elibrary.ru/CRIHOB>
14. Shoko, A. P., Limbu, S. M., Ulotu, E. E., Shayo, S. D., Silas, M. O., Chimatiro, S. K., et al. (2023). Fish seed and feed value chains analysis and their critical factors for aquaculture development in Tanzania. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 3, 35–50. <https://doi.org/10.1002/aff2.84>. EDN: <https://elibrary.ru/HQRWUT>
15. Skretting. (2024). *Impact report*. <https://www.skretting.com/siteassets/global/sustainability/pdfs/skretting-impact-report-2024.pdf?v=49d72b>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кольган Мария Владимировна, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры Менеджмент и бизнес-технологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»

*пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Ростовская область,
Российская Федерация
kolgan.m@yandex.ru*

Медведева Юлия Юрьевна, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры Менеджмент и бизнес-технологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Ростовская область,
Российская Федерация
jjmedvet@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Maria V. Kolgan, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Management and Business Technology
*Don State Technical University
1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Rostov region, Russian Federation
kolgan.m@yandex.ru
SPIN-code: 1122-5436
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2694-5777>
ResearcherID: GYJ-8122-2022
Scopus Author ID: 57202381792*

Yulia Y. Medvedeva, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Management and Business Technology
*Don State Technical University
1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Rostov region, Russian Federation
jjmedvet@yandex.ru
SPIN-code: 8251-0278
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5835-0594>
ResearcherID: AAE-3126-2020
Scopus Author ID: 57195303333*

Поступила 03.09.2025
После рецензирования 04.10.2025
Принята 09.10.2025

Received 03.09.2025
Revised 04.10.2025
Accepted 09.10.2025

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1413](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1413)

EDN: [WTQOYM](https://www.edn.ru/WTQOYM)

УДК 579.842.11:579.26:619



Стресс-индуцированное био пленкообразование полирезистентных *Escherichia coli*, выделенных от животных

И.В. Антонецкий, В.И. Плешакова, Н.А. Лещёва,
Е.В. Фрик, О.В. Миненкова

Омский государственный аграрный университет, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Микробиота животных подвергается постоянному воздействию стресс-факторов, включая антибиотики, внешние условия, ограничение питательных веществ. Учитывая распространенность и выраженный адаптационный потенциал *Escherichia coli*, особую актуальность приобретает способность этих бактерий к био пленкообразованию, которое существенно затрудняет эффективность терапии при инфекционных болезнях, снижая доступность антимикробных средств и повышая устойчивость бактерий к дезинфекционным мерам.

Цель – оценить способность к стресс-индуцированному био пленкообразованию полирезистентных штаммов *Escherichia coli*, выделенных из различных биотопов сельскохозяйственных животных и диких птиц в условиях моделируемого нутриентного стресса.

Материалы и методы. В работе изучено 77 штаммов *Escherichia coli*, которые были выделены из образцов, отобранных от крупного рогатого скота (КРС) (n=52), свиней (n=11), диких птиц (n=11) и индеек (n=3). Выделение и идентификацию культур до вида *Escherichia coli* проводили стандартными микробиологическими методами. Определение био пленкообразующей способности микроорганизмов проводили в модифицированном микропланшетном формате, предложенном Stepanović et al. (2000).

Результаты. Исследование выявило вариабельность в способности к био пленкообразованию у полирезистентных штаммов *Escherichia coli*, выделенных от животных. Штаммы от КРС и свиней демонстрировали наиболее высокий потенциал: 34,6 % и 27,3 % культур соответственно относились к интенсивным продуцентам

био пленки. Культуры, выделенные из смывов со слизистых, формировали био пленки интенсивнее, чем штаммы, выделенные из объектов инфраструктуры. Более 60 % культур были резистентны к аминогликозидам, 70 % к тетрациклам, 80 % к фторхинолонам. Ключевым результатом явилось стресс-индуцированное усиление био пленкообразования при умеренном нутриентном стрессе (разведение питательной среды 1:2-1:64): у 24 штаммов среднее значение оптической плотности (OD) возросло на 15-20 % по сравнению с исходным значением, достигнув максимума $0,372 \pm 0,033$ при разведении 1:32. Однако при сильном обеднении среды ($\geq 1:128$) способность к био пленкообразованию резко подавлялась ($OD < 0,070$). Отдельные штаммы сохраняли высокую био пленкообразующую активность даже в экстремальных условиях. Статистический анализ подтвердил значимое влияние степени разведения среды на уровень био пленкообразования ($p < 0,001$), что визуализировано на тепловой карте.

Ключевые слова: животные; *Escherichia coli*; антибиотикорезистентность; био пленки; нутриентный стресс

Для цитирования. Антонеvский, И. В., Плешакова, В. И., Лещёва, Н. А., Фрик, Е. В., & Миненкова, О. В. (2026). Стресс-индуцированное био пленкообразование полирезистентных *Escherichia coli*, выделенных от животных. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 610–628. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1413>

Stress-induced biofilm formation in multidrug-resistant *Escherichia coli* isolated from animals

**I.V. Antonevskiy, V.I. Pleshakova, N.A. Lescheva,
E.V. Frick, O.V. Minenkova**

Omsk State Agrarian University, Russian Federation

Abstract

Background. The microbiota of animals is constantly subjected to stressors, including antibiotics, environmental conditions, and nutrient limitation. Given the prevalence and pronounced adaptive potential of *Escherichia coli*, the ability of these bacteria to form biofilms is of particular importance. This biofilm formation significantly compromises the efficacy of therapy for infectious diseases by reducing the availability of antimicrobial agents and enhancing bacterial resistance to disinfection measures.

Purpose. To evaluate stress-induced biofilm formation in MDR *Escherichia coli* strains isolated from various ecological niches of livestock and wild birds under simulated nutrient stress.

Materials and methods. A total of 77 *Escherichia coli* strains were studied. Isolates originated from cattle (n=52), pigs (n=11), wild birds (n=11), and turkeys (n=3). Strains were isolated and identified using standard microbiological methods. Biofilm-forming capacity was quantified using a modified microtiter plate method described by Stepanović et al.

Results. Significant variability in biofilm-forming capacity was observed among MDR *E. coli* animal isolates. Strains from cattle and pigs exhibited the highest potential: 34.6 % and 27.3 % were strong biofilm producers (OD>0.400), respectively, whereas no strong producers were identified among turkeys isolates. *E. coli* strains from cattle mucosal swabs formed biofilms more robustly than environmental isolates. High antimicrobial resistance rates were observed: >60 % to aminoglycosides, 70 % to tetracyclines, and 80% to fluoroquinolones. Key findings demonstrated stress-induced biofilm enhancement under moderate nutrient stress (nutrient broth dilution 1:2-1:64). Among 24 tested strains, mean OD increased by 15-20 % versus control, peaking at 0.372±0.033 (1:32 dilution). Conversely, severe nutrient depletion (≥1:128 dilution) markedly suppressed biofilm formation (OD <0.070). Select strains maintained high biofilm capacity under extreme conditions. Statistical analysis confirmed the significant impact of nutrient dilution on biofilm levels (p<0.001), visualized in a heatmap.

Keywords: animals; *Escherichia coli*; antibiotic resistance; biofilms; nutrient stress

For citation. Antonevskiy, I. V., Pleshakova, V. I., Lescheva, N. A., Frick, E. V., & Minenkova, O. V. (2026). Stress-induced biofilm formation in multidrug-resistant *Escherichia coli* isolated from animals. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 610–628. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1413>

Введение

Биопленки представляют собой структурированные сообщества микробных клеток, заключенных в экстрацеллюлярный полимерный матрикс, который обеспечивает повышенную защиту бактериальных клеток от физических, химических и биологических воздействий. Такая защитная роль биопленок является ключевым фактором распространения возбудителей хронических инфекций, значительного снижения эффективности антибактериальной терапии и дезинфекционных мероприятий [1, с. 17-22; 3, с. 237-240; 4, с. 15; 6, с. 119; 7, с. 240].

Формирование биопленок этиологически значимыми микроорганизмами представляет собой один из ключевых механизмов выживания бактерий в неблагоприятных условиях окружающей среды [8, с. 71; 13, с. 102; 18, с. 1703-1709].

Микроорганизмы *Escherichia coli*, являясь комменсалом кишечника теплокровных животных и человека, а также этиологически значимым условно-патогенным микроорганизмом, широко распространены в различных экосистемах, включая объекты животноводческого производства [9, с. 20; 11, с. 49]. Высокая адаптационная пластичность *E. coli* позволяет им успешно колонизировать новые ниши и формировать биопленки на разнообразных абиотических и биотических поверхностях [10, с. 1635; 16, с. 42-23; 17, с. 2866]. Особое внимание в условиях современного интенсивного животноводства вызывает распространение полирезистентных (множественно-устойчивых) штаммов *E. coli*, резистентность которых зачастую сочетается с высокой способностью к биопленкообразованию [2, с. 46-52; 5, с. 111; 12, с. 4; 14, с. 648-653]. Такие штаммы представляют серьезную угрозу, как для здоровья животных, так и для общественного здравоохранения.

Сельскохозяйственные животные постоянно подвергаются воздействию разнообразных стрессовых факторов, среди которых выделяют технологические (скученное содержание, транспортировка), физиологические, химические и, что особенно существенно, биологические – включая широкое и зачастую нерациональное применение антибиотиков, приводящее к селекции резистентных штаммов микроорганизмов [12, с. 5; 15, с. 1389; 19, с. 126].

Известно, что именно стрессовые условия могут служить мощным индуктором перехода бактерий из планктонной формы роста к проявлению адгезивных свойств как защитной стратегии [8, с. 71].

Целью исследования явилась оценка способности к стресс-индуцированному биопленкообразованию полирезистентных штаммов *Escherichia coli*, выделенных из различных биотопов сельскохозяйственных животных и диких птиц, в условиях моделируемого нутриентного стресса.

Материалы и методы

Материалом для исследования служили образцы биологических материалов (фекалии, мазки со слизистых, ткани внутренних органов), отобранные от животных (крупный рогатый скот, свиньи, индейки, дикие птицы). Всего выделено 77 культур *Escherichia coli* с использованием стандартных микробиологических методик.

Антибиотикорезистентный профиль штаммов определяли диско-диффузионным методом на питательной среде Мюллера–Хинтона в соответствии с рекомендациями Европейского комитета по определению

чувствительности к антибиотикам (EUCAST) и МУК 4.2.1890-04 «Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам». В тест включены препараты основных классов антибиотиков: аминогликозиды (амикацин, канамицин, гентамицин), тетрациклины (тетрациклин, доксициклин), бета-лактамы (цефалексин, цефуроксим), фторхинолоны (ципрофлоксацин, левофлоксацин).

Способность к образованию биопленок оценивали методом количественного определения оптической плотности биопленки (OD) в модифицированном микропланшетном формате, предложенном Stepanović et al. [20, с. 175-179]. Исследуемые культуры инкубировали в течение 24 ч при 37 °C в мясоептонном бульоне (МПБ) с 1 % глюкозой. Суточные бульонные культуры доводили до одинаковой оптической плотности, составляющей 0,5 по шкале МакФарланда ($1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл), инокулировали в лунки микротитровального планшета и инкубировали 24 ч при 37 °C. После инкубации культуральную жидкость удаляли, лунки трижды промывали фосфатно-солевым буфером (pH 7,2) и окрашивали 0,1 % раствором генцианвиолета в течение 15 мин. Окрашенные биопленки элюировали 95 % раствором этанола, и измеряли оптическую плотность при 620 нм на микропланшетном фотометре Multiscan FC («Thermo Fisher Scientific», Китай). Интерпретацию результатов проводили в соответствии с классификацией Stepanovic et al. (2000).

Для оценки стресс-индуцированного биопленкообразования использовали метод разведения питательной среды. Суточные бульонные культуры *E. coli* доводили до одинаковой оптической плотности, составляющей 0,5 по шкале МакФарланда ($1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл) и инокулировали в стерильный МПБ, предварительно разведенный фосфатно-солевым буфером (pH 7,2) до следующих концентраций: 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64, 1:128, 1:256, 1:512 и 1:1024. Полученные бактериальные суспензии вносили в лунки планшета и инкубировали в течение 24 ч при 37 °C. После культивирования процедуру оценки биопленки выполняли аналогично вышеописанному методу. Для всех исследуемых культур исследования проводили в трех повторях, определяя среднее значение OD в каждом разведении. Результаты анализировали статистически с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel. Построение тепловой карты выполняли с использованием библиотеки matplotlib языка программирования Python, где цветовая градация отражала уровень оптической плотности биопленки: от минимальных значений (низкое или отсутствующее биопленкообразование) до максимальных (интенсивное образование биопленки).

Результаты исследования

При определении культуральных свойств изолятов, выделенных из исследуемого материала, установлено, что при инкубации на МПА в течение 24 ч при 37 °С *Escherichia coli* формировали колонии размером 1-2 мм. По форме колонии круглые, выпуклые, с ровными краями, по консистенции – влажные, по цвету – серо-белые, при просмотре в проходящем свете полупрозрачные, на дифференциально-диагностическом агаре Эндо формировали колонии малинового цвета с металлическим блеском, правильной округлой формы (рисунок 1).



Рис. 1. Культуры *Escherichia coli*, выделенные от животных на агаре Эндо (слева), МПА (справа), 37 °С, 24 ч

Fig. 1. *Escherichia coli* cultures isolated from animals on Endo agar (left) and MPA (right), 37 °С, 24 h

При культивировании в жидкой питательной среде (МПБ) после 24 ч инкубации при 37°С *Escherichia coli* давали равномерное помутнение. При изучении роста на полужидком агаре отмечали диффузное помутнение по всей длине укола, что свидетельствовало о подвижности культур. В мазках, окрашенных по Граму, кишечная палочка представляла собой грамотрицательные короткие мелкие палочки, расположенные одиночно или короткими цепочками, без образования спор или капсул.

При определении ферментативных свойств установлено, что культуры *Escherichia coli* из сахаров активно ферментировали глюкозу и лактозу, были оксидазоотрицательными и каталазоположительными, образовывали индол и не образовывали сероводород, не утилизировали цитрат.

В ходе исследования проведена количественная оценка способности штаммов *Escherichia coli*, выделенных от различных видов животных, к формированию биопленок в стандартных условиях инкубации.

Полученные данные позволили выявить видовые особенности и различия в биопленкообразующем потенциале культур. Так, низкие исходные уровни биопленкообразования ($OD < 0,200$) преобладали у культур, полученных из образцов помета индеек и фекалий крупного рогатого скота (18 % всех штаммов), у культур от свиней и КРС доля слабых продуцентов биопленки составляла лишь 8 % и 15 % соответственно. Высокий потенциал формирования биопленки ($OD > 0,400$) отмечен у 36 % культур *E. coli* от КРС, 32 % от свиней, что указывает на более адаптированный к стрессу фенотип у бактерий, циркулирующих среди поголовья этих видов животных (таблица 1).

Таблица 1.

**Степень биопленкообразования культур *E. coli*,
выделенных от сельскохозяйственных животных и птиц**

Table 1. Degree of biofilm formation by *E. coli* isolates from farm animals and poultry

Вид животных	Количество	Средняя OD	Степень биопленкообразования					
			Высокая		Средняя		Низкая	
			абс.	%	абс.	%	абс.	%
Крупный рогатый скот	52	0,363	18	34,6	30	57,7	4	7,69
Дикая птица	11	0,264	2	18,2	9	81,8	0	0
Свиньи	11	0,348	3	27,3	6	54,5	2	18,18
Индейки	3	0,246	0	0	2	66,7	1	33,3

Примечание: «OD» – оптическая плотность.

Детальный анализ первичных данных по всем 77 изолятам выявил значительную вариабельность в способности к биопленкообразованию, как внутри групп, выделенных от одного вида животных, так и между видами. У штаммов *E. coli*, выделенных от крупного рогатого скота ($n=52$), значения OD варьировали от минимальных 0,075 до максимальных 0,809. Аналогично, среди изолятов от свиней ($n=11$) диапазон OD составил от 0,136 до 0,791. Такая широкая внутривидовая вариабельность (коэффициент вариации >40 % для КРС и свиней) подчеркивает, что биопленкообразующий потенциал является штамм-специфической характеристикой, существенно варьирующей даже среди бактерий, циркулирующих в сходных условиях одного хозяйства или вида животных. Примечательно, что

в культурах, выделенных от диких птиц ($n=11$) вариабельность степени биопленкообразования была менее выражена ($OD\ 0,194-0,332$).

При сравнении по видам материала, послужившего источником выделенных культур (фекалии, влагалищные смывы, доильные аппараты, поилки и др.), наиболее стабильную способность образовывать биопленку демонстрировали культуры, выделенные из влагалищных и кожных смывов крупного рогатого скота: более 50 % таких штаммов имели выраженную способность к биопленкообразованию. Напротив, изоляты из кормушек и поилок демонстрировали преимущественно средний уровень биопленкообразующей способности.

Антибиотикорезистентный профиль штаммов, сформированный на основе проведенной оценки чувствительности культур к АБП, характеризовался широкой устойчивостью выделенных культур к антибиотикам. В среднем более 60 % культур проявляли устойчивость к аминогликозидам (амикацину, гентамицину), около 70 % к тетрациклинам (доксикацилин и тетрациклин) и почти 80 % к фторхинолонам (ципрофлоксацину и левофлоксацину). Зоны подавления колебались от нуля (полная резистентность) до 40 мм (чувствительность), при этом большинство значений находилось в пределах 10-25 мм, что соответствует промежуточному (I) или резистентному (R) статусу по международным критериям EUCAST.

В результате исследования 77 полирезистентных культур *Escherichia coli*, выделенных от различных видов животных, был проведен комплексный анализ исходного уровня биопленкообразования и его изменения при инкубации в условиях обедненной питательной среды. Распределение культур по степени исходного биопленкообразования показало, что 32,45% (23 культуры) обладали высоким потенциалом формирования биопленки при культивировании в стандартном бульоне, более 60 % (47 культур) демонстрировали средний уровень, и лишь 9,09 % (7 культур) относились к слабым продуцентам биологической пленки.

Для определения влияния нутриентного стресса на биопленкообразование *E. coli* отобрали 24 культуры со средними исходными показателями оптической плотности биопленки. При снижении концентрации питательного бульона до разведения 1:8-1:32 штаммы демонстрировали усиление биопленкообразования: среднее значение OD во всех 24 протестированных культурах достигало максимума в диапазоне 0,380-0,420, что на 15-20% выше исходного уровня. Это свидетельствует о том, что стресс (умеренное обеднение среды) стимулировал переключение бактерий на биопленкообразующий фенотип, вероятно, как защитный механизм (таблица 2).

Таблица 2.

Влияние разведения питательной среды на биоопленкообразование полирезистентных штаммов *Escherichia coli* (n=24)

Table 2. Effect of culture medium dilution on biofilm formation by multidrug-resistant strains of *Escherichia coli* (n=24)

Разведение питательной среды	Средние значения OD±SD биопленки
Исходное	0,256±0,050
1:2	0,272±0,050
1:4	0,298±0,035
1:8	0,322±0,036
1:16	0,350±0,032
1:32	0,372±0,033
1:64	0,339±0,071
1:128	0,218±0,084
1:256	0,068±0,015
1:512	0,048±0,008
1:1024	0,038±0,006

Примечание: «OD» - оптическая плотность; «SD» - стандартное отклонение.

При дальнейшем повышении степени обеднения (разведения $\geq 1:64$) наблюдали резкое снижение OD ниже 0,200, свидетельствующее о нарушении способности образовывать стабильную биопленку в условиях острого дефицита питательных веществ. Интересно, что штаммы с наиболее высоким исходным потенциалом (например, образцы №11 и №22) сохраняли относительную устойчивость к обеднению: даже при разведении 1:64 их OD превышала 0,400.

Это позволяет предполагать наличие у них более эффективного механизма адаптации к стрессу, возможно, связанного с активацией специализированных систем секреции экстрацеллюлярного матрикса (рисунок 2).

При более выраженном обеднении среды (начиная с разведения 1:256) показатель OD резко падал в четыре-шесть раз по сравнению с 1:64 и сохранял минимальные значения ($<0,070$) для более сильных разведений. Более того, стандартное отклонение резко уменьшалось: вариабельность среди штаммов при сильном обеднении среды была минимальна, что свидетельствует о том, что в условиях выраженного дефицита питательных веществ практически все культуры утратили способность образовывать устойчивую биопленку (рисунок 3).

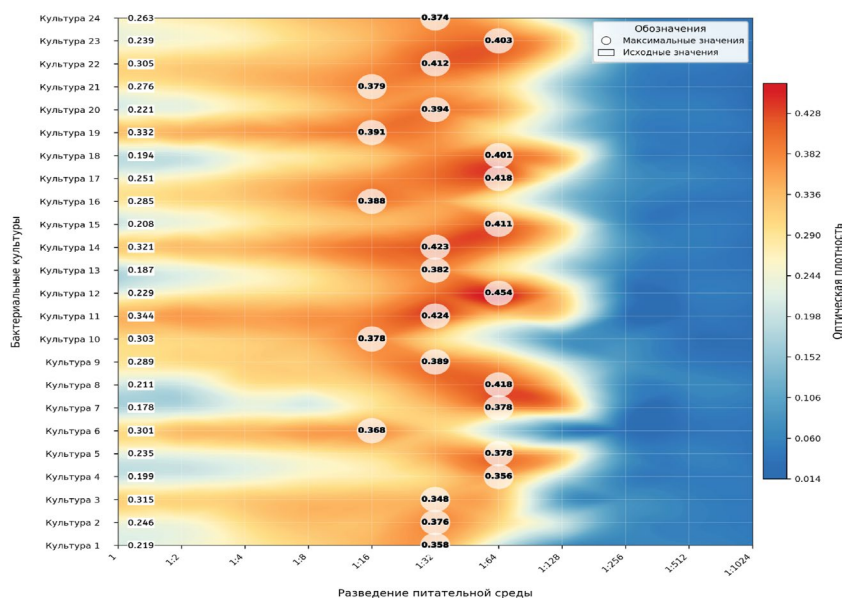


Рис. 2. Тепловая карта распределения оптической плотности биопленок *E. coli* (n=24) в зависимости от разведения питательной среды

Fig. 2. Thermal map showing the distribution of the optical density of *E. coli* biofilms (n=24) as a function of culture medium dilution

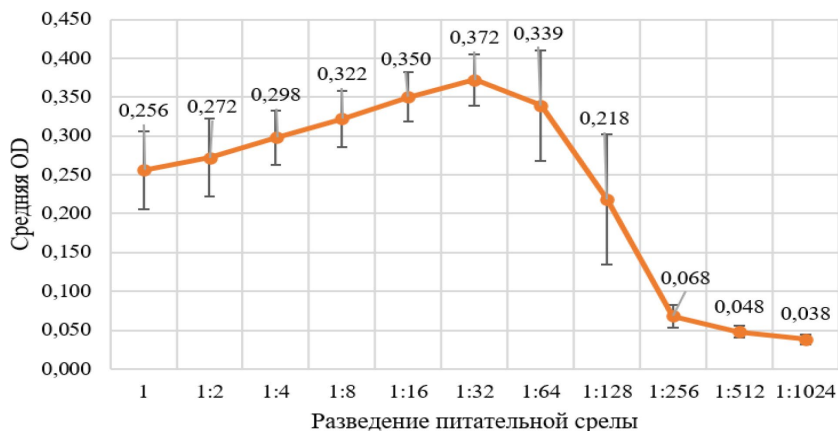


Рис. 3. Динамика интенсивности биопленкообразования *E. coli* при различных разведениях питательной среды

Fig. 3. Changes in the rate of *E. coli* biofilm formation at various nutrient medium dilutions

Такая тенденция указывает на то, что умеренный дефицит питательных ($\leq 1:64$) веществ служит стрессовым фактором, стимулирующим включение защитных адаптационных механизмов у бактерий, в том числе индукцию образования биопленки как формы выживания в неблагоприятной среде. Проведенный однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) показал статистически значимые различия между группами ($p < 0,001$), что подтверждает важность этого фактора в регуляции процесса биопленкообразования.

Однако при дальнейшем увеличении степени разведения ($\geq 1:128$) наблюдали резкое снижение уровня биопленкообразования. Так, при разведении 1:128 средний показатель OD уже составляла $0,224 \pm 0,072$, а при 1:1024 лишь $0,038 \pm 0,006$. Это свидетельствует о том, что при чрезмерной нехватке питательных веществ происходит подавление метаболической активности бактерий, что не позволяет им эффективно образовывать биопленку. Статистически достоверные различия ($p < 0,001$) между OD при концентрации питательной среды 1:64 и OD при более сильных разведениях подтверждают это заключение.

Заключение

Проведенное исследование установило значимую корреляцию между степенью нутриентного стресса и биопленкообразующей активностью полирезистентных штаммов *Escherichia coli*. Выявлена зависимость между степенью разведения питательной среды и уровнем биопленкообразования: умеренный стресс (концентрация питательной среды 1:2-1:64) способствует активации синтеза биопленки, тогда как глубокий дефицит субстрата (разведения 1:128-1:1024) приводит к его ингибированию. Стимуляция биопленкообразования при разведении среды 1:32 сопровождалась увеличением оптической плотности до $0,372 \pm 0,033$, что соответствует 45,3 % приросту относительно исходного уровня ($p < 0,001$). Данный феномен интерпретируется нами как адаптивная стратегия бактерий, направленная на повышение выживаемости в неблагоприятных условиях. Полученные данные подчеркивают важность учета стрессовых факторов окружающей среды как при моделировании условий биопленкообразования *in vitro*, так и при разработке подходов к преодолению устойчивости микроорганизмов к антибактериальным препаратам.

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

Информация о спонсорстве. Исследования выполнены в рамках гранта РНФ «Исследование формирования биопленок этиологически значимыми патогенными и условно-патогенными микроорганизмами с множественной лекарственной устойчивостью, выделенными от сельскохозяйственных животных и птицы» (25-26-20048).

Список литературы

1. Антонецкий, И. В., Плешакова, В. И., & Лещева, Н. А. (2025). Биопленкообразующая микрофлора в структуре микроорганизмов, выделенных от сельскохозяйственных и домашних животных. *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана*, 261(1), 16–24. https://doi.org/10.31588/2413_4201_1883_1_261_16. EDN: <https://elibrary.ru/NFFJAC>
2. Артюх, Т. В., Соколова, Т. Н., & Островская, О. Б. (2021). Особенности резистентности клинических изолятов *E. coli* и *C. albicans*, образующих биопленку. *Вестник Витебского государственного медицинского университета*, 20(1), 46–54. <https://doi.org/10.22263/2312-4156.2021.1.46>. EDN: <https://elibrary.ru/HODBXP>
3. Зубарева, В. Д., Иванова, Л. В., Петрова, О. А., & Сидоренко, С. В. (2022). Молекулярные механизмы и генетические детерминанты устойчивости к антибактериальным препаратам у микроорганизмов (обзор). *Сельскохозяйственная биология*, 57(2), 237–256. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.2.237rus>. EDN: <https://elibrary.ru/KVCBZO>
4. Кузнецова, М. В., Иванов, А. Б., Петрова, С. К., & Смирнов, В. Ф. (2022). Биопленкообразование *Escherichia coli* как триггер катетер-ассоциированных инфекций мочевыводящих путей. *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*, (1), 13–25. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.2>. EDN: <https://elibrary.ru/XRZAYM>
5. Матосова, Е. В., & Дробот, Е. И. (2022). Динамика межвидового взаимодействия энтеробактерий в составе бикультуральной биопленки. В *Инфекционные болезни в современном мире: эволюция, текущие и будущие угрозы. Сборник трудов XIV Ежегодного Всероссийского Конгресса по инфекционным болезням имени академика В. И. Покровского, Москва, 28–30 марта 2022 года* (стр. 111–112). Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Медицинское Маркетинговое Агентство». EDN: <https://elibrary.ru/PXYOYY>
6. Пилип, Л. В., Коваленко, И. М., Мельник, О. Г., & Савченко, Я. О. (2023). Коллиформные бактерии как компоненты биопленок навозных стоков. *Юг России: экология, развитие*, 18(3), 118–125. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-3-118-125>. EDN: <https://elibrary.ru/FYUFLY>

7. Табакова, Ю. А. (2021). Особенности формирования биопленок лактобациллами. В *Биоразнообразие, биоресурсы, вопросы биотехнологии и здоровье населения Северо-Кавказского региона* (стр. 238–241). EDN: <https://elibrary.ru/GIBPQD>
8. Чердакова, В. О., Бряднов, В. С., & Шкиль, Н. Н. (2025). Влияние наночастиц серебра и Биосиб Ацида на биопленки *Staphylococcus aureus*. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, (1), 69–73. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-243-1-69-73>. EDN: <https://elibrary.ru/OTWEXA>
9. Alshaikh, S. A., Elsharawy, N. T., El-Sokkary, M. M. A., & Barwa, R. (2024). Correlation between antimicrobial resistance, biofilm formation, and virulence determinants in uropathogenic *Escherichia coli* from Egyptian hospital. *Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials*, 23(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s12941-024-00679-2>. EDN: <https://elibrary.ru/CTTNTH>
10. Del Mazo-Monsalvo, I., & Santiago-Martínez, M. G. (2024). Microbes produce biofilms to support their communities in nutrient-limited environments. *Nature Microbiology*, 9(7), 1636–1637. <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01717-7>. EDN: <https://elibrary.ru/DAPCED>
11. Donlan, R. M. (2000). Role of biofilms in antimicrobial resistance. *ASAIO Journal*, 46(6), S47–S52. <https://doi.org/10.1097/00002480-200011000-00037>
12. Dufour, D., Leung, V., & Lévesque, C. M. (2010). Bacterial biofilm: structure, function, and antimicrobial resistance. *Endodontic Topics*, 22(1), 2–16. <https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2012.00277.x>
13. Gunathilaka, G. U. D. C., Nugegoda, D. B., & Kottawatta, S. A. (2024). Biofilm-forming ability, antibiotic resistance and phylogeny of *Escherichia coli* isolated from extra intestinal infections of humans, dogs, and chickens. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 105, 102. <https://doi.org/10.1016/j.cimid.2024.102123>
14. Merchel Piovesan Pereira, B., Wang, X., & Tagkopoulos, I. (2021). Biocide-induced emergence of antibiotic resistance in *Escherichia coli*. *Frontiers in Microbiology*, 12, 640–653. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.640923>. EDN: <https://elibrary.ru/HEMTSF>
15. Nasrollahian, S., Graham, J. P., & Halaji, M. (2024). A review of the mechanisms that confer antibiotic resistance in pathotypes of *E. coli*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1387–1397. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1387497>. EDN: <https://elibrary.ru/GZGYKB>
16. Patel, R. (2005). Biofilms and antimicrobial resistance. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (437), 41–47. <https://doi.org/10.1097/00003086-200508000-00009>

17. Qian, W., Li, X., Yang, M., Liu, M., Li, J., & Li, Y. (2022). Relationship between antibiotic resistance, biofilm formation, and biofilm-specific resistance in *Escherichia coli* isolates from Ningbo, China. *Infection and Drug Resistance*, 15, 2865–2878. <https://doi.org/10.2147/IDR.S370869>. EDN: <https://elibrary.ru/EPPJPL>
18. Rather, M. A., Gupta, K., & Mandal, M. (2021). Microbial biofilm: formation, architecture, antibiotic resistance, and control strategies. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(4), 1701–1718. <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00624-x>. EDN: <https://elibrary.ru/RBERSO>
19. Stanford, K., Zaheer, R., Klima, C., McAllister, T., Peters, D., Niu, Y. D., & Ralston, B. (2021). Biofilm-forming capacity of *Escherichia coli* isolated from cattle and beef packing plants: relation to virulence attributes, stage of processing, antimicrobial interventions, and heat tolerance. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(23), e01126-21. <https://doi.org/10.1128/AEM.01126-21>. EDN: <https://elibrary.ru/UYPGTT>
20. Stepanović, S., Vuković, D., Hola, V., Di Bonaventura, G., Djukić, S., Ćirković, I., & Ruzicka, F. (2000). A modified microtiter-plate test for quantification of staphylococcal biofilm formation. *Journal of Microbiological Methods*, 40(2), 175–179. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00122-6)

References

1. Antonevsky, I. V., Pleshakova, V. I., & Leshcheva, N. A. (2025). Biofilm-forming microflora in the structure of microorganisms isolated from agricultural and domestic animals. *Proceedings of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N. E. Bauman*, 261(1), 16–24. https://doi.org/10.31588/2413_4201_1883_1_261_16. EDN: <https://elibrary.ru/NFFJAC>
2. Artyukh, T. V., Sokolova, T. N., & Ostrovskaya, O. B. (2021). Features of the resistance of clinical isolates of *E. coli* and *C. albicans* forming a biofilm. *Bulletin of the Vitebsk State Medical University*, 20(1), 46–54. <https://doi.org/10.22263/2312-4156.2021.1.46>. EDN: <https://elibrary.ru/HODBXP>
3. Zubareva, V. D., Ivanova, L. V., Petrova, O. A., & Sidorenko, S. V. (2022). Molecular mechanisms and genetic determinants of resistance to antibacterial drugs in microorganisms (review). *Agricultural Biology*, 57(2), 237–256. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.2.237rus>. EDN: <https://elibrary.ru/KVCBZO>
4. Kuznetsova, M. V., Ivanov, A. B., Petrova, S. K., & Smirnov, V. F. (2022). Biofilm formation by *Escherichia coli* as a trigger of catheter-associated urinary tract infections. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*, (1), 13–25. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.2>. EDN: <https://elibrary.ru/XRZAYM>
5. Matosova, E. V., & Drobot, E. I. (2022). Dynamics of interspecies interaction of enterobacteria in a biculture biofilm. In *Infectious diseases in the modern world:*

- evolution, current and future threats. Proceedings of the 14th Annual All-Russian Congress on Infectious Diseases named after Academician V. I. Pokrovsky, Moscow, March 28–30, 2022* (pp. 111–112). Moscow: Medical Marketing Agency LLC. EDN: <https://elibrary.ru/PXYOYY>
6. Pilip, L. V., Kovalenko, I. M., Melnik, O. G., & Savchenko, Y. O. (2023). Coliform bacteria as components of biofilms in manure effluents. *South of Russia: Ecology, Development*, 18(3), 118–125. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-3-118-125>. EDN: <https://elibrary.ru/FYUFLY>
 7. Tabakova, Yu. A. (2021). Features of biofilm formation by lactobacilli. In *Biodiversity, bioresources, biotechnology issues and public health in the North Caucasus region* (pp. 238–241). EDN: <https://elibrary.ru/GIBPQD>
 8. Cherdakova, V. O., Bryadnov, V. S., & Shkil, N. N. (2025). Effect of silver nanoparticles and Biosib Acid on Staphylococcus aureus biofilms. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, (1), 69–73. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-243-1-69-73>. EDN: <https://elibrary.ru/OTWEXA>
 9. Alshaikh, S. A., Elsharawy, N. T., El-Sokkary, M. M. A., & Barwa, R. (2024). Correlation between antimicrobial resistance, biofilm formation, and virulence determinants in uropathogenic Escherichia coli from Egyptian hospital. *Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials*, 23(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s12941-024-00679-2>. EDN: <https://elibrary.ru/CTTNTH>
 10. Del Mazo-Monsalvo, I., & Santiago-Martínez, M. G. (2024). Microbes produce biofilms to support their communities in nutrient-limited environments. *Nature Microbiology*, 9(7), 1636–1637. <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01717-7>. EDN: <https://elibrary.ru/DAPCED>
 11. Donlan, R. M. (2000). Role of biofilms in antimicrobial resistance. *ASAIO Journal*, 46(6), S47–S52. <https://doi.org/10.1097/00002480-200011000-00037>
 12. Dufour, D., Leung, V., & Lévesque, C. M. (2010). Bacterial biofilm: structure, function, and antimicrobial resistance. *Endodontic Topics*, 22(1), 2–16. <https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2012.00277.x>
 13. Gunathilaka, G. U. D. C., Nuggeoda, D. B., & Kottawatta, S. A. (2024). Biofilm-forming ability, antibiotic resistance and phylogeny of Escherichia coli isolated from extra intestinal infections of humans, dogs, and chickens. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 105, 102. <https://doi.org/10.1016/j.cimid.2024.102123>
 14. Merchel Piovesan Pereira, B., Wang, X., & Tagkopoulos, I. (2021). Biocide-induced emergence of antibiotic resistance in Escherichia coli. *Frontiers in Microbiology*, 12, 640–653. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.640923>. EDN: <https://elibrary.ru/HEMTSF>

15. Nasrollahian, S., Graham, J. P., & Halaji, M. (2024). A review of the mechanisms that confer antibiotic resistance in pathotypes of *E. coli*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1387–1397. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1387497>. EDN: <https://elibrary.ru/GZGYKB>
16. Patel, R. (2005). Biofilms and antimicrobial resistance. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (437), 41–47. <https://doi.org/10.1097/00003086-200508000-00009>
17. Qian, W., Li, X., Yang, M., Liu, M., Li, J., & Li, Y. (2022). Relationship between antibiotic resistance, biofilm formation, and biofilm-specific resistance in *Escherichia coli* isolates from Ningbo, China. *Infection and Drug Resistance*, 15, 2865–2878. <https://doi.org/10.2147/IDR.S370869>. EDN: <https://elibrary.ru/EPPJPL>
18. Rather, M. A., Gupta, K., & Mandal, M. (2021). Microbial biofilm: formation, architecture, antibiotic resistance, and control strategies. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(4), 1701–1718. <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00624-x>. EDN: <https://elibrary.ru/RBERSO>
19. Stanford, K., Zaheer, R., Klima, C., McAllister, T., Peters, D., Niu, Y. D., & Ralston, B. (2021). Biofilm-forming capacity of *Escherichia coli* isolated from cattle and beef packing plants: relation to virulence attributes, stage of processing, antimicrobial interventions, and heat tolerance. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(23), e01126-21. <https://doi.org/10.1128/AEM.01126-21>. EDN: <https://elibrary.ru/UYPGTT>
20. Stepanović, S., Vuković, D., Hola, V., Di Bonaventura, G., Djukić, S., Ćirković, I., & Ruzicka, F. (2000). A modified microtiter-plate test for quantification of staphylococcal biofilm formation. *Journal of Microbiological Methods*, 40(2), 175–179. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00122-6)

ВКЛАД АВТОРОВ

Антоневский И.В.: изучение биопленкообразования микроорганизмов, сбор и анализ данных, написание текста.

Плешакова В.И.: планирование исследований, анализ данных и написание текста.

Лещёва Н.А.: изучение биологических свойств возбудителей, сбор и анализ данных, написание текста.

Фрик Е.В.: выделение и изучение биологических свойств возбудителей, в том числе определение антибиотикорезистентности.

Миненкова О.В.: выделение и изучение биологических свойств возбудителей, в том числе определение антибиотикорезистентности.

Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Igor V. Antonevskiy: study of biofilm formation of microorganisms, data collection and analysis, writing of the text.

Valentina I. Pleshakova: research planning, data analysis and writing of the text.

Nadezhda A. Lescheva: study of biological properties of pathogens, data collection and analysis, writing of the text.

Elizaveta V. Frick: isolation and study of biological properties of pathogens, including determination of antibiotic resistance.

Olga V. Minenkova: isolation and study of the biological properties of pathogens, including determination of antibiotic resistance.

All the authors have read the final version of the article and approved it.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Антоневский Игорь Викторович, ассистент каф. ветеринарной микробиологии, инфекционных и инвазионных болезней фак-та ветеринарной медицины ИВМиБ
Омский государственный аграрный университет
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
iv.antonevskiy1721@omgau.org

Плешакова Валентина Ивановна, д-р ветеринар. наук, профессор, профессор кафедры ветеринарной микробиологии, инфекционных и инвазионных болезней факультета ветеринарной медицины ИВМиБ
Омский государственный аграрный университет
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
vi.pleshakova@omgau.org

Лещёва Надежда Алексеевна, кандидат ветеринарных наук, доцент, заведующий кафедрой инфекционных и инвазионных болезней факультета ветеринарной медицины ИВМиБ
Омский государственный аграрный университет
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
na.lescheva@omgau.org

Фрик Елизавета Вячеславовна, аспирант кафедры ветеринарной микробиологии, инфекционных и инвазионных болезней факультета ветеринарной медицины ИВМиБ
Омский государственный аграрный университет
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ev.frik1921@omgau.org

Миненкова Ольга Васильевна, аспирант каф. ветеринарной микробиологии, инфекционных и инвазионных болезней факультета ветеринарной медицины ИВМиБ

*Омский государственный аграрный университет
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ov.minenkova2412@omgau.org*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Antonevskiy, Assistant of the Department of Veterinary Microbiology, Infectious and Invasive Diseases of the Faculty of Veterinary Medicine of the Institute of Veterinary Microbiology and Biotechnology
*Omsk State Agrarian University
1, Institutskaya Sq., 644008, Russian Federation
iv.antonevskiy1721@omgau.org
SPIN-code: 1389-6357
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9337-2056>
ResearcherID: MVY-4615-2025*

Valentina I. Pleshakova, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Professor of the Department of Veterinary Microbiology, Infectious and Invasive Diseases of the Faculty of Veterinary Medicine of the Institute of Veterinary Microbiology and Biotechnology
*Omsk State Agrarian University
1, Institutskaya Sq., 644008, Russian Federation
vi.pleshakova@omgau.org
SPIN-code: 4372-5742
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7896-2339>
ResearcherID: ABG-9332-2021
Scopus Author ID: 57214335417*

Nadezhda A. Lescheva, Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Infectious and Invasive Diseases of the Faculty of Veterinary Medicine of the Institute of Veterinary Microbiology and Biotechnology
*Omsk State Agrarian University
1, Institutskaya Sq., 644008, Russian Federation
na.lescheva@omgau.org
SPIN-code: 1482-8172
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6334-0422>
ResearcherID: AIF-2193-2022
Scopus Author ID: 57223669914*

Elizaveta V. Frick, Postgraduate Student of the Department of Veterinary Microbiology, Infectious and Invasive Diseases, Faculty of Veterinary Medicine, Institute of Veterinary Microbiology and Biotechnology
Omsk State Agrarian University
1, Institutskaya Sq., 644008, Russian Federation
ev.frik1921@omgau.org
SPIN-code: 6171-0556
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4281-2389>

Olga V. Minenkova, Postgraduate Student of the Department of Veterinary Microbiology, Infectious and Invasive Diseases, Faculty of Veterinary Medicine, Institute of Veterinary Microbiology and Biotechnology
Omsk State Agrarian University
1, Institutskaya Sq., 644008, Russian Federation
ov.minenkova2412@omgau.org
SPIN-code: 9604-4321
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4785-5542>

Поступила 24.07.2025

После рецензирования 01.09.2025

Принята 09.10.2025

Received 24.07.2025

Revised 01.09.2025

Accepted 09.10.2025

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научно-практический рецензируемый журнал **Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture** издается с целью пропаганды фундаментальных и фундаментально-прикладных региональных достижений в области медицины, биологии, сельского хозяйства и смежных дисциплин на территории Российской Федерации и за рубежом.

Требования к оформлению статей

Объем рукописи	15-24 страницы формата А4, включая таблицы, иллюстрации, список литературы; для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук – 7-10.
Поля	все поля – по 20 мм
Шрифт основного текста	Times New Roman
Размер шрифта основного текста	14 пт
Межстрочный интервал	полуторный
Отступ первой строки абзаца	1,25 см
Выравнивание текста	по ширине
Автоматическая расстановка переносов	включена
Нумерация страниц	не ведется
Формулы	в редакторе формул MS Equation 3.0
Рисунки	по тексту
Ссылки на формулу	(1)
Ссылки на литературу	[2, с.5], цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания

**ЗАПРЕЩАЕТСЯ ИСПОЛЬЗОВАТЬ
ССЫЛКИ-СНОСКИ ДЛЯ УКАЗА-
НИЯ ИСТОЧНИКОВ**

Обязательная структура статьи

УДК

ЗАГЛАВИЕ (на русском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на русском языке)

Аннотация (на русском языке)

Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой
(на русском языке)

ЗАГЛАВИЕ (на английском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на английском языке)

Аннотация (на английском языке)

Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой
(на английском языке)

Текст статьи (на русском языке)

1. Введение.

2. Цель работы.

3. Материалы и методы исследования.

4. Результаты исследования и их обсуждение.

5. Заключение.

6. Информация о конфликте интересов.

7. Информация о спонсорстве.

8. Благодарности.

Список литературы

Библиографический список по ГОСТ Р 7.05-2008

References

Библиографическое описание согласно требованиям журнала

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна (на русском языке)

Электронный адрес

SPIN-код в SCIENCE INDEX:

DATA ABOUT THE AUTHORS

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: дом, улица, город, индекс, страна (на английском языке)

Электронный адрес

AUTHOR GUIDELINES

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture is a multi-field dedicated peer reviewed scientific journal designed to promote both fundamental and applied regional achievements in the field of medicine, biology, agriculture and related sciences on the territory of the Russian Federation and abroad.

Requirements for the articles to be published

Volume of the manuscript	15-24 pages A4 format, including tables, figures, references; for post-graduates pursuing degrees of candidate and doctor of sciences – 7–10.
Margins	all margins –20 mm each
Main text font	Times New Roman
Main text size	14 pt
Line spacing	1.5 interval
First line indent	1,25 cm
Text align	justify
Automatic hyphenation	turned on
Page numbering	turned off
Formulas	in formula processor MS Equation 3.0
Figures	in the text
References to a formula	(1)
References to the sources	[2, p.5], references are given in a single list at the end of the manuscript in the order in which they appear in the text

**DO NOT USE FOOTNOTES
AS REFERENCES**

Article structure requirements

TITLE (in English)

Author(s): surname and initials (in English)

Abstract (in English)

Keywords: separated with semicolon (in English)

Text of the article (in English)

1. Introduction.

2. Objective.

3. Materials and methods.

4. Results of the research and Discussion.

5. Conclusion.

6. Conflict of interest information.

7. Sponsorship information.

8. Acknowledgments.

References

References text type should be Chicago Manual of Style

DATA ABOUT THE AUTHORS

Surname, first name (and patronymic) in full, job title, academic degree, academic title

Full name of the organization – place of employment (or study) without compound parts of the organizations' names, full registered address of the organization in the following sequence: street, building, city, postcode, country

E-mail address

SPIN-code in SCIENCE INDEX:

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

- МЕТАБОЛОМНЫЙ ПРОФИЛЬ СЫВОРОТКИ КРОВИ
ЦЫПЛЯТ-БРОЙЛЕРОВ КРОССА ARBOR ACRES: АССОЦИАЦИИ
С СОСТАВОМ КИШЕЧНОГО МИКРОБИОМА И ПОКАЗАТЕЛЯМИ
ПРОДУКТИВНОСТИ
Д.Г. Дерябин, Л.В. Власенко, И.Ф. Каримов,
Г.К. Дускаев 11
- МОРФО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КРОВИ
КУР-НЕСУШЕК ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ТРИХИНЕЛЛЕЗЕ,
ВЫЗВАННОГО *T. PSEUDOSPIRALIS*
О.Б. Жданова, А.К. Мартусевич, О.В. Часовских 40
- ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ АДРЕНАЛИНА НА МЯСНУЮ
ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО МЯСА БЫЧКОВ
АБЕРДИН-АНГУССКОЙ ПОРОДЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ
ЕГО СОДЕРЖАНИЯ В ВОЛОСЕ
А.Н. Фролов, О.А. Завьялов, З.А. Галиева 60

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

- ОЦЕНКА МОРФО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ЛИСТЬЕВ
OLEA EUROPAEA L. В СВЯЗИ С ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТЬЮ
С.Ю. Цюпка, И.В. Булавин, А.В. Синченко, В.А. Цюпка 83

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА КОМПОСТА ИЗ КУРИНОГО
ПОМЕТА, ПОЛУЧАЕМОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
КОМПОСТИРОВАНИЯ В БУРТАХ
А.Р. Камалова, Л.Г. Ахметзянова, И.Н. Курицин,
С.Г. Манишкин, П.А. Курынцева, С.Ю. Селивановская 115

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОБИОМА ПОЧВЫ
НА ТЕРРИТОРИИ ЯДОМОГИЛЬНИКА В ДЖИЗАКСКОЙ
ОБЛАСТИ УЗБЕКИСТАНА

**З.Р. Ахмедова, Т.Э. Шонахунов, А.А. Ибрагимов,
З.Т. Хамраева, М.А. Яхяева 141**

**БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА
И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ**

DETERMINATION OF ABO GROUP ALLELES
IN THE IRAQI POPULATION

M.K. Almyah, A.A. Chmagh, A.I.E. Al-laeiby, S.T. Yassen 170

EXPLORING NLRP3, NLRC4, AIM 2 AND THEIR INFLAMMATORY
CYTOKINES IN UTI OF BASRAH PROVINCE, IRAQ

Z.A. Eidan, W.S. Shani, M.A.-I. Almazini 184

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

ПЕРВОЕ СООБЩЕНИЕ О ПАТОГЕНЕ
FUSARIUM CURVATUM L. LOMBARD & CROUS
МИКОПАТОКОМПЛЕКСА КОРНЕВОЙ ГНИЛИ
ЯБЛОНИ В РОССИИ

**И.Л. Астапчук, Г.В. Якуба, С.В. Федорович,
А.В. Елисютикова, Н.А. Кузнецова, А.И. Насонов 207**

INVESTIGATING ARBOREAL ANT COMMUNITIES AS PREDATORS
OF COFFEE BERRY BORER (*HYPOTHENEMUS HAMPEI* FERR.) IN
ARABICA COFFEE PLANTATIONS

**J. Jauharlina, Icha Destriany, Nihayatul Afifah Husna,
Muhammad Sayuthi, Tjut Chamzurni 224**

СИСТЕМА СЕЛЕКЦИИ И СЕМЕНОВОДСТВА

МИКРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОВСА ПОСЕВНОГО
(*AVENA SATIVA* L.) В ЮВЕНИЛЬНЫЙ ПЕРИОД ПРИ ТОКСИЧЕСКОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ

А.А. Ахтямова 244

САДОВОДСТВО И ЛЕСОВОДСТВО

ИЗУЧЕНИЕ АДАПТИВНЫХ ФОРМ
КЛОНОВЫХ ПОДВОЕВ ЯБЛОНИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЯХ ЮЖНОГО УРАЛА

**А.А. Борисова, Е.З. Савин, В.А. Новиков,
Т.В. Березина, А.А. Мушинский, А.Ж. Саудабаева 262**

РОСТ КУЛЬТУР СОСНЫ СКРУЧЕННОЙ
(*PINUS CONTORTA* DOUGLAS EX LOUDON)
В ЛЕСОРАСТИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОКА
МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

А.В. Лебедев, Р.С. Хамитов, С.М. Хамитова 283

**ЗДРАВООХРАНЕНИЕ
И ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА**

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ
ФОТОБИОМОДУЛЯЦИИ ПРИ ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОЙ
ГОЛОВНОЙ БОЛИ

**А.К. Мартусевич, Н.Л. Богачек, О.В. Евстафьев,
В.С. Бадянова 302**

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БИФУРКАЦИЙ ВЕНЕЧНЫХ
АРТЕРИЙ СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА В НОРМЕ ПО ДАННЫМ
РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЛИЦ РАЗНОГО ПОЛА,
ВТОРОГО ПЕРИОДА ЗРЕЛОГО И ПОЖИЛОГО ВОЗРАСТА

**А.В. Дмитриев, А.А. Сергиенко, И.С. Милтых,
О.К. Зенин 315**

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ОТКЛИКА НА МУЛЬТИКАНАЛЬНЫЕ
КОММУНИКАЦИИ В АПТЕЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

А.С. Пантелеев, Ж.В. Мироненкова, Л.М. Габдулхакова 334

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СМЕШАННЫХ МЕДИЦИНСКИХ КОМИССИЙ
И ПРОВЕДЕНИЕ ВОЕННО-ВРАЧЕБНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ:
ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

П.Ю. Наумов, И.В. Холиков 352

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРМОНАЛЬНОЙ И НЕГОРМОНАЛЬНОЙ
ТЕРАПИИ ПРИ АНОМАЛЬНОМ МАТОЧНОМ КРОВОТЕЧЕНИИ:
ФОКУС НА БЕЗОПАСНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЖИЗНИ**

Т.В. Панина, А.Н. Сулима 373

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ВНУТРЕННЕГО КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА НАРКОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ РЕГИОНА**

**А.В. Ахохова, М.Х. Тлакадугова, М.Б. Хуламханова,
А.М. Отарова, А.М. Агтоева, М.Р. Гоплачева, Д.А. Геляева,
А.Р. Акубеков, С.Ю. Шогенова 388**

**КСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ
ХЛОРИДА КАДМИЯ И ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

**И.А. Минигалиева, Л.В. Шабардина, Р.Р. Сахаутдинова,
М.П. Сутункова, М.С. Унесихина, О.Г. Макеев 414**

**НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ
И СООБЩЕНИЯ**

**ЭПИКАРДИАЛЬНЫЙ ЖИР КАК НЕЗАВИСИМЫЙ ПРЕДИКТОР
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

**А.А. Зюзина, В.И. Вишневский, И.А. Снимщикова,
М.О. Ревякина, М.В. Вишневский 440**

**ПОДХОД ZERO WASTE НА ПРЕДПРИЯТИЯХ
ПИТАНИЯ: НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ
ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА**

**О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Д.А. Песоцкая,
Ю.В. Николаева, М.А. Шанк 457**

**ПАТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
КОМОРБИДНОСТИ СИНДРОМА ОБСТРУКТИВНОГО
АПНОЭ СНА (НАУЧНЫЙ ОБЗОР)**

**Е.А. Ермакова, Д.С. Куспаналиева,
С.В. Булатецкий, Д.С. Ванина 479**

ДУБИЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВ**КОНДЕНСИРОВАННОГО ТИПА (ПРОАНТОЦИАНИДИНЫ)****В ЖИВОТНОВОДСТВЕ: ПРОТИВОПАРАЗИТАРНАЯ****АКТИВНОСТЬ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)**

Е.М. Мальцева, Л.Г. Пинчук, Р.М. Акбаев 497

**МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ****ИММУНОМОДЕЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОЛИСАХАРИДОВ****МАКРОВЕДОРОСЛЕЙ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

Е.В. Ульрих, О.А. Новожилов,

С.В. Агафонова, Е.С. Землякова, Н.Ю. Ключко,

А.Х. Обрегон, А.В. Качанова, О.С. Федорова 524

УСТОЙЧИВАЯ ЦИРКУЛЯРНАЯ**БИОЭКОНОМИКА И ПЕРЕРАБОТКА****СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ:****ЧТО МЫ ЗНАЕМ О ПРОИЗВОДСТВЕ****БАНАНОВОГО ВОЛОКНА?**

Н.А. Цаценко, Л.В. Цаценко, А.Ш. Какунзе 541

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ**ПЕРЕРАБОТКИ ОВСА И ЛЬНА НА КАЧЕСТВО****И БИОЛОГИЧЕСКУЮ ЦЕННОСТЬ ПРОДУКТОВ****НАРОДНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ**

Д.Е. Колпакова, А. Naik, И.И. Плешивцев,

И.С. Милентьева, Л.К. Асякина 556

АНАЛИЗ ПЕРЕВАРИМОСТИ КОРМОВ**У ДИКОГО И ФЕРМЕРСКОГО СОБОЛЯ (MARTES ZIBELLINA)****В ЯКУТИИ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ АЗИЯ)**

Н.Н. Захарова, В.Б. Кудрявцев, Е.С. Захаров 579

АНАЛИЗ СТЕЙКХОЛДЕРОВ**И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ****НА РЫНКЕ КОРМОВ ДЛЯ АКВАКУЛЬТУРЫ**

М.В. Кольган, Ю.Ю. Медведева 593

СТРЕСС-ИНДУЦИРОВАННОЕ БИОПЛЕНКООБРАЗОВАНИЕ ПОЛИРЕЗИСТЕНТНЫХ <i>ESCHERICHIA COLI</i> , ВЫДЕЛЕННЫХ ОТ ЖИВОТНЫХ И.В. Антонеvский, В.И. Плешакова, Н.А. Лещёва, Е.В. Фрик, О.В. Миненкова	610
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	629

CONTENTS

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

- SERUM METABOLOMIC PROFILE
IN ARBOR ACRES BROILER CHICKENS: ASSOCIATIONS
WITH GUT MICROBIOME COMPOSITION AND PRODUCTIVITY
PERFORMANCE
D.G. Deryabin, L.V. Vlasenko, I.F. Karimov, G.K. Duskaev 11
- MORPHO-FUNCTIONAL CHANGES
IN THE BLOOD OF LAYING HENS IN EXPERIMENTAL
TRICHINOSIS CAUSED BY *T. PSEUDOSPIRALIS*
O.B. Zhdanova, A.K. Martusevich, O.V. Chasovskikh 40
- THE INFLUENCE OF ADRENALINE LEVEL
ON MEAT PRODUCTIVITY AND MEAT QUALITY
OF ABERDEEN ANGUS BULLS BASED
ON ITS DETERMINATION IN HAIR
A.N. Frolov, O.A. Zavyalov, Z.A. Galieva 60

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

- EVALUATION OF MORPHO-PHYSIOLOGICAL TRAITS OF *OLEA
EUROPAEA* L. ASSOCIATED WITH THE DROUGHT-RESISTANCE
S.Y. Tsiupka, I.V. Bulavin, A.V. Sinchenko, V.A. Tsiupka 83

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

- ASSESSMENT OF THE CARBON FOOTPRINT OF CHICKEN
MANURE COMPOST PRODUCED USING WINDROW COMPOSTING
TECHNOLOGY
**A.R. Kamalova, L.G. Akhmetzyanova, I.N. Kuritsin,
S.G. Manishkin, P.A. Kuryntseva, S.Yu. Selivanovskaya** 115

STUDY OF SOIL MICROBIOME

IN THE TERRITORY OF A TOXIC WASTE BURIAL SITE

IN JIZZAKH REGION, UZBEKISTAN

Z.R. Akhmedova, T.E. Shonakhunov, A.A. Ibragimov,**Z.T. Khamraeva, M.A. Yakhyayeva** 141**BIOCHEMISTRY, GENETICS
AND MOLECULAR BIOLOGY**

DETERMINATION OF ABO GROUP ALLELES

IN THE IRAQI POPULATION

M.K. Almyah, A.A. Chmagh, A.I.E. Al-laeiby, S.T. Yassen 170EXPLORING NLRP3, NLRC4, AIM 2 AND THEIR INFLAMMATORY
CYTOKINES IN UTI OF BASRAH PROVINCE, IRAQ**Z.A. Eidan, W.S. Shani, M.A.-I. Almazini** 184**SOIL FERTILITY
AND PLANT PROTECTION**FIRST REPORT ON THE PATHOGEN *FUSARIUM CURVATUM* L.

LOMBARD & CROUS OF THE APPLE ROOT GRAIN MYCOPATHOS

COMPLEX IN RUSSIA

I.L. Astapchuk, G.V. Yakuba, S.V. Fedorovich,**A.V. Yelisyutikova, N.A. Kuznetsova, A.I. Nasonov** 207

INVESTIGATING ARBOREAL ANT COMMUNITIES

AS PREDATORS OF COFFEE BERRY BORER (*HYPOTHENEMUS**HAMPEI* FERR.) IN ARABICA COFFEE PLANTATIONS**J. Jauharlina, Icha Destriany, Nihayatul Afifah Husna,****Muhammad Sayuthi, Tjut Chamzurni** 224**PLANT BREEDING AND SEED PRODUCTION**

MICROMORPHOLOGICAL CHANGES

IN OATS (*AVENA SATIVA* L.) IN THE JUVENILE PERIOD

UNDER TOXIC EXPOSURE TO ALUMINUM IONS

A.A. Akhtyamova 244

HORTICULTURE AND FORESTRY

STUDY OF ADAPTIVE FORMS OF CLONAL APPLE TREE ROOTSTOCKS IN EXTREME CONDITIONS OF THE SOUTH URAL A.A. Borisova, E.Z. Savin, V.A. Novikov, T.V. Berezina, A.A. Mushinsky, A.Zh. Saudabaeva	262

GROWTH OF LODGEPOLE PINE (<i>PINUS CONTORTA</i> DOUGLAS EX LOUDON) PLANTATIONS IN FOREST CONDITIONS OF THE NORTH-EAST OF MOSCOW REGION A.V. Lebedev, R.S. Khamitov, S.M. Khamitova	283

PUBLIC HEALTH AND PREVENTIVE MEDICINE

THE ESTIMATION OF TRANSCRANIAL PHOTOBIMODULATION EFFICIENCY IN COMPLEX TREATMENT OF PATIENTS WITH POSTTRAUMATIC CEPHALGIA A.K. Martusevich, N.L. Bogachek, O.V. Evstafyev, V.S. Badyanova	302

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF CORONARY ARTERY BIFURCATIONS IN NORMAL HUMAN HEARTS BASED ON X-RAY EXAMINATION IN INDIVIDUALS OF DIFFERENT SEXES IN THE SECOND PERIOD OF MATURE AND ELDERLY AGE A.V. Dmitriev, A.A. Sergienko, I.S. Milykh, O.K. Zenin	315

FORMING A MODEL OF RESPONSE TO MULTICHANNEL COMMUNICATIONS IN A PHARMACY A.S. Panteleev, J.V. Mironenkova, L.M. Gabdulkhakova	334

ACTIVITIES OF MIXED MEDICAL COMMISSIONS AND CONDUCTING MILITARY MEDICAL EXAMINATION: ORGANIZATIONAL AND LEGAL BASICS OF INTERACTION P.Yu. Naumov, I.V. Kholikov	352

EFFICACY OF HORMONAL AND NON-HORMONAL THERAPY
FOR ABNORMAL UTERINE BLEEDING: FOCUS ON SAFETY
AND QUALITY OF LIFE

T.V. Panina, A.N. Sulima 373

INFORMATION MANAGEMENT TECHNOLOGIES
FOR SOLVING APPLIED PROBLEMS OF INTERNAL QUALITY
CONTROL IN THE REGIONAL DRUG ADDICTION SERVICE

**A.V. Akhokhova, M.Kh. Tlakadugova, M.B. Khulamkhanova,
A.M. Otarova, A.M. Attoeva, M.R. Goplacheva, D.A. Gelyaeva,
A.R. Akubekov, S.Yu. Shogenova** 388

EXPERIMENTAL EVALUATION OF EFFECTIVENESS
OF A BIOPROPHYLLACTIC COMPLEX ADMINISTERED
DURING CADMIUM CHLORIDE EXPOSURE COMBINED
WITH PHYSICAL EXERCISE

**I.A. Minigalieva, L.V. Shabardina, R.R. Sakhautdinova,
M.P. Sutunkova, M.S. Unesikhina, O.H. Makeyev** 414

SCIENTIFIC REVIEWS AND REPORTS

EPICARDIAL FAT AS AN INDEPENDENT PREDICTOR OF
CARDIOVASCULAR DISEASE

**A.A. Ziuzina, V.I. Vishnevsky, I.A. Snimshchikova,
M.O. Revyakina, M.V. Vishnevsky** 440

ZERO WASTE APPROACH IN FOOD ENTERPRISES:
DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT OF CLOSED-LOOP ECONOMY

**O.A. Suvorov, R.H. Kandrov, D.A. Pesotskaya,
Y.V. Nikolaeva, M.A. Shank** 457

PATHOGENETIC ASPECTS OF COMORBIDITY OF OBSTRUCTIVE
SLEEP APNEA SYNDROME (SCIENTIFIC REVIEW)

E.A. Ermakova, D.S. Kuspanalieva, S.V. Bulatetskiy, D.S. Vanina 479

CONDENSED TANNINS (PROANTHOCYANIDINS) IN LIVESTOCK:
ANTIPARASITIC ACTIVITY (REVIEW)

E.M. Maltseva, L.G. Pinchuk, R.M. Akbaev 497

INTERDISCIPLINARY RESEARCH

IMMUNOMODULATORY PROPERTIES OF POLYSACCHARIDES FROM BALTIC SEA MACROALGAE

**E.V. Ulrikh, O.A. Novozhilov, S.V. Agafonova, E.S. Zemlyakova,
N.Yu. Klyuchko, A.J. Obregón-La Rosa, A.V. Kachanova, O.S. Fedorova** 524

SUSTAINABLE CIRCULAR BIOECONOMY AND AGRO-RECYCLING: WHAT DO WE KNOW ABOUT BANANA FIBRE INDUSTRY?

N.A. Tsatsenko, L.V. Tsatsenko, A.Ch. Kakunze 541

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF OAT AND FLAX PROCESSING PRODUCTS ON THE QUALITY AND BIOLOGICAL VALUE OF CONSUMER PRODUCTS

**D.E. Kolpakova, A. Naik, I.I. Pleshivtsev, I.S. Milentyeva,
L.K. Asyakina** 556

ANALYSIS OF FEED DIGESTIBILITY IN WILD AND FARMED SABLE (MARTES ZIBELLINA) IN YAKUTIA (NORTHEAST ASIA)

N.N. Zakharova, V.B. Kudryavtsev, E.S. Zakharov 579

ANALYSIS OF STAKEHOLDERS AND CONSUMER PREFERENCES IN THE AQUACULTURE FEED MARKET

M.V. Kolgan, Y.Y. Medvedeva 593

STRESS-INDUCED BIOFILM FORMATION IN MULTIDRUG-RESISTANT *ESCHERICHIA COLI* ISOLATED FROM ANIMALS

**I.V. Antonevskiy, V.I. Pleshakova, N.A. Lescheva,
E.V. Frick, O.V. Minenkova** 610

RULES FOR AUTHORS 629

Подписано в печать 28.02.2026. Дата выхода в свет 28.02.2026. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 45,88. Тираж 50 экз. Свободная цена. Заказ SJLSA181/026. Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Издательство «Авторская Мастерская» (ИП Давгуненко А.А. ИНН 344210747590). Адрес типографии: ул. Проезд Добролюбова 3 стр. 2, г. Москва, 127254, Россия.