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

Siberian journal of Life Sciences and Agriculture

SjLSA

www.discover-journal.ru



Volume 17, Number 2
2025

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

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

Volume 17, Number 2
2025

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

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

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

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

Красноярск 2025

12+

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture

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

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

Том 17, № 2, 2025 / Vol. 17, No 2, 2025

Учредитель и издатель:
ООО Научно-инновационный центр

Журнал основан в 2008 году
Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство регистрации
ПИ № ФС 77 - 71726 от 30.11.2017 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
PI № FS 77 - 71726,
issued November 30, 2017.

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

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

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

+7 (995) 080-90-42

Свободная цена
© Научно-инновационный центр, 2025

Члены редакционной коллегии

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

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

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

Барабанов 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 государственный 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 Ендон 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. ВНИИССОК, 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 РАО, 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 Маиса Афанасьевна, доктор медицинских наук, профессор, ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Москва, Россия)
Иванченко Вячеслав Иосифович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Симферополь, Россия)
Иванцова Елена Анатольевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Волгоградский государственный университет (Волгоград, Россия)
Казакова Алия Сабировна, доктор биологических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ (Зерноград, Россия)
Казыдуб Нина Григорьевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина (Омск, Россия)
Калягин Алексей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, МВА, Иркутский государственный медицинский университет (Иркутск, Россия)
Карганов Михаил Юрьевич, доктор биологических наук, профессор, Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии (Москва, Россия)
Кашеваров Николай Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (Новосибирск, Россия)
Клименко Виктор Павлович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)
Ковалев Николай Николаевич, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Владивосток, Россия)
Козлов Василий Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент, Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Москва, Россия)
Колесников Сергей Ильич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Коробова Лариса Николаевна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» (Новосибирск, Россия)
Кузин Андрей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)
Кузьмин Сергей Владимирович, доктор медицинских наук, профессор, Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора (Мытищи, Россия)
Лесовская Марина Игоревна, доктор биологических наук, профессор, Красноярский государственный аграрный университет (Красноярск, Россия)
Лисняк Анатолий Анатольевич, кандидат сельскохозяйственных наук, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (Харьков, Украина)
Лиховской Владимир Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «МАГАРАЧ» (Ялта, Россия)
Мазиров Михаил Арнольдович, доктор биологических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)
Манаенков Александр Сергеевич, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН (Волгоград, Россия)

Манчук Валерий Тимофеевич, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)
Марзанов Нурбий Сафарбиевич, доктор биологических наук, профессор, Федеральный исследовательский центр животноводства - ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста (Подольск, Россия)
Мельченко Александр Иванович, доктор биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)
Меньшикова Лариса Ивановна, доктор медицинских наук, профессор, Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования (Москва, Россия)
Минигалиева Ильзира Амировна, доктор биологических наук, Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промышленных предприятий (Екатеринбург, Россия)
Мойсеенок 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 (Йошкар-Ола, Россия)
Насыбуллина Галия Максутовна, 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 Иозеповна, 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 Имануилович, 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 Федеральный Алтайский научный центр 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)
Трифонова Татьяна Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)
Трунов Юрий Викторович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Мичуринский государственный аграрный университет (Мичуринск, Россия)
Ткачёв Александр Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры ветеринарной медицины, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия)
Тыщенко Елизавета Алексеевна, доктор технических наук, доцент, Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (Кемерово, Россия)
Упадышев Михаил Тарьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, ФГБНУ Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства (Москва, Россия)
Черных Наталья Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, Московский государственный институт международных отношений (университет) (Москва, Россия)
Чернявских Владимир Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса (Лобня, Россия)
Шнайдер Наталья Алексеевна, доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева (Санкт-Петербург, Россия)
Юшков Андрей Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина (Мичуринск, Россия)

Editorial Board Members

Oksana Yu. Alexandrova, Doctor of Medical Sciences, Professor, National Research Institute of Public Health named after N.A. Semashko (Moscow, Russia)
Vladimir N. Ananiev, Doctor of Medical Sciences, Professor, State Scientific Center of the Russian Federation - Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Andrey P. Anisimov, Doctor of Medical Sciences, Professor, State Research Center for Applied Microbiology and Biotechnology of Rospotrebnadzor (Obolensk, Russia)
Irina V. Arinicheva, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)
Alexander V. Arutyunyan, Doctor of Biological Sciences, Professor, Research Institute of Obstetrics, Gynecology and Reproductology named after D. O. Ott (St. Petersburg, Russia)
Tamara S. Astarkhanova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia)
Lyudmila F. Ashmarina, Doctor of Agricultural Sciences, Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)
Petr N. Balabko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Nikolai A. Balakirev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K. I. Skryabin (Moscow, Russia)
Anatoly T. Barabanov, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Aforestation of the Russian Academy of Sciences (Volgograd, Russia)
Svetlana Ye. Batyrbekova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Republic of Kazakhstan)
Aleksey I. Belenkov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Anatoly A. Belyaev, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)
Evgenia A. Berseneva, Doctor of Medical Sciences, Professor, All-Russian Research and Testing Institute of Medical Equipment (Moscow, Russia)
Vyacheslav U. Buko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (Grodno, Republic of Belarus)
Yury Yu. Byalovsky, Doctor of Medical Sciences, Professor, Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlova (Ryazan, Russia)
Dmitry V. Vinogradov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (Ryazan, Russia)
Tatyana I. Vitkina, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Far Eastern Scientific Center for Physiology and Pathology of Respiration (Blagoveshchensk, Russia)
Galina V. Volkova, Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center for Biological Plant Protection (Krasnodar, Russia)
Vladimir A. Volynkin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" (Yalta, Russia)
Valentina P. Voronina, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Volgograd State Agrarian University (Volgograd, Russia)
Endon Zh. Garmaev, Doctor of Geography, Associate Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)
Murat S. Gins, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center for Vegetable Growing (VNIISSOK, 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 Aforestation of the Russian Academy of Sciences (Volgograd, Russia)
Valery T. Manchuk, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)
Nurbiy S. Marzanov, Doctor of Biological Sciences, Professor, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry (Podolsk, Russia)
Alexander I. Melchenko, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (Krasnodar, Russia)
Larisa I. Menshikova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (Moscow, Russia)
Ilzira A. Minigalieva, Doctor of Biological Sciences, Yekaterinburg Medical Research Center for Prevention and Health Protection of Industrial Workers (Yekaterinburg, Russia)
Andrei G. Moiseenok, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the National

Academy of Sciences of Belarus, Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (Grodno, Republic of Belarus)
Sokrat G. Monakhos, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Lyudmila V. Muzurova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky (Saratov, Russia)
Dmitry I. Mukhortov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Volga State Technological University (Yoshkar-Ola, Russia)
Galia M. Nasybullina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Ural State Medical University (Yekaterinburg, Russia)
Ainash P. Nauanova, Doctor of Biological Sciences, Professor, S.Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Dmitry B. Nikityuk, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)
Konstantin S. Ostrenko, Doctor of Biological Sciences, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry (Podolsk, Russia)
Alla N. Pankrushina, Doctor of Biological Sciences, Professor, Tver State University (Tver, Russia)
Vladimir S. Pashtetsky, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture of the Crimea (Simferopol, Russia)
Valeriy S. Polunin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Pirogov Russian National Research Medical University (Moscow, Russia)
Natalya V. Polunina, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Pirogov Russian National Research Medical University (Moscow, Russia)
Nina A. Popolzukhina, 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. Voino-Yasenetsky (Krasnoyarsk, Russia)
Alexander S. Rulev, Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture (Volgograd, Russia)
Nadezhda V. Savvina, Doctor of Medical Sciences, Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University in Yakutsk (Yakutsk, Russia)
Natalya N. Savelyeva, Doctor of Biological Sciences, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)
Nikolai A. Setkov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
Viktor A. Smelik, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State Agrarian University (St. Petersburg, Russia)
Grigory Ya. Stetsov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Leading Researcher Federal Altai Scientific Center for Agrobiotechnologies (Barnaul, Russia)
Svetlana F. Sukhanova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev (Lesnikovo, Russia)
Viktor G. Sychev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov (Moscow, Russia)
Inna Yu. Tarmaeva, Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)
Sergey Yu. Tereshchenko, Doctor of Medical Sciences, Professor, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russia)
Elena Yu. Toropova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)
Tatyana A. Trifonova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Yury V. Trunov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Michurinsk State Agrarian University (Michurinsk, Russia)

Alexander V. Tkachev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Veterinary Medicine, Senior Researcher Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)
Elizaveta A. Tyshchenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russia)
Mikhail T. Upadyshev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal State Budget Scientific Institution Federal Scientific Selection and Technological Center for Horticulture and Nursery (Moscow, Russia)
Natalya A. Chernykh, Doctor of Biological Sciences, Professor, Moscow State Institute of International Relations (University) (Moscow, Russia)
Vladimir I. Chernyavskikh, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (Lobnya, Russia)
Natalya A. Schneider, Doctor of Medical Sciences, Professor, Bekhterev National Medical Research Center for Psychiatry and Neurology (St. Petersburg, Russia)
Andrey N. Yushkov, Doctor of Agricultural Sciences, I.V. Michurin Federal Research Center (Michurinsk, Russia)

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1429 **EDN: TROYTR**
UDC 639.371.5:639.3.043.13

CC BY NC ND

Original article

EFFECTS OF PHYTOBIOTIC FEED ADDITIVES ON PRODUCTIVITY AND GUT MICROBIOTA OF COMMON CARP

E.P. Miroshnikova, E.V. Yausheva, A.E. Arinzhanov, Y.V. Kilyakova

Abstract

Background. The use of phytobiotics in feeding may be a promising approach to control animal diseases without antibiotics.

The aim of our study was to evaluate the effect of phytobiotic feed additives on the growth performance and on gut microbiome of common carp.

Materials and methods. The paper presents the results of a study on the use of phytobiotic feed additives in carp feeding: "Intebio" – an additive based on a mixture of essential oils (garlic, lemon, thyme and eucalyptus) and "Butitan" - a balanced microencapsulated combination of ellagotannins (sweet chestnut wood extract).

Results. When the studied additives were included in the diet of fish, a growth-stimulating effect was established: with the inclusion of "Butitan" by 11.7% ($P \leq 0.05$), and with "Intebio" by 8.8% ($P \leq 0.05$), relative to the control. The introduction of phytobiotic feed additives "Butitan" and "Intebio" into the diet of carp had a significant effect on the gut microbiome of fish. A decrease in the number of bacteria of phylum *Actinomycetota*, *Bacillota* and *Bacteroidota* and an increase in the content of microorganisms of taxa *Pseudomonadota* and *Fusobacteriota* (genus C*etobacterium*) were found, which was reflected in the change in the number of microorganisms of *Microbacteriaceae*, *Chitinophagaceae*, and *unclassified_Bacillota* families. The analysis of the sequencing results showed that the impact of "Intebio" led to a change in the dominant genera of bacteria in the gut microbiota of fish.

Numerous groups were bacteria of the genus *Aeromonas*, the genus *Vibrio* and the genus *Cetobacterium*.

Conclusion. The results obtained showed that the inclusion of "Butitan" and "Intebio" in the diet of carp has a positive effect on the indicators of body weight gain and can potentially be used as a basis for drugs to modify the gut microbiota.

Keywords: microbiome; fish; feeding; phytobiotics

For citation. Miroshnikova, E. P., Yausheva, E. V., Arinzhanov, A. E., & Kilyakova, Y. V. (2025). Effects of phytobiotic feed additives on productivity and gut microbiota of common carp. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 11–29. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1429

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ФИТОБИОТИЧЕСКИХ КОРМОВЫХ ДОБАВОК НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И МИКРОБИОТУ КИШЕЧНИКА КАРПА

Е.П. Мирошникова, Е.В. Яушева, А.Е. Аринжанов, Ю.В. Килякова

Аннотация

Обоснование. Использование фитобиотиков может стать многообещающим подходом для контроля заболеваний животных без использования антибиотиков.

Цель работы – оценить влияние фитобиотических кормовых добавок на показатели роста и микробиом кишечника карпа.

Материалы и методы. В работе представлены результаты исследования по использованию в кормлении карпа фитобиотических кормовых добавок: «Интебио» – добавка на основе смеси эфирных масел (чеснока, лимона, чабреца и эвкалипта) и «Бутитан» – сбалансированная микрокапсулированная комбинация эллаготанинов (экстракта древесины сладкого каштана).

Результаты. При включении в рацион рыб исследуемых добавок установлен ростостимулирующий эффект: при введении «Бутитан» на 11,7 % ($P \leq 0,05$), а с Интебио на 8,8 % ($P \leq 0,05$), по сравнению с контролем. Использование фитобиотических кормовых добавок «Бутитан» и «Интебио» в рационе карпа оказало значительное влияние на микробиом кишечника рыб. Установлено снижение числа бактерий филумов *Actinomycetota*, *Bacillota* и *Bacteroidota* и повышение содержания микроорганизмов таксонов *Pseudomonadota* и

Fusobacteriota (род *Cetobacterium*), что отразилось в изменении количества микроорганизмов семейств *Microbacteriaceae*, *Chitinophagaceae*, и *unclassified_Bacillota*. Анализ результатов секвенирования показал, что введение «Интебио» приводило к смене доминирующих родов бактерий в микробиоте кишечника рыб. Многочисленными группами являлись бактерии рода *Aeromonas*, рода *Vibrio* и рода *Cetobacterium*.

Заключение. Полученные результаты показали, что включение «Бутитан» и «Интебио» в рацион карпа оказывает положительное влияния на показатели прироста живой массы и потенциально могут быть использованы в качестве основы для препаратов по модификации микробиоты кишечника.

Ключевые слова: микробиом; рыба; кормление; фитобиотики

Для цитирования. Мирошникова, Е. П., Яушева, Е. В., Аринжанов, А. Е., & Килякова, Ю. В. (2025). Влияние фитобиотических кормовых добавок на продуктивность и микробиоту кишечника карпа. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 11-29. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1429

Introduction

Production intensification in the aquaculture sector and reduction of resistance to pathogens among fish involves the search for new feed additives that can meet the growing needs for fish products and improve health indicators [23; 25]. Despite the fact that antibiotics remain the main means of combating fish pathogens, their use leads to ecosystem pollution and has a negative impact on metabolic processes in the fish body [6; 11]. Potential drugs that solve these issues are phytobiotic additives [1; 2; 3]. The introduction of various phytobiotic additives in fish feeding shows a positive effect on the growth and physiological parameters of the fish body. At the same time, the use of phytobiotic additives requires a thorough study of their effect on metabolic processes in the body, including on the gut microbiota of fish.

The microbiota associated with macroorganisms is a diverse population of microorganisms that play various important roles in the biology of multicellular hosts. Microorganisms of the digestive system play an extremely important role in the body [7; 10]. It has been established that the microbiota of the gastrointestinal tract affects not only the digestive process, but also the immune response, energy homeostasis, hormone secretion and other metabolic processes [13; 26]. In particular, for some fish species the influence of changes in the composition of the microbiota on many biosynthetic pathways, lipid, amino acid and carbohydrate metabolism has been shown [20; 24; 28]. In this regard, the control of changes in the composition of the gut microbiota is an integral part of the study of the use of new generation feed additives in fish feeding. It has been noted

that the introduction of food additives from a phytonutrients class in fish feeding can positively affect microorganisms with probiotic properties and reduce the number of potential pathogens in the gut microbiota [12].

The *aim* of our study was to evaluate the effect of phytobiotic feed additives on the growth performance and on gut microbiome of common carp.

Materials and methods

The research was conducted in the conditions of the aquarium stand of the «Biotechnology of animal raw materials and aquaculture» Department of the Orenburg State University. The research objects were carp yearlings reared under the conditions of LLC «Irikla-fish» (Russia, Orenburg).

Three groups (n=20) were formed to conduct research using the method of pair-analogues. After the preparatory period (7 days), the groups were transferred to the conditions of the accounting period (56 days). The fish of the control group received the main diet (MD) - compound feed «KRK-110» of JSC «Orenburg Feed Plant» (Russia, Orenburg). The experimental groups received additional phytobiotics in the diet: Group I – MD + "Butitan" at a dose of 0.5 g/kg of feed, Group II – MD + "Intebio" at a dose of 0.5 g/kg of feed.

"Intebio" is a feed additive based on a mixture of essential oils: garlic, lemon, thyme and eucalyptus (BIOTROF Ltd., Russia). "Butitan" is a balanced microencapsulated combination of ellagitannins (sweet chestnut wood extract) with calcium butyrate (SIVETRA-AGRO Ltd., Russia).

The daily feeding rate was determined weekly depending on fish weight, water temperature and dissolved oxygen values. Feeding was carried out 6 times a day. Live weight was monitored weekly by individual weighing in the morning before feeding during the reference period.

Animal care and experimental studies were carried out in accordance with the instructions and recommendations of Russian regulations (1987; Order of the Ministry of Health of the USSR No 755 of 12.08.1977 «On measures to further improve the organizational forms of work using experimental animals») and «Guide for the Care and Use of Laboratory Animals» (National Academy Press, Washington, D.C., 1996). During the research measures were taken to ensure a minimum of animal suffering and to reduce the number of experimental samples studied.

Extraction of total DNA bacteria and archaea

Samples were homogenised on a TissueLyser LT (Qiagen, Hilden, Germany) with a Lysing Matrix Y (MP Biomedicals, Solon, USA). DNA extraction from samples was performed using QIAamp Fast DNA Stool Mini Kit (Qiagen, Hilden, Germany) according to the manufacturer instruction. The quality

of the extracted DNA was assessed with electrophoresis in 1% agarose gel and a Nanodrop 8000 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). The DNA concentration was quantified using a Qubit 4 Fluorometer (Life Technologies, Carlsbad, CA, USA) with dsDNA High Sensitivity Assay Kit (Life Technologies, Carlsbad, CA, USA).

Preparation, sequencing and bioinformation processing of DNA

Preparation of the DNA libraries was performed according to the Illumina protocol (Part #15044223, Rev. B.) with primers targeting the V3–V4 regions of the SSU ribosomal RNA (rRNA) gene, S-D-Bact-0341-b-S-17 (5′-CCTACGGGNGGCWGCAG-3′) as the forward primer and S-D-Bact-0785-a-A-21 (5′-GACTACHVGGGTATCTAATCC-3′) as the reverse primer. The reaction mixture (25 μL) contained both primers, 0.2 μM each; 80 μM dNTPs; 0.2 U Q5 High-Fidelity DNA Polymerase (New England Biolabs, Ipswich, MA, USA). The Following PCR program was used: 95 °C for 3 min, 25 cycles; 95 °C for 30 s, 56 °C for 30 s; 72 °C for 30 s; final extension 72 °C for 5 min. The DNA libraries were cleaned up using Agencourt AMPure XP beads (Beckman Coulter, Brea, CA, USA) and were validated with capillary electrophoresis on a Qiaxcel Advanced System (Qiagen, Hilden, Germany) using the QIAxcel DNA Screening Kit (Qiagen, Hilden, Germany). Paired-end 2 × 251 bp sequencing was performed on the MiSeq platform (Illumina, San Diego, CA, USA) with the Reagent Kit v.2 (Illumina, San Diego, CA, USA).

DNA libraries preparing, sequencing and bioinformatics treatments were performed in the Center of Shared Scientific Equipment "Persistence of microorganisms" of Institute for Cellular and Intracellular Symbiosis UrB RAS (Orenburg, Russia). All stages of preparation, sequencing and bioinformatic processing of DNA libraries are performed according to the previously described methodology.

Ethics Statement

The Local Ethics Committee of the Orenburg State University, Orenburg, Russia, has approved the report about this research.

Statistical analysis

The resulting OTUs, after filtering and assigning taxonomic affiliations, were used to calculate alpha (chao1, Fisher's alpha, - statistical method: ANOVA) and beta (ordination method: NMDS; distance method: Bray-Curtis index; statistical method: PERMANOVA) diversity.

Results

The introduction of various phytobiotic additives in the fish diet had a positive effect on the growth performance of carp. Productive effect was observed in all experimental groups (Table 1). By the end of the experiment (56 days), it

was revealed that the weight of the fish of the experimental group I was 11.7% (P≤0.05) higher than the control, and the difference in live weight of the fish of the control and experimental group II was 8.8% (P≤0.05).

Table 1.

Dynamics of fish growth, g

Week of the accounting period	Groups		
	Control	Group I	Group II
1	17,3±1,4	18,2±1,5	18,1±1,4
2	20,6±1,7	21±1,6	20,7±1,8
3	23,8±2,0	25,8±2,1	25,2±2,2
4	26,3±2,4	29,5±2,6	29,3±2,8
5	30,6±3,1	34,7±3,2*	33,8±3,0*
6	34,6±3,7	40,1±3,9*	38,9±3,8*
7	40,6±4,2	45±4,3*	44,2±4,4*
8	47,7±4,7	53,3± 4,6*	51,9±4,8*

Note: * - P≤0.05 compared to the control group

Analysis of fish gut microbiota showed a high diversity of taxonomic groups. Sequencing resulted in 204377 reads, with 14413 to 28919 original reads per sample. After the merging and filtering steps, 150059 reads were included in the analysis. After clustering, a total of 150 OTUs were obtained. After removing singletons, doubletons, and likely sample contaminants, 75 OTUs remained.

The obtained OTUs were taxonomically grouped from the phylum level to the genus level (Table 2).

Table 2.

The number of taxa of different levels identified in the gut microbiome of fish from experimental groups

Taxa	Groups		
	Control	Group I	Group II
phylum	6	8	9
class	13	13	17
order	27	21	28
family	37	23	38
genus	42	26	42

Discharge curves were plotted based on the sequences and OTUs obtained. The discharge curves of all samples tended to plateau to a maximum, which indicated that the sequencing depth was sufficient to characterize the fish gut microbiota in this study (Figure1).

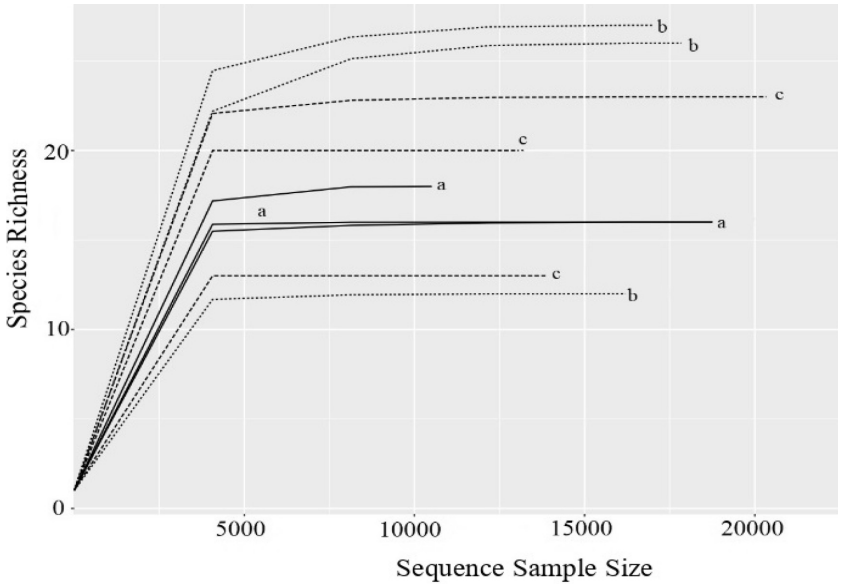


Figure 1. Sequence-based resolution curves for gut microbiota samples I (a), II (b), and control (c) groups

A study of the gut microbiota of the control group of fish showed that the main taxa at the phylum level were *Pseudomonadota* and *Actinomycetota*, which accounted for more than 70% of the total number of bacteria (Figure 2).

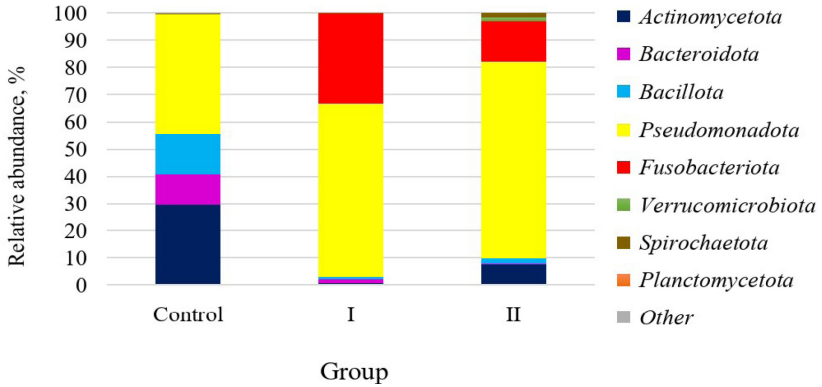


Figure 2. Relative abundance of phylum identified in samples of the gut microbiome of fish of the studied groups

Among small groups, bacteria of the phyla *Bacillota* (15%) and *Bacteroidota* (11%) were noted. At deeper taxonomic levels, the classes *Actinomycetes*, *Betaproteobacteria*, *unclassified_Bacillota*, *Chitinophagia*, *Alphaproteobacteria*, and *Gammaproteobacteria* were abundant (Figure 3). The main number of classified microorganisms belonged to the families *Microbacteriaceae* (genus *Aurantimicrobium*), *Chitinophagaceae* (genus *Hydrotalea*), *unclassified_Bacillota*, *Sphaerotilaceae* (genus *Schlegelella*), *Burkholderiaceae* (genus *Polynucleobacter*) and *Aeromonadaceae* (genus *Pseudaeromonas* and genus *Aeromonas*). The dominant group of bacteria at the genus level were bacteria belonging to the class *Betaproteobacteria*.

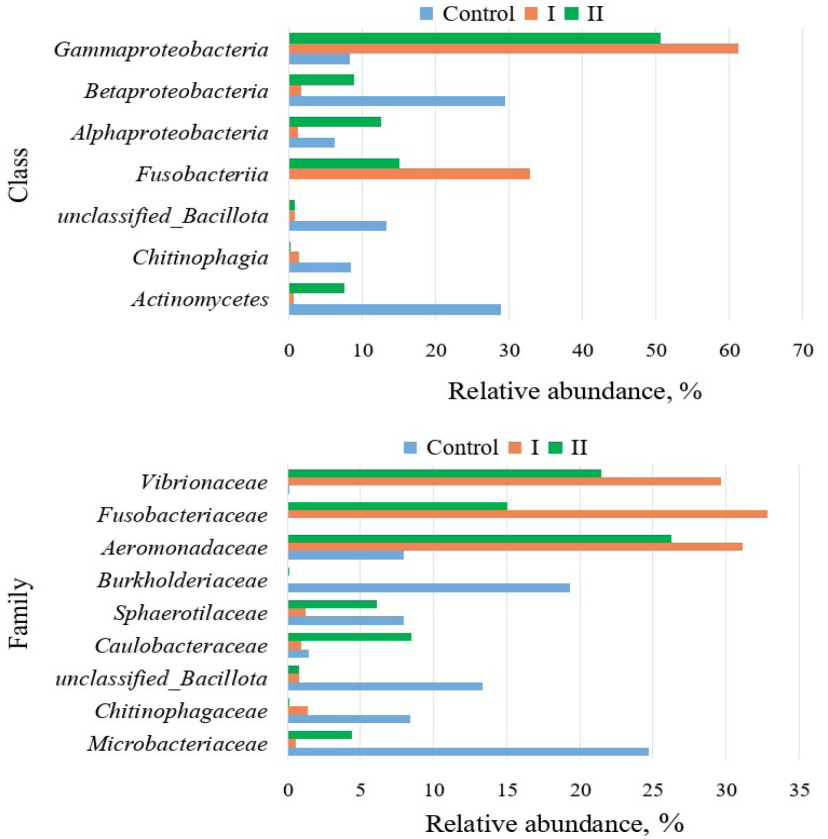


Figure 3. Comparison of the relative content of the main groups of bacteria in the gut microbiota of fish of the studied groups at the level of classes and families

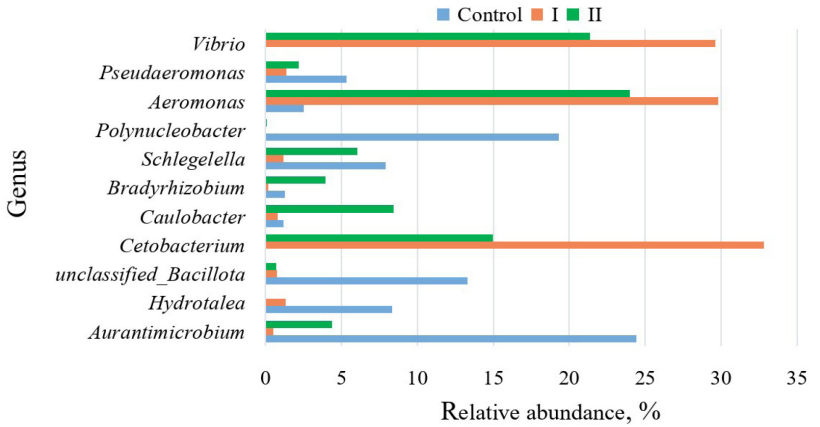


Figure 4. Relative content of the main groups of bacteria in the gut microbiota of fish of the studied groups at the genus level

The introduction of the phytobiotic feed additive "Butitan" in the diet had a significant impact on the gut microbiome of fish. There was a decrease in the number of bacteria of the phyla *Actinomycetota* (-29.1%), *Bacillota* (-14.2%) and *Bacteroidota* (-9.49%), which was expressed to a greater extent in a change in the number of microorganisms of the families *Microbacteriaceae*, *Chitinophagaceae*, and *unclassified_Bacillota*. At the same time, an increase in the number of microorganisms *Pseudomonadota* and *Fusobacteriota* (genus *Cetobacterium*) by 20.1% and 32.8%, respectively, was observed. Within the taxon *Pseudomonadota*, there was a decrease in the number of bacteria *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria* and an increase in representatives of the class *Gammaproteobacteria*, which accounted for more than 60% of the total number of detected bacteria of the phylum *Pseudomonadota*.

A significant increase in the number of bacteria of the families *Aeromonadaceae* and *Vibrionaceae* was observed in the gut microbiota of fish, which was manifested in the growth of microorganisms of the genera *Aeromonas* and *Vibrio*.

The introduction of the phytobiotic feed additive "Intebio" in the diet of fish showed a similar effect on the gut microbiome of common carp, as with the introduction of "Butitan". There was a decrease in the number of bacteria of the phyla *Actinomycetota* (-22.2%), *Bacillota* (-12.8%) and *Bacteroidota* (-10.7%), and an increase in the content of microorganisms of the taxa *Pseudomonadota* and *Fusobacteriota* (genus *Cetobacterium*). Such changes were directly associated with a decrease in the number of bacteria from the families

Microbacteriaceae, *Flavobacteriaceae*, *Chitinophagaceae*, and *unclassified_ Bacillota*. Changes in the number of bacteria of the phylum *Pseudomonadota* were associated with an increase in the number of representatives of the families *Caulobacteraceae*, *Bradyrhizobiaceae*, *Aeromonadaceae*, *Vibrionaceae*, and *Moraxellaceae*. Nevertheless, with the increase in the total number of bacteria of the taxon *Pseudomonadota*, there was a decrease in the level of bacteria of the families *Burkholderiaceae*, *Alcaligenaceae* and *Sphaerotilaceae* belonging to the class Betaproteobacteria. Analysis of the sequencing results showed that the impact of "Intebio" led to a change in the dominant genera of bacteria in the gut microbiota of fish. Numerous groups were bacteria genus *Aeromonas*, genus *Vibrio* and genus *Cetobacterium*. Microorganisms genus *Schlegelella*, genus *Polynucleobacter* and *unclassified_Alcaligenaceae* belonging to the class *Betaproteobacteria* amounted to no more than 9%.

The calculations of alpha diversity indices made it possible to assess the richness, diversity and homogeneity of fish gut microbiota (Table 3). The values of Chao1, ACE and Simpson indices indicated the taxonomic richness of the gut microbiota of fish in experiment and the absence of predominance of one large OTU in the samples. At the same time, the Chao1, ACE and Simpson indices had higher values in Group II compared to the control and Group I. Similarly, the Shannon and Fisher's alpha diversity scores showed differences between the experimental groups.

Table 3.

Indices of alpha diversity of the gut microbiota of groups I and II

Index	Groups			P-value
	I	II	Control	
chao1	16,7	21,7	18,6	0,59
ACE	16,8	21,9	18,9	0,55
Fisher's alpha	1,85	2,47	2,1	0,59
simpson	0,7	0,75	0,77	0,36
shannon	1,41	1,71	1,87	0,2

PERMANOVA analysis to assess beta diversity showed a significant effect of the introduction of phytobiotic additive in the diet of fish on the Bray-Curtis distance (Figure 5). Significant differences in the organization of gut bacterial communities were observed between samples from groups I and II compared to control (p-value = 0.1).

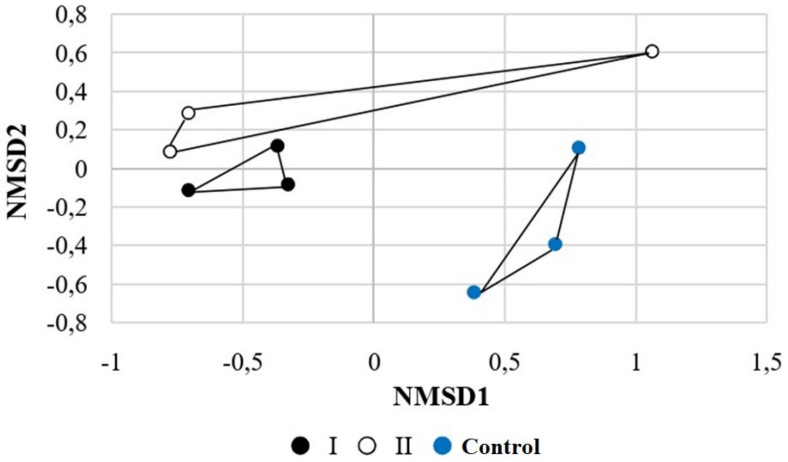


Figure 5. Beta diversity of gut microbiota in fish of studied groups using the PERMANOVA statistical method, non-metric multivariate scaling, and Bray-Curtis dissimilarity

Discussion

The positive effect of phytobiotics on the growth dynamics and physiological state of fish that we have established is consistent with our previous studies on animals and poultry [17; 18; 21]. There an increase in productive indicators has been established due to the activation of the beneficial microflora of the body, which leads to an increase in the body's resistance, to a more complete breakdown and assimilation of feed nutrients [4; 9; 16; 22].

As a result of the research, data were obtained that allow evaluating the features of the impact of phytobiotic additives on the gut microbiota of fish.

Analysis of the data on the composition of the gut microbiota of fish showed the presence of typical taxa for samples from the control group [19; 32]. The introduction of phytobiotic additives "Butitan" and "Intebio" into the diet led to similar changes in the composition of the gut microbiota of fish. There was a decrease in the number of bacteria of the same taxa, and an increase in the number of bacteria of the same groups in the gut microbiota, regardless of which additive was used in the fish feeding. At the same time, the "Butitan" additive led to a stronger change in the number of microornagisms of such taxa as: *Actinomycetota* (genus *Aurantimicrobium*), *Bacillota* (genus *unclassified_Bacillota*), *Pseudomonadota* (genus *Aeromonas*, genus *Vibrio*) and *Fusobacteriota* (genus *Cetobacterium*). Similarly, the action of the phytobiotic additive "In-

tebio" was more pronounced in relation to bacteria of the phyla *Bacteroidota* (*Hydrotalea* genus) and *Pseudomonadota* (genus *Schlegelella*, genus *Polynucleobacter*, genus *Caulobacter*).

Significant changes in the composition of the gut microbiota of carp with the introduction of phytobiotics were associated with an increase in the number of bacteria genus *Cetobacterium*, genus *Aeromonas* and genus *Vibrio*.

Certain strains of bacteria of the genus *Cetobacterium* are the basis of post-probiotic drugs. It has been noted that metabolites, cell wall components and culture supernatants obtained from *Cetobacterium* bacteria can exhibit prebiotic features [33]. Previously, positive effects on growth performance, antioxidant defense, liver condition, and resistance to bacterial and viral infections have been described when using *Cetobacterium somerae* culture supernatant in feeding of common carp (*Cyprinus carpio*), Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), and *Danio rerio* fish [30; 31; 35].

Considering the ability of individual representatives of genus *Aeromonas* and *Vibrio* cause the development of an infectious process, an increase in their number is of certain interest [5; 8; 27; 34]. However, the absence of fish mortality, external signs of the disease, and the presence of an increase in the live weight of fish suggests that an increase in the number of bacteria of the genus *Vibrio* and genus *Aeromonas* in the composition of the microbiota did not lead to the development of pathological processes of an infective nature. Also, some strains of bacteria of the genus *Vibrio* and the genus *Aeromonas*, in separate studies, are considered as potential probiotics that can reduce the number of pathogenic bacteria in the gut [14; 15; 29]. These data suggest potential beneficial effects of increasing the number of genus *Vibrio* and genus *Aeromonas* bacteria in the gut microbiota of fish.

As the result of the introduction of the phytobiotic additive "Butitan", the number of bacteria genus *Cetobacterium* in the gut of fish was twice as much as when using the additive "Intebio". Similarly, the number of bacteria of the genus *Aeromonas* and genus *Vibrio* was 5.8 and 8.3% higher in the gut of fish that received the "Butitan" additive. Such changes were probably one of the factors causing a greater increase in the mass of fish when using the "Butitan" additive.

Conclusion

Thus, the results obtained showed that the introduction of phytobiotic additives in fish diet has a positive effect on live weight gain and can potentially be used as the basis for the gut microbiota modifying drugs. The increase of the number of certain groups of bacteria that can potentially have probiotic features will reduce the risk of disease outbreaks at the carp cultivation stage.

Sponsorship information. The research was made with the financial support of the Russian Science Foundation No. 23-76-10054.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

1. Abd-Elaziz, R. A., Shukry, M., Abdel-Latif, H. M. R., & Saleh, R. M. (2023). Growth-promoting and immunostimulatory effects of phytobiotics as dietary supplements for Pangasianodon hypophthalmus fingerlings. *Fish & Shellfish Immunology*, *133*, 108531. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.108531 EDN: https://elibrary.ru/APREIA
2. Abdel-Latif, H. M. R., Abdel-Tawwab, M., Khafaga, A. F., & Dawood, M. A. O. (2020). Dietary or egano essential oil improved the growth performance via enhancing the intestinal morphometry and hepatorenal functions of common carp (Cyprinus carpio L.) fingerlings. *Aquaculture*, *526*, 735432. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735432 EDN: https://elibrary.ru/ISNWHR
3. Abdul Kari, Z., Wee, W., Mohamad Sukri, S. A., Che Harun, H., Hanif Reduan, M. F., Irwan Khoo, M., Van Doan, H., Wen Goh, K., & Seong Wei, L. (2022). Role of phytobiotics in relieving the impacts of Aeromonas hydrophila infection on aquatic animals: A mini-review. *Frontiers in Veterinary Science*, *9*, 1023784. https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1023784 EDN: https://elibrary.ru/QLHNFE
4. Al-Yasiry, A. R. M., Kiczorowska, B., Samolińska, W., Kowalczuk-Pecka, E., & Kowalczyk-Pecka, D. (2017). The effect of Boswellia serrata resin diet supplementation on production, hematological, biochemical and immunological parameters in broiler chickens. *Animal*, *11*(11), 1890–1898. https://doi.org/10.1017/S1751731117000817
5. Bai, L., Zhou, Y., Sheng, C., Yin, Y., Chen, Y., Ding, X., Yu, G., Yang, G., & Chen, L. (2023). Common carp Peptidoglycan Recognition Protein 2 (CcPGRP2) plays a role in innate immunity for defense against bacterial infections. *Fish & Shellfish Immunology*, *133*, 108564. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.108564 EDN: https://elibrary.ru/KSYCQO
6. Banu, M. R., Akter, S., Islam, M. R., Mondol, M. N., & Hossain, M. A. (2020). Probiotic yeast enhanced growth performance and disease resistance in freshwater catfish gulsa tengra, Mystus cavasius. *Aquaculture Reports*, *16*, 100237. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100237 EDN: https://elibrary.ru/EISCQC
7. Butt, R. L., & Volkoff, H. (2019). Gut Microbiota and Energy Homeostasis in Fish. *Frontiers in Endocrinology*, *10*, 9. https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00009 EDN: https://elibrary.ru/OHCMRW

8. Chang, X., Kang, M., Shen, Y., Yun, L., Yang, G., Zhu, L., Meng, X., Zhang, J., & Su, X. (2021). Bacillus coagulans SCC-19 maintains intestinal health in cadmium-exposed common carp (Cyprinus carpio L.) by strengthening the gut barriers, relieving oxidative stress and modulating the intestinal microflora. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *228*, 112977. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112977 EDN: https://elibrary.ru/ATOVXL
9. Chung, K-T., Lu, Z., & Chou, M. W. (1998). Mechanism of inhibition of tannic acid and related compounds on the growth of intestinal bacteria. *Food and Chemical Toxicology*, *36*(12), 1053–1060. https://doi.org/10.1016/s0278-6915(98)00086-6
10. de Bruijn, I., Liu, Y., Wiegertjes, G. F., & Raaijmakers, J. M. (2018). Exploring fish microbial communities to mitigate emerging diseases in aquaculture. *FEMS Microbiology Ecology*, *94*(1). https://doi.org/10.1093/femsec/fix161 EDN: https://elibrary.ru/YFYJHV
11. Erkinharju, T., Dalmo, R. A., Hansen, M., & Seternes, T. (2021). Cleaner Fish in Aquaculture: Review on Diseases and Vaccination. *Reviews in Aquaculture*, *13*, 189–237. https://doi.org/10.1111/raq.12470 EDN: https://elibrary.ru/GZNTKJ
12. Feher, M., Fauszt, P., Tolnai, E., Fidler, G., Pesti-Asboth, G., Stagel, A., Szucs, I., Biro, S., Remenyik, J., Paholcsek, M., & Stundl, L. (2021). Effects of phytonutrient-supplemented diets on the intestinal microbiota of Cyprinus carpio. *PLoS One*, *16*(4), e0248537. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248537 EDN: https://elibrary.ru/GGACUL
13. Guo, X., Ran, C., Zhang, Z., He, S., Jin, M., & Zhou, Z. (2017). The Growth-Promoting Effect of Dietary Nucleotides in Fish Is Associated with an Intestinal Microbiota-Mediated Reduction in Energy Expenditure. *The Journal of Nutrition*, *147*(5), 781–788. https://doi.org/10.3945/jn.116.245506
14. Hao, K., Wu, Z. Q., Li, D. L., Yu, X. B., Wang, G. X., & Ling, F. (2017). Effects of Dietary Administration of Shewanella xiamenensis A-1, Aeromonas veronii A-7, and Bacillus subtilis, Single or Combined, on the Grass Carp (Ctenopharyngodon idella) Intestinal Microbiota. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, *9*(4), 386–396. https://doi.org/10.1007/s12602-017-9269-7 EDN: https://elibrary.ru/YECJSV
15. Klindworth, A., Pruesse, E., Schweer, T., Peplies, J., Quast, C., Horn, M., & Glöckner, F. O. (2013). Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic Acids Research*, *41*(1), e1. https://doi.org/10.1093/nar/gks808
16. Kondera, E., Bojarski, B., Ługowska, K., Kot, B., & Witeska, M. (2020). Effects of oxytetracycline and gentamicin therapeutic doses on hematological, biochemical and hematopoietic parameters in Cyprinus carpio juveniles. *Ani-*

mals (Basel), *10*(12), 2278. https://doi.org/10.3390/ani10122278 EDN: https://elibrary.ru/QLWWQI

17. Laptev, G. Y., Filippova, V. A., Kochish, I. I., Yildirim, E. A., Ilina, L. A., Dubrovin, A. V., Brazhnik, E. A., Novikova, N. I., Novikova, O. B., Dmitrieva, M. E., Smolensky, V. I., Surai, P. F., Griffin, D. K., & Romanov, M. N. (2019). Examination of the Expression of Immunity Genes and Bacterial Profiles in the Caecum of Growing Chickens Infected with Salmonella Enteritidis and Fed a Phytobiotic. *Animals (Basel)*, *9*(9), 615. https://doi.org/10.3390/ani9090615 EDN: https://elibrary.ru/GUYBYV
18. Levkut, M. Jr., Revajová, V., Levkutová, M., Selecká, E., Ševčíková, Z., Karaffová, V., & Levkut, M. Sr. (2019). The Influence of Chestnut Wood and Flubendazole on Morphology of Small Intestine and Lymphocytes of Peripheral Blood, Spleen and Jejunum in Broiler Chickens. *Helminthologia*, *56*(4), 273–281. https://doi.org/10.2478/helm-2019-0029
19. Liu, W., Yang, Y., Zhang, J., Gatlin, D. M., Ringø, E., & Zhou, Z. (2014). Effects of dietary microencapsulated sodium butyrate on growth, intestinal mucosal morphology, immune response and adhesive bacteria in juvenile common carp (Cyprinus carpio) pre-fed with or without oxidised oil. *British Journal of Nutrition*, *112*(1), 15–29. https://doi.org/10.1017/S0007114514000610
20. Ma, J., Piao, X., Mahfuz, S., Long, S., & Wang, J. (2021). The interaction among gut microbes, the intestinal barrier and short chain fatty acids. *Animal Nutrition*, *9*, 159–174. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.09.012 EDN: https://elibrary.ru/CBMMIB
21. Mavri, M., Čandek-Potokar, M., Fazarinc, G., Škrlep, M., Rutland, C. S., Potočnik, B., Batorek-Lukač, N., & Kubale, V. (2022). Salivary Gland Adaptation to Dietary Inclusion of Hydrolysable Tannins in Boars. *Animals (Basel)*, *12*(17), 2171. https://doi.org/10.3390/ani12172171 EDN: https://elibrary.ru/OZCBKZ
22. Mila, I., Scalbert, A., & Expert, D. (1996). Iron withholding by plant polyphenols and resistance to pathogens and rots. *Phytochemistry*, *42*(6), 1551–1555. https://doi.org/10.1016/0031-9422(96)00174-4 EDN: https://elibrary.ru/ALAOHR
23. Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, *591*(7851), 551–563. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6 EDN: https://elibrary.ru/MXWFWO
24. Ringø, E., Harikrishnan, R., Soltani, M., & Ghosh, K. (2022). The Effect of Gut Microbiota and Probiotics on Metabolism in Fish and Shrimp. *Animals (Basel)*, *12*(21), 3016. https://doi.org/10.3390/ani12213016 EDN: https://elibrary.ru/RIZTGV

25. Rohani, M. F., Islam, S. M., Hossain, M. K., Ferdous, Z., Siddik, M. A., Nuruzzaman, M., Padeniya, U., Brown, C., & Shahjahan, M. (2022). Probiotics, prebiotics and synbiotics improved the functionality of aquafeed: Upgrading growth, reproduction, immunity and disease resistance in fish. *Fish & Shellfish Immunology*, *120*, 569–589. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.12.037 EDN: https://elibrary.ru/ZMDHBT
26. Ruzauskas, M., Armalytė, J., Lastauskienė, E., Šiugždinienė, R., Klimienė, I., Mockeliūnas, R., & Bartkienė, E. (2021). Microbial and Antimicrobial Resistance Profiles of Microbiota in Common Carps (Cyprinus carpio) from Aquacultured and Wild Fish Populations. *Animals (Basel)*, *11*(4), 929. https://doi.org/10.3390/ani11040929 EDN: https://elibrary.ru/DBVUKD
27. Sha, H., Li, L., Lu, J., & Xiong, J. (2022). High nutrient induces virulence in the AHPND-causing Vibrio parahaemolyticus, interpretation from the ecological assembly of shrimp gut microbiota. *Fish & Shellfish Immunology*, *127*, 758–765. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.07.016 EDN: https://elibrary.ru/XWWKDA
28. Sheng, Y., Ren, H., Limbu, S. M., Sun, Y., Qiao, F., Zhai, W., Du, Z-Y., & Zhang, M. (2018). The presence or absence of intestinal microbiota affects lipid deposition and related genes expression in zebrafish (Danio rerio). *Frontiers in Microbiology*, *9*, 1124. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01124
29. Sumon, M.A.A., Sumon, T.A., Hussain, M.A., Lee, S.J., Jang, W.J., Sharifuzzaman, S.M., Brown, C.L., Lee, E.W., & Hasan, M.T. (2022). Single and multi-strain probiotics supplementation in commercially prominent finfish aquaculture: Review of the current knowledge. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *32*(6), 681-698. https://doi.org/10.4014/jmb.2202.02032 EDN: https://elibrary.ru/VMRZMD
30. Xie, M., Hao, Q., Xia, R., Olsen, R.E., Ringø, E., Yang, Y., Zhang, Z., Ran, C., & Zhou, Z. (2022). Nuclease-treated stabilized fermentation product of *Cetobacterium somerae* improves growth, non-specific immunity, and liver health of zebrafish (*Danio rerio*). *Frontiers in Nutrition*, *9*, 918327. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.918327 EDN: https://elibrary.ru/RZGDAW
31. Xie, M., Xie, Y., Li, Y., Zhou, W., Zhang, Z., Yang, Y., Olsen, R.E., Ringø, E., Ran, C., & Zhou, Z. (2022). Stabilized fermentation product of *Cetobacterium somerae* improves gut and liver health and antiviral immunity of zebrafish. *Fish & Shellfish Immunology*, *120*, 56-66. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.11.017 EDN: HCLRTI
32. Yang, S., Du, J., Luo, J., Zhou, Y., Long, Y., Xu, G., Zhao, L., Du, Z., & Yan, T. (2019). Effects of different diets on the intestinal microbiota and immunity of common carp (*Cyprinus carpio*). *Journal of Applied Microbiology*, *127*(5), 1327-1338. https://doi.org/10.1111/jam.14405

33. Yu, Z., Hao, Q., Liu, S.B., Zhang, Q.S., Chen, X.Y., Li, S.H., Ran, C., Yang, Y.L., Teame, T., Zhang, Z., & Zhou, Z.G. (2023). The positive effects of postbiotic (SWF concentration®) supplemented diet on skin mucus, liver, gut health, the structure and function of gut microbiota of common carp (*Cyprinus carpio*) fed with high-fat diet. *Fish & Shellfish Immunology*, *135*, 108681. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.108681 EDN: https://elibrary.ru/YNHNRW
34. Zhang, Y., Zhang, P., & Li, Y. (2022). Gut microbiota-mediated ferroptosis contributes to mercury exposure-induced brain injury in common carp. *Metallomics*, *14*(1), mfab072. https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab072 EDN: https://elibrary.ru/XAHKCP
35. Zhou, W., Xie, M., Xie, Y., Liang, H., Li, M., Ran, C., & Zhou, Z. (2022). Effect of dietary supplementation of *Cetobacterium somerae* XMX-1 fermentation product on gut and liver health and resistance against bacterial infection of the genetically improved farmed tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*). *Fish & Shellfish Immunology*, *124*, 332-342. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.04.019 EDN: https://elibrary.ru/JXUYTN

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena P. Miroshnikova, Dr. Sci. (Biology), Professor**,** Faculty of Applied Biotechnology and Engineering, Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture
Orenburg State University
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
elenaakva@rambler.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3804-5151
Researcher ID: ABE-9257-2020
Scopus Author ID: 57041006900

Elena V. Yausheva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Animal Husbandry
Federal State Budget Scientific Institution All-Russian Research Institute of Beef Cattle
29, 9 January Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
fncbst@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1589-2211
Researcher ID: R-2281-2016
Scopus Author ID: 56541548600

Azamat E. Arinzhanov, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Faculty of Applied Biotechnology and Engineering, Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture
Orenburg State University
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
arin.azamat@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6534-7118
Researcher ID: N-5572-2016
Scopus Author ID: 57041384400

Yulia V. Kilyakova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Faculty of Applied Biotechnology and Engineering, Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture
Orenburg State University
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
fish-ka06@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2385-264X
Researcher ID: ABF-1189-2020
Scopus Author ID: 57041221000

DATA ABOUT THE AUTHORS

Мирошникова Елена Петровна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологии животного сырья и аквакультуры
Оренбургский государственный университет
пр. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
elenaakva@rambler.ru

Яушева Елена Владимировна, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»
ул. 9 Января д. 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
fncbst@mail.ru

Аринжанов Азамат Ерсаинович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры

Оренбургский государственный университет
пр. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
arin.azamat@mail.ru

Килякова Юлия Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры
Оренбургский государственный университет
пр. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
fish-ka06@mail.ru

Поступила 05.09.2024
После рецензирования 30.10.2024
Принята 07.11.2024

Received 05.09.2024
Revised 30.10.2024
Accepted 07.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1157 **EDN: UEOKFS**
УДК 636.085:577.17

CC BY NC ND

Научная статья

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ УРОВНЯ СОМАТОТРОПИНА В ВОЛОСЕ С МЯСНЫМИ КАЧЕСТВАМИ БЫЧКОВ ГЕРЕФОРДСКОЙ ПОРОДЫ

О.А. Завьялов, А.Н. Фролов, И.И. Слепцов

Аннотация

Обоснование. Вопрос о применении волос в качестве индикатора долгосрочных изменений метаболизма соматотропина в организме бычков раскрыт недостаточно. Более того практически полностью отсутствует информация о взаимосвязи уровня соматотропина в волосе с мясными качествами бычков, что и обусловило актуальность настоящего исследования.

Цель. Изучить влияние обменного пула соматотропина, оцененного по его концентрации в волосе на мясные качества бычков герефордской породы.

Материалы и методы. Исследования выполнены на бычках герефордской породы. Животные в зависимости от уровня соматотропина в волосах были разделены на три группы: I – (53,4-57,1 пг/мг); II – (57,3 до 61,8 пг/мг); III – (62,1 до 67,1 пг/мг).

Результаты. Бычки с максимальным уровнем соматотропина имели наивысшие показатели по интенсивности весового роста. Животные этой группы имели более высокую убойную массу и содержание протеина в мясе, на фоне меньшего содержания жира. Увеличение концентрации соматотропина в волосе сопровождалось повышением концентраций лейцин+изолейцина, триптофана, гистидина, метионина, снижением фенилаланина и серина, а также увеличением концентраций полинасыщенных жирных кислот длиннейшей мышце спины. В длиннейшей мышце, бычков с максимальным уровнем соматотропина в волосе, содержалось больше кальция, меди, цинка и йода, при относительно низких концентрациях свинца.

Заключение. Уровень концентрации соматотропина в волосах с холки, тесно связан интенсивностью весового роста, мясной продуктивностью и качеством мяса бычков герефордской породы, что позволяет рассматривать

волос в качестве биосубстрата для оценки долгосрочных изменений уровня соматотропина в организме, при разработке мероприятий, направленных на повышение мясной продуктивности бычков.

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

Для цитирования. Завьялов, О. А., Фролов, А. Н., & Слепцов, И. И. (2025). Оценка взаимосвязи уровня соматотропина в волосе с мясными качествами бычков герефордской породы. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 30-59. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1157

Original article

ASSESSMENT OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE LEVEL OF SOMATROPIN IN HAIR AND MEAT QUALITIES OF HEREFORD BULLS

O.A. Zavyalov, A.N. Frolov, I.I. Sleptsov

Abstract

Background. The issue of using hair as an indicator of long-term changes in somatotropin metabolism in the body of young bulls has not been sufficiently addressed. Moreover, there is almost no information on the relationship between the somatotropin level in hair and the meat qualities of young bulls, which determined the relevance of this study.

Objective is to study the effect of the somatotropin exchange pool, estimated by its concentration in hair on the meat qualities of the Hereford bulls.

Materials and methods. The studies were performed on the Hereford bulls. Animals were divided into three groups depending on the somatotropin level in hair: I - (53.4-57.1 pg / mg); II - (57.3 to 61.8 pg / mg); III - (62.1 to 67.1 pg / mg).

Results. Bulls with the maximum somatotropin level had the highest rates of weight gain. Animals of this group had higher slaughter weight and meat protein content, with a lower fat content. An increase in the somatotropin concentration in hair was accompanied by an increase in the concentrations of leucine + isoleucine, tryptophan, histidine, methionine, a decrease in phenylalanine and serine, as well as an increase in the concentrations of polyunsaturated fatty acids in the longissimus dorsi muscle. The longissimus muscle of bulls with the maximum somatotropin level in hair contained more calcium, copper, zinc and iodine, with relatively low lead concentrations.

Conclusion. The level of somatotropin concentration in hair from the withers is closely related to the intensity of weight growth, meat productivity and meat quality of Hereford bulls, which allows us to consider hair as a biosubstrate for assessing long-term changes in the level of somatotropin in the body, when developing measures aimed at increasing the meat productivity of bulls.

Keywords: beef cattle breeding; bulls; fattening; meat productivity; hair; hormones; somatotropin

For citation. Zavyalov, O. A., Frolov, A. N., & Sleptsov, I. I. (2025). Assessment of the relationship between the level of somatotropin in hair and meat qualities of Hereford bulls. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 30-59. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1157

Введение

Многочисленными исследованиями установлено, что в организме сельскохозяйственных животных и птицы, гормоны оказывают значительное воздействие на обмен веществ, как непосредственно, так и через ускорение синтетических процессов в секреторных клетках, повышение проницаемости клеточных мембран и активацию ферментных систем [21; 31]. Нарушение гормонального гомеостаза и как следствие возникновение дефицита или напротив избытка соответствующих гормонов способно значительно снизить показатели молочной и мясной продуктивности крупного рогатого скота [44]. В связи с этим перед современной наукой и практикой стоит вопрос о совершенствовании методов оценки интенсивности гормонального метаболизма в организме продуктивных животных. Одним из важных шагов в направлении решения данного вопроса, является выбор информативного биосубстрата для проведения подобного рода измерений. В настоящее время наиболее изученными и широко используемыми биосубстратом для этих целей, является кровь [10]. Вместе с тем, оценка гормонального статуса по концентрации гормонов в крови сопряжена с рядом недостатков. Например, уровни гормонов в крови значительно варьируют под воздействием краткосрочных факторов, таких как время суток, стресс, прием пищи, и т.д. Кроме того, процедура забора крови, сопряжена с вмешательством во внутреннюю среду организма, и сама по себе является дополнительным стресс-фактором для животного, который способен исказить данные по концентрациям отдельных гормонов, в частности кортизола, адреналина и др. Одним из биосубстратов, который практически лишен перечисленных недостатков является волос [12]. Если сравнивать с исследованиями крови, то анализ волос имеет ряд

преимуществ: отбор образцов волос для анализа крайне прост и не сопряжен с травмированием животного; образцы не требуют специального оборудования для хранения и транспортировки; могут храниться практически неограниченное время, не теряя своей информационной ценности [3; 42]. Однако, главным преимуществом волос, при оценке гормонального статуса млекопитающих, является то, что измерение уровня гормонов в волосах может рассматриваться в качестве показателя, отражающего фактическую концентрацию гормонов в организме за длительный промежуток времени, предшествующий отбору, что позволяет диагностировать хронические нарушения метаболизма, исключая сиюминутные колебания [38].

Одним из наиболее изученных и важных гормонов для крупного рогатого скота, является гормон роста – соматотропин. Соматотропин секретируется передней долей гипофиза и считается одним из наиболее важных гормонов для формирования мясных качеств крупного рогатого скота [15]. Соматотропин координирует постнатальный рост множества тканей, включая скелетные мышцы [22]. Стимулирующее действие соматотропина на рост опосредовано циркулирующим или локально продуцируемым инсулиноподобным фактором роста-1 [29], который является важнейшим миогенным агентом, способствующим росту мышц [2; 4]. При этом нарушения метаболизма самотропина рассматривается в качестве фактора задержки весового роста у новорожденных телят [11]. Литературный анализ показал, что объём доступной информации по оценке долгосрочного влияния уровня гормона – соматотропина на мясную продуктивность и качество мяса бычков ограничен, что и послужило стимулом для проведения настоящего исследования.

Цель исследования

Основной целью настоящего исследования являлось изучение влияния обменного пула соматотропина, оцененного по его концентрации в волосе на мясные качества бычков герефордской породы.

Материалы и методы исследований

Исследования выполнены на бычках герефордской породы в возрасте 18 мес. (n=60). Животные в зависимости от уровня соматотропина в волосах с холки процентильным методом были разделены на три группы: I группа – до 25 процентиля (n=15); II группа – в границах 25-75 процентилей (n=25); III группа – выше 75 процентиля (n=15). Основанием выбора данных интервалов послужили ранее проведенные исследования [34]. Условия кормления и содержания для всех обследованных животных были идентичными [1].

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.

Отбор и пробоподготовка волос

Образцы волос отбирались с верхней части холки, машинкой для стрижки животных и корректировались по длине [33]. Для исследований отбиралась проксимальная часть волоса длиной 3 см. Волосы были сострижены как можно ближе к коже и хранились при комнатной температуре в темноте в сухих бумажных конвертах до обработки. Очистка волос включала: замачивание в течение трех часов в дистиллированной воде (t=40-60ºC); промывкой раствором этилового спирта (40%) и бидистиллированной водой с обработкой ультразвуком (частотой 35 кГц, мощность – 300 (450) Вт, амплитуда колебаний – 10 mm) по два часа в каждой среде. Образцы волос измельчались на вибрационной мельнице IMC vMILL05 с размольной гарнитурой из нержавеющей стали. При этом медианное значение размера получившегося порошка (d50) было равно 20 мкм.

Определение гормонов в волосах и сыворотке крови

Определение уровня гормонов в образцах волос производилось методом иммуноферментного анализа, при помощи автоматического микропланшетного анализатора Infinite F200 PRO (Tecan, Австрия). Экстракция гормонов из волос проводилась по методике, ранее описанной для человека и обезьян [32], с применением ротационного испарителя «Constructional Vapor» (Китай) и реагентов: изопропанола и метанола (класса ВЭЖХ).

Элементный анализ

Анализ содержания эссенциальных и токсичных металлов в образцах длиннейшей мышцы спины осуществлялся по концентрации 26 химических элементов (Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Co, Cu, Cr, Fe, Zn, Se, B, Ni, Ga, Ag, In, Ba, Tl, Bi, Al, Sr, Cd, Hg, Pb, As) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и технологией Dynamic Reaction Cell (ICP-DRC-MS) на приборе NexION 300D (PerkinElmer Inc., Shelton, CT, USA), оснащенном автоматическим дозатором ESI SC-2 DX4 (Elemental Scientific Inc., Omaha, NE 68122, USA).

Оценка убойных показателей и отбор средних проб мяса

Убой бычков проводили в 18-месячном возрасте, по методике ГОСТ Р 34120-2017 «Крупный рогатый скот на убой. Говядина и телятина в тушах, полутушах и четвертинках» (Государственный стандарт на крупный рогатый скот на убой. Говядина и телятина в тушах, полутушах и четвертинках.

Стандартинформ, 2018). Среднюю пробу мяса-фарша в количестве 400 г отбирали из левой полутуши. Из этой же полутуши перед обвалкой отбирали путём поперечного среза мышцы пробу (200 г) длиннейшей мышцы спины на уровне 9-11-го ребра.

Оценка жирнокислотного состава

Химический и жирнокислотный составы мяса-фарша и длиннейшей мышцы спины определяли методом газожидкостной хроматографии на хроматографе «Кристалл-4000 Люкс» (Россия). Определение содержания сухого вещества проводили путем высушивания образцов в сушильном шкафу при 100°С. Органическое вещество определяли озолением высушенного образца при 550°С (АОАС, 2000).

Оценка аминокислотного состава

Аминокислотный состав длиннейшей мышцы спины определялся по содержанию аргинина, лизина, тирозина, фенилаланина, гистидина, лейцина, изолейцина, метионина, валина, пролина, треонина, серина, аланина, глицина, оксипролина и триптофана методом капиллярного электрофореза с использованием системы Капель (ООО «Люмэкс-Маркетинг», Россия; ГОСТ 55569-2013).

Статистический анализ

Достоверность различий оценивали при помощи Т-критерия Стьюдента. Уровень значимости (р) принимался меньшим или равным 0,05. В таблицах приведены средние значения показателей и ошибки средних арифметических. Для обработки данных использовали пакет прикладных программ Statistica 10.0.

Результаты и обсуждение

Фактические различия между группами бычков по концентрации эстрадиола в сыворотке крови представлены на рисунке 1.

Сравнительный анализ показал, что в волосе бычков I группы содержалось 57,7 пг/мг соматотропина, что на 6,92 (P£0,05) и 12,98 % (P£0,01) меньше по сравнению со II и III группами. При этом диапазон концентраций соматотропина в волосе бычков I группы находился в пределах от 53,4 до 57,1 пг/мг, II от 57,3 до 61,8 пг/мг, III группы от 62,1 до 67,1 пг/мг.

В результате исследований установлено, что разбивка опытных групп по уровню соматотропина в волосе с холки, повлияла на величину среднесуточных приростов живой массы за предшествующий период откорма с 15 до 18 месяцев (рис. 2).

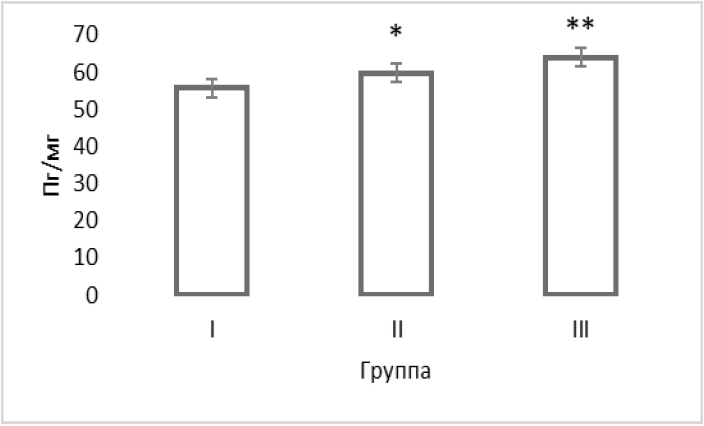


Рис. 1. Концентрация соматотропина в волосе с холки бычков герефордской породы по группам, пг/мг
Примечание: * - P≤0,05; ** - P≤0,01 по сравнению с I группой

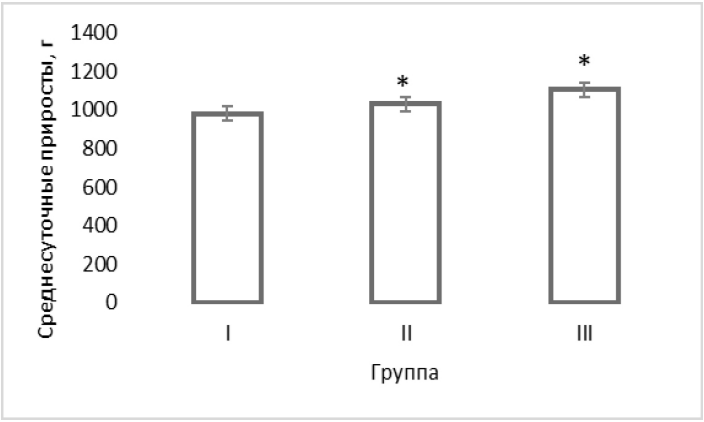


Рис. 2. Среднесуточные приросты бычков герефордской породы в период 15-18 месяцев в зависимости от концентрации соматотропина организме, оцененного по его содержанию в волосе с холки, г
Примечание: * - P≤0,05 по сравнению с I группой

Как видно из полученных данных, бычки с минимальным уровнем соматотропина в волосах с холки уступали сверстникам с максимальными и средними значениями концентраций по величине среднесуточных приростов на 4,75 % (P£0,05) и 11,29 % (P£0,05), соответственно.

Различия по интенсивности роста за изучаемый период закономерно определили различия по живой массе между бычками сравниваемых групп (рис. 3).

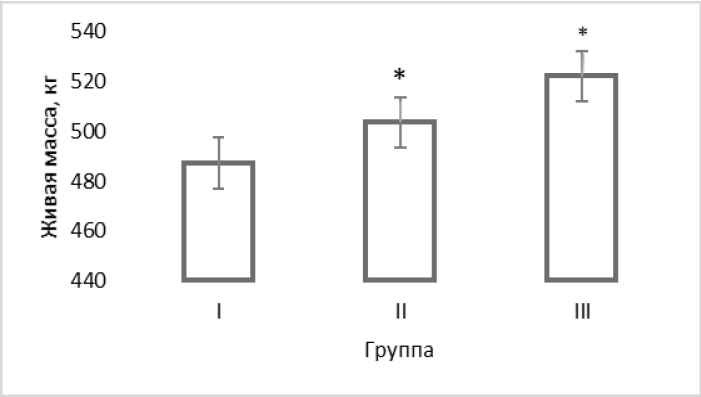


Рис. 3. Живая масса бычков герефордской породы в возрасте 18 мес. в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосах с холки
Примечание: * - P≤0,05 по сравнению с I группой

Так, было установлено, что бычки II и III групп по живой массе в возрасте 18 месяцев превосходили аналогов из I группы на 3,4 (P£0,05) и 7,2 % (P£0,05).

Результаты оценки мясной продуктивности показали, что концентрация соматотропина в волосе оказывало существенное влияние на выход продуктов убоя от подопытных бычков (табл. 1).

Таблица 1.

Результаты контрольного убоя бычков герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосах с холки

Показатель	Группа		
	I	II	III
Предубойная живая масса, кг	474,96±5,37	491,88±6,24[a]	512,28±5,86[bc]
Масса туши, кг	270,92±3,11	282,63±3,54[a]	296,97±3,46[bc]
Выход туши, %	57,04±0,342	57,46±0,418	57,97±0,411
Масса внутреннего жира-сырца, кг	14,38±0,268	14,12±0,232	13,25±0,241[bc]
Выход внутреннего жира-сырца, %	3,03±0,164	2,87±0,158	2,59±0,142[b]
Убойная масса, кг	285,30±2,86	296,75±2,94[a]	310,22±3,34[bc]
Убойный выход, %	60,07±0,32	60,33±0,34	60,56±0,38

Примечание: [a] -P£0,05 – II группа по сравнению с I; [b] - P£0,05 – III группа по сравнению с I; [c] - P£0,05 – III группа по сравнению со II.

Из полученных данных видно, что животные II и III групп превосходили сверстников из I группы по предубойной живой массе на 3,56 (P£0,05) и 7,86 (P£0,05) % (P£0,05), массе туши – на 4,32 % (P£0,05) и 9,62 % (P£0,05), убойной массе – на 4,01 (P£0,05) и 8,73 %(P£0,05). Примечателен тот факт, что бычки с максимальным уровнем соматотропина в волосах накапливали меньше жира в тушах, как в фактическом (масса внутреннего жира-сырца), так и относительном (выход внутреннего жира-сырца) выражении по сравнению с особями с минимальными значениями этих показателей на 7,86 (P£0,05) и 0,44 % (P£0,05), соответственно. При этом не смотря на наличие тенденции к снижению массы и выхода внутреннего жира-сырца между животными I и II групп, достоверной разницы по величине изучаемых показателей не наблюдалось.

С целью получения представления пищевой ценности продуктов убоя, нами был изучен морфологический состав туш, который в большей степени характеризует их мясные качества бычков (табл. 2).

Таблица 2.

Морфологический состав туш бычков герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосе с холки

Показатель	Группа		
	I	II	III
Масса охлажденной туши, кг	266,8±3,09	278,7±3,52[a]	293,1±3,41[bc]
Масса мякоти, кг	212,0±2,16	222,7±2,74[a]	235,0±2,83[bc]
Выход мякоти, %	79,46±0,224	79,91±0,312	80,18±0,338
Мышечная ткань, кг	188,19±1,67	198,53±1,84[a]	210,5±2,08[bc]
Мышечная ткань, % от массы мякоти	88,74±0,308	89,13±0,316	89,57±0,424
Масса костей, кг	45,43±0,324	46,36±0,342[a]	48,31±0,421[bc]
Выход костей, %	17,02±0,162	16,63±0,212	16,48±0,252
Масса сухожилий и связок, кг	9,39±0,112	9,64±0,202	9,79±0,187
Выход сухожилий и связок, %	3,52±0,232	3,46±0,234	3,34±0,234
Индекс мясности	4,67±0,124	4,81±0,176	4,87±0,162
Показатель пищевой ценности	3,87±0,084	3,98±0,168	4,05±0,134

Примечание: [a] -P£0,05 – II группа по сравнению с I; [b] - P£0,05 – III группа по сравнению с I; [c] - P£0,05 – III группа по сравнению со II.

Результаты оценки морфологического состава туш показали, что бычки II и III групп превосходили сверстников из I группы по массе охлажденной туши на 4,6 (P£0,05) и 9,86 % (P£0,05), массе мякоти – на 5,05 (P£0,05) и 10,8 % (P£0,05), содержанию мышечная ткани – на 5,49 (P£0,05) и 11,9

% (P£0,05), массе костей – на 2,05 (P£0,05) и 6,33 % (P£0,05). При этом следует отметить, что увеличение фактической массы мякоти, мышечной ткани и костей в тушах происходило соразмерно с увеличением массы охлажденной туши, что обусловило отсутствие достоверной разницы по относительному выходу этих составляющих туши.

Анализ данных, полученных в ходе проведенного эксперимента, свидетельствует о том, что состав средней пробы мяса-фарша отобранных от туш бычков в разрезе групп также имел существенные различия (табл. 3).

Таблица 3.

Химический состав средней пробы мяса бычков герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосе с холки

Показатель	Группа		
	I	II	III
Сухое вещество, %	30,9±0,628	30,73±0,546	30,46±0,612
Протеин, %	18,64±0,124	18,87±0,112	19,02±0,101[b]
Жир, %	11,26±0,152	10,87±0,134	10,43±0,146[bc]
Зола, %	1,0±0,072	0,993±0,068	1,01±0,074
Синтезировано в мякоти, кг:			
протеина	39,53±1,246	42,03±1,324	44,71±1,362[b]
жира	23,88±0,642	24,21±0,524	24,52±0,576
Энергетическая ценность 1 кг мякоти, МДж	7,58±0,162	7,47±0,148	7,33±0,154
Энергетическая ценность мякоти туши, МДж	1608,4±14,32	1664,3±16,88[a]	1722,0±15,44[bc]

Примечание: [a] -P£0,05 – II группа по сравнению с I; [b] - P£0,05 – III группа по сравнению с I; [c] - P£0,05 – III группа по сравнению со II

Так, было установлено, что бычки с минимальными уровнем соматотропина в волосах с холки превосходили животных с максимальными значениями этого показателя по относительному содержанию жира в средней пробе мяса-фарша на 0,83 % (P£0,05), при этом уступали им по накоплению протеина в туше и мякоти на 0,38 (P£0,05) и 11,59 % (P£0,05), соответственно. Сравнительный анализ данных по оценке энергетической ценности мяса выявил, что энергетическая ценность 1 кг мякоти в средней пробе мяса-фарша, полученного от бычков опытных групп, не имела существенных различий в разрезе изучаемых групп. Вместе с тем, не смотря на данное обстоятельство, в нашем эксперименте отмечалось достоверное увеличение энергетической ценности мякоти всей туши, по мере

повышения концентрации соматотропина в волосах II и III групп относительно I группы на 3,48 (P£0,05) и 7,06 % (P£0,05), соответственно, что явилось следствием более высокого отложения протеина в мякоти туш бычков этих групп.

С целью получения, более полного представления об особенностях формирования химического состава туш, особое внимание уделяют исследованию отдельных мышц. Практика показывает, что в подавляющем большинстве случаев, для этого проводят анализ длиннейшей мышцы спины, который наиболее объективно отражает качественные характеристики мышечной ткани всей туши. Химический состав длиннейшей мышцы спины бычков герефордской породы в зависимости от уровня соматотропина в волосах с холки представлен в таблице 4.

Таблица 4.

Химический состав длиннейшей мышцы спины бычков герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосах с холки

Показатель	Группа		
	I	II	III
Сухое вещество, %	23,89±0,202	23,91±0,214	23,84±0,231
Протеин, %	21,06±0,128	21,16±0,102	21,48±0,136[b]
Жир, %	1,84±0,086	1,76±0,092	1,36±0,104[bc]
Зола, %	0,99±0,054	0,99±0,062	1,00±0,051
Энергетическая ценность 1 кг мякоти, МДж	4,33±0,124	4,32±0,116	4,22±0,087
pH	5,72±0,104	5,70±0,108	5,58±0,098
Влагоёмкость, %	55,82±0,642	55,76±0,523	55,89±0,471

Примечание: [a] -P£0,05 – II группа по сравнению с I; [b] - P£0,05 – III группа по сравнению с I; [c] - P£0,05 – III группа по сравнению со II.

Анализ полученных данных показал, что уровень соматотропина оказывал значительное влияния на химический состав длиннейшей мышцы спины. В частности, было установлено, что показатель относительного накопления жира, у бычков III группы был ниже по отношению к животным I группы на 0,48 (P£0,05). При этом в длиннейшей мышце бычков этой группы, напротив, отмечалось повышенное на 0,42 %(P£0,05), соответственно, содержание протеина.

Пищевая ценность мяса во многом определяется такими показателями как, аминокислотный и жирнокислотный состав. В нашем эксперименте

установлено, что аминокислотный состав длиннейшей мышцы спины изменялся в зависимости от концентрации соматотропина в волосе с холки (табл. 5).

Таблица 5.

Аминокислотный состав длиннейшей мышцы спины бычков герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосе с холки

Аминокислоты	Группа		
	I	II	III
Аргинин	7,15±0,199	7,35±0,205	7,18±0,183
Лизин	9,22±0,1637	9,31±0,2112	9,553±0,0877
Тирозин	3,24±0,0402	3,28±0,0587	3,37±0,0582
Фенилаланин	4,11±0,0329	4,07±0,0424	4,01±0,0531[b]
Гистидин	3,17±0,0285	3,24±0,0312[a]	3,19±0,0479
Лейцин+Изолейцин	9,18±0,0897	9,33±0,0819	9,52±0,0691[b]
Метионин	2,03±0,0512	2,17±0,0467[a]	2,25±0,0539[b]
Валин	4,05±0,0526	4,09±0,0483	4,18±0,0605[b]
Пролин	5,26±0,0579	5,33±0,0549	5,16±0,0713
Треонин	5,18±0,0899	5,33±0,0313	5,29±0,0493
Серин	4,33±0,0505	4,24±0,0419	4,19±0,0533[b]
Аланин	6,59±0,1385	6,45±0,1378	6,64±0,0471
Глицин	4,12±0,0817	4,28±0,0715	4,22±0,0512
Триптофан, мг/%	369,2±6,88	389,2±7,62	392,4±7,33[b]
Оксипролин, мг/%	55,1±0,524	55,12±0,64	54,3±0,539
Белково-качественный показатель, ед	6,70±0,215	7,06±0,112	7,23±0,136[b]

Примечание: [a] -P£0,05 – II группа по сравнению с I; [b] - P£0,05 – III группа по сравнению с I

Как видно из полученных данных уровень соматотропина имел неоднозначное влияние на изменение аминокислотного состава длиннейшей мышцы спины у подопытных бычков. Останавливаясь на отдельных аспектах следует отметить, что по мере увеличения уровня соматотропина от минимального (I группа) к максимальному (III группа) происходило увеличение уровня комплекса аминокислот лейцин+изолейцин на 3,70 % (P≤0,05) и триптофана – на 6,28 %. При этом средняя концентрация соматотропина в волосах (II группа) сопровождалась достоверным увеличением концентрации гистидина – на 2,21 % (P≤0,05). Единственным

устойчивым трендом в данном случае, являлось поэтапное увеличение концентраций аминокислоты – метионина, средние значения которой повышались в образцах мышц бычков II и III групп относительно I группы на 6,90 (P≤0,05) и 10,8 % (P≤0,05). Концентрации фенилаланина и серина при этом достоверно снижались на величину 2,43 (P≤0,05) и 3,23 % (P≤0,05), соответственно. С целью получения представления о биологической ценности длиннейшей мышце спины, полученного от бычков, нами был рассчитан белково-качественный показатель, который определяется по соотношению незаменимой аминокислоты – триптофана к оксипролину в длиннейшей мышце спины. В результате установлено, что величина белково-качественного показателя у животных III группы была выше по отношению к животным I группы на 7,91 % (P≤0,05).

Оценка жирнокислотного состава длиннейшей мышцы спины показала, что вариабельность данного показателя значительно определялась под действием уровня соматотропина в организме оцененного по его содержанию волосе с холки (табл. 6).

Таблица 6.

Жирнокислотный состав длиннейшей мышцы спины бычков герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосе с холки

Кислоты	Группа		
	I	II	III
Насыщенные жирные кислоты (НЖК)			
Пальмитиновая ($C_{16:0}$)	28,52±0,202	29,37±0,231[a]	29,59±0,191[b]
Стеариновая ($C_{18:0}$)	23,38±0,303	22,85±0,288	22,97±0,283
Миристиновая ($C_{14:0}$)	3,25±0,0933	3,44±0,0715	2,97±0,0822[b]
Мононенасыщенные жирные кислоты (МНЖК)			
Миристолеиновая ($C_{14:1}$)	4,21±0,203	3,79±0,189	4,03±0,174
Пальмитолеиновая ($C_{16:1}$)	4,15±0,0715	4,27±0,0681	3,89±0,0598[b]
Олеиновая ($C_{18:1}$)	45,74±0,415	46,98±0,432	45,85±0,398
Полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК)			
Линолевая ($C_{18:2}$)	4,51±0,0644	4,41±0,0659	4,34±0,0531
Линоленовая ($C_{18:3}$)	0,678±0,0478	0,615±0,0536	0,565±0,0512
Арахидоновая ($C_{20:4}$)	1,55±0,0454	1,61±0,0472	1,52±0,0339

Примечание: [a] -P£0,05 – II группа по сравнению с I; [b] - P£0,05 – III группа по сравнению с I

В частности, было установлено, что максимальный уровень концентрации соматотропина в волосах ассоциировался с меньшем содержанием в структуре липидов ткани длиннейшей мышцы миристиновой и пальмитиновой кислот. Следует отметить, что как во II, так и в III группах, рост уровня концентрации соматотропина в волосе сопровождался увеличением синтеза ненасыщенной пальмитиновой кислоты на величину 3,22 % (P≤0,05) и 3,49 % (P≤0,05), соответственно по отношению к I группе.

Результаты суммарного содержания жирных кислот в длиннейшей мышце спины бычков герефордской породы в зависимости от уровня соматотропина в волосе с холки представлены на рисунке 4.

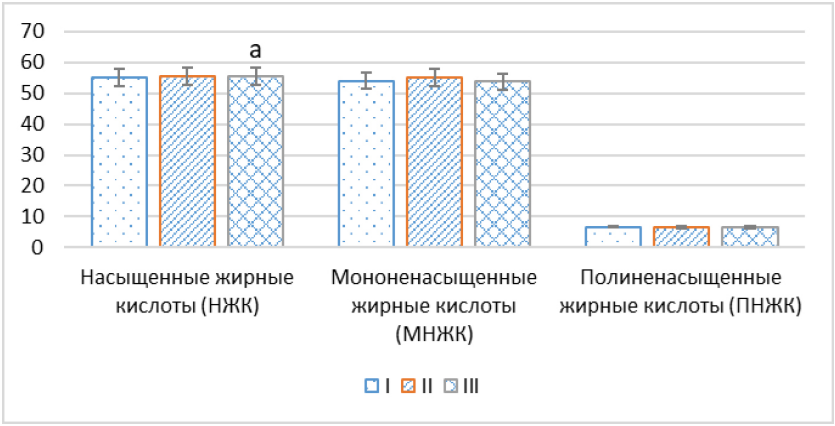


Рис. 4. Суммарное содержание жирных кислот в длиннейшей мышце спины герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосе с холки
Примечание: [a] -P£0,05 – III группа по сравнению с I

Установлено, что разница по содержанию отдельных жирных кислот, наблюдаемая, по мере увеличения уровня соматотропина в разрезе изучаемых групп сопровождалось повышением суммарного содержания только ненасыщенных кислот в мясе на величину 0,8 % (P≤0,05) у животных с максимальным уровнем соматотропина по отношению особям с минимальными значениями этого показателя.

Элементный состав длиннейшей мышцы спины бычков также значительно изменялся под действием концентрации соматотропина в волосе (табл. 6).

Таблица 6.

Элементный состав длиннейшей мышцы спины бычков герефордской породы в зависимости от уровня концентрации соматотропина в волосе с холки, мг/г

Элементы	Group		
	I	II	III
Макроэлементы			
Na	3275,1±13,5	3282,5±15,89	3315,2±15,82
Mg	1198,1±18,3	1214,3±17,12	1194,1±21,16
P	9496,6±152,9	9456,7±139,7	9306,2±147,1
K	17401,2±396,3	17331,2±365,5	17121,9±376,5
Ca	327,6±3,32	356,7±3,83	396,84±4,23
Эссенциальные элементы			
Mn	0,952±0,0274	0,899±0,0303	0,998±0,0317
Co	0,0232±0,0022	0,0249±0,0029	0,0258±0,0029
Cu	3,28±0,0275	3,23±0,0292	3,34±0,0293[b]
I	0,352±0,0184	0,392±0,0219[a]	0,399±0,0207[b]
Cr	2,31±0,233	2,38±0,183	2,39±0,196
Fe	221,6±7,64	202,7±8,37	248,5±8,83
Zn	248,1±2,52	267,6±2,86	265,2±2,15[b]
Se	0,754±0,0358	0,841±0,0407[a]	0,891±0,0408[b]
Условно-эссенциальные элементы			
B	1,82±0,0483	1,73±0,0445	1,72±0,0415
Ni	0,719±0,0816	0,905±0,0884	0,909±0,112
Ga	0,0134±0,0024	0,0151±0,0015	0,0143±0,0019
Ag	0,0095±0,0036	0,0073±0,0029	0,0068±0,0033
In	0,0021±0,0001	0,0022±0,0001	0,0022±0,0002
Ba	0,124±0,0105	0,121±0,0096	0,117±0,0091
Tl	0,0248±0,0013	0,0231±0,0014	0,0272±0,0009
Bi	0,0069±0,0002	0,0064±0,0003[a]	0,0068±0,0003
Токсичные элементы			
Al	36,22±2,73	29,94±2,26	27,57±2,58
Sr	0,512±0,0719	0,501±0,0654	0,464±0,0189
Cd	0,0039±0,0002	0,0035±0,0002	0,0035±0,0002
Pb	0,0991±0,0074	0,0898±0,0076	0,0833±0,0072[b]
As	0,0311±0,0028	0,0313±0,0035	0,0305±0,0031

Примечание: [a] -P£0,05 – II группа по сравнению с I; [b] - P£0,05 – III группа по сравнению с I

В частности, было установлено, что в образцах длиннейшей мышцы, полученных от животных II группы, содержалось больше Bi. В тоже время в длиннейшей мышце спины животных III группы содержалось больше Ca, Cu и Zn, что фиксировалось на фоне относительно низких концентраций Pb. Общей закономерностью для образцов мышц II и III опытных групп, являлась тенденция к достоверному повышению концентраций I – на 11,4 (P≤0,05) и 13,4 % (P≤0,05); Se – на 11,5 (P≤0,05) и 18,2 % (P≤0,05), соответственно по отношению к бычкам I группы.

Обсуждение

Использование анализа волос становится все более распространенным инструментом, позволяющим в долгосрочной перспективе оценить воздействие экзогенных, так и эндогенных факторов на организм животного и человека [26]. Наибольший задел по использованию волос в качестве биосубстрата для оценки хронических отклонений в метаболизме сельскохозяйственных животных создан в биоэлементологии. В рамках развития данного направления, ученым за короткий промежуток времени, удалось проделать работу по созданию неинвазивных технологий оценки и коррекции элементного статуса молочных, мясных коров, а также спортивных лошадей [30,35]. Практика оценки гормонального статуса крупного рогатого скота по содержанию гормонов в волосе, пока не получила широкого распространения в животноводстве. Литературный анализ показал, что практически весь материал, опубликованный в научных статьях, как отечественных, так и зарубежных авторов, ограничивается отдельными исследованиями по оценке концентрации единственного гормона – кортизола, во взаимосвязи с уровнем стресса и физиологическими параметрами организма молочных коров [7; 16; 17; 27]. Результаты этой оценки показали связь уровня кортизола, оценённого по его концентрации в волосах со среднесуточным удоем, сроком стельности [9], уровнем соматических клеток в молоке [41], количеством отелов [13], уровнем кровности [36] и технологией содержания [24]. При этом, в доступной литературе практически полностью отсутствуют данные по оценке влияния долгосрочных изменений гормонального статуса, оцененного по содержанию гормонов в волосе, на показатели мясной продуктивности и качество мяса бычков, что, учитывая важность эндокринной системы в процессе реализации продуктивных качеств мясного скота, представляет определенный интерес для дальнейшего изучения. Забегая в перед, важно отметить, что настоящее исследование, является первым этапом на пути к разработке комплексной технологии «ретроспективной» оценки и кор-

рекции гормонального статуса с целью повышения продуктивных качеств мясного скота. Дальнейшая работа в данном направлении предполагает разработку стандартизированной методики отбора и пробоподготовки образцов волос для оценки гормонального статуса; определение референтных интервалов концентраций гормонов в волосе высокопродуктивных бычков, которые могли бы быть использованы в качестве физиологической нормы при индивидуальной оценке гормонального статуса животных; разработку практических рекомендаций по коррекции гормонального статуса мясного скота в периоды доращивания и откорма.

Одним из наиболее изученных и важных гормонов для крупного рогатого скота, является гормон роста – соматотропин [19]. Воздействие соматотропина на продуктивные качества животных является предметом научного интереса уже более 80 лет. Еще в далеком 1937 гуду Asimov G.J., Krouze N.K впервые продемонстрировали, что инъекции сырых экстрактов гипофиза убитых животных увеличивают продуктивные качества мясного скота [5]. В настоящее время, модуляция гормонального статуса все чаще рассматривается в качестве эффективного инструмента для повышения мясной продуктивности бычков в период откорма [18; 25; 37]. Так, было установлено, что дополнительное введение соматотропина способствовало увеличению выхода туши и содержания мякоти в тушах животных после откорма [6]. В других исследованиях было показано, что дополнительное введение гормона роста способствует росту мышечной массы исключительно у молодых животных с выявленным дефицитом соматотропина и не влияет на продуктивные качества животных с нормальным гормональным статусом и старых особей [23]. Однако, не смотря на в целом положительное влияние дополнительного включения соматотропина на продуктивные качества крупного рогатого скота, в отдельных исследованиях отмечается риск возникновения негативных эффектов на фоне избыточного поступления соматотропина в организм животных. В частности, было отмечено, что бесконтрольное введение соматотропина может вызывать отёки мягких тканей, аллергию, а также нарушения метаболизма глюкозы у крупного рогатого скота [39].

Проводя параллели с результатами нашего эксперимента, следует отметить, что животные с максимальным уровнем соматотропина в волосе имели наивысшие показатели скорости весового роста за предшествующий отбору образцов период откорма. Объяснение данного факта, возможно с учетом ранее проведенных исследований, в которых продемонстрировано повышение потребления, переваримости и конверсии питательных веществ

рационов в ответ на включение дополнительных источников соматотропина, что вероятно связано с увеличением концентрации короткоцепочечных жирных кислот в рубце [6]. Закономерно, что увеличение интенсивности весового роста, а следовательно, и живой массы к завершению откорма, оказало заметное влияние на показатели мясной продуктивности подопытных бычков, что выражалось в достоверном увеличении предубойной и убойной массы у бычков с максимальным уровнем соматотропина. Вместе с тем, значительные различия, обнаруженные в нашем исследовании при оценке, химического состава средней пробы мяса-фарша и длиннейшей мышцы спины, заслуживают отдельного внимания. Так, убыло установлено, что у бычков с максимальной концентрацией соматотропина в волосе с холки отмечались повышенные уровни протеина в длиннейшей мышце спины, что фиксировалось на фоне снижения концентрации жира. Это объясняется тем, что соматотропин влияет на выработку гормонов инсулиноподобного фактора роста и инсулина, главным образом из печени, которые обеспечивают анаболический эффект – повышают синтез белка в мышцах, соединительной ткани и снижают его распад. Помимо этого, соматотропин вызывает липолиз и увеличивает доступность жирных кислот для липидного обмена и, следовательно, оказывает действие, противоположное инсулину [40]. Это означает, что он играет важную роль в периферическом метаболизме и ограничивает синтез жира в организме [8,20]. Останавливаясь на отдельных показателях качественных характеристик мяса, полученных в нашем эксперименте следует отметить, что повышение уровня соматотропина в волосе сопровождалось повышением суммарного содержания ненасыщенных кислот в длиннейшей мышце спины. Литературный анализ показал, что не смотря на отсутствие доступной информации, объясняющей фундаментальные причины выявленной закономерности, в отдельных ранее проведенных работах приводятся аналогичные нашим данные, демонстрирующие повышение общего уровня мононенасыщенных жирных кислот в образцах мышц отобранных при убое бычков голштинской породы получавших инфекции соматотропина [28]. Другим характерным эффектом от повышения уровня соматотропина в организме крупного рогатого скота, является изменение метаболизма аминокислот. В нашем исследовании было установлено повышение уровня ряда незаменимых аминокислот, таких метионин, валин, триптофан в длиннейшей мышце спины на фоне роста концентрации соматотропина в волосе. Схожая динамика была описана другими авторами в экспериментах по изучению влияния инъекций синтетического соматотропина на мясные качества животных [14]. По мнению авторов соматотропин

у растущих животных повышает метаболическую эффективность использования аминокислот, за счет минимизации потери белка в процессе усвоения корма и увеличения процесса протеолиза. Такое сохранение аминокислот приводит к улучшению баланса белка и, вероятно, способствует снижению концентрации циркулирующих аминокислот, в крови [43].

Заключение

Можно констатировать, что уровень концентрации соматотропина в волосах с холки, тесно связан интенсивностью весового роста, мясной продуктивностью и качеством мяса бычков герефордской породы. Данный факт, позволяет рассматривать волос в качестве информативного биосубстрата для определения долгосрочных изменений уровня соматотропина в организме, при разработке и проведении мероприятий, направленных на повышение мясной продуктивности бычков. В тоже время, дальнейшим этапом развития данного направления, должно стать решение задачи по определению референтных интервалов концентрации соматотропина в волосе высокопродуктивных бычков для объективной оценки полученных лабораторных результатов и при необходимости принятию решений по коррекции гормонального статуса.

Заключение комитета по этике. Протокол настоящего расследования был одобрен Местным комитетом по этике Оренбургского государственного университета, Оренбург, Россия (Протокол № 859 от 31 мая 2024 г.). Все исследования на животных проводились в соответствии с этическими нормами, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 года и более поздних поправках к ней.

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

1. Калашников, А. П., Фисинин, В. И., Щеглов, В. В., & Первов, Н. Г. (2003). *Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных*. Москва: Знание. 456 с. ISBN: 5-94587-093-5 EDN: https://elibrary.ru/PXQMHL

2. Кононенко, С. И., Харламов, А. В., Завьялов, О. А., & Харламов, В. А. (2009). Продуктивность бычков, полученных в разные сезоны года. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, 19, 197-203. EDN: https://elibrary.ru/KVLOCL
3. Харламов, А. В., Завьялов, О. А., Фролов, А. Н., Курилкина, М. Я., & Королёв, В. Л. (2017). Эффективность производства говядины при различных технологиях доращивания и откорма. *Вестник мясного скотоводства*, (2), 93-99. EDN: https://elibrary.ru/YTOCPP
4. Anh, N. T. L., Kunhareang, S., & Duangjinda, M. (2015). Association of Chicken Growth Hormones and Insulin-like Growth Factor Gene Polymorphisms with Growth Performance and Carcass Traits in Thai Broilers. *Asian-Australas J Anim Sci*, *28*, 1686-1695. https://doi.org/10.5713/ajas.15.0028
5. Asimov, G. J., & Krouze, N. K. (1937). The lactogenic preparations from the anterior pituitary and the increase of milk yield in cows. *J Dairy Sci*, *20*, 289-306.
6. Aytac, A. K., Bilal, A. K., & Davut, B. (2015). Determination of the alui polymorphism effect of bovine growth hormone gene on carcass traits in Zavot cattle with analysis of covariance. *Turk J Vet Anim Sci*, *39*, 16-22.
7. 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. *Front Vet Sci*, *6*, 323. https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00323
8. Berryman, D. E., & List, E. O. (2017). Growth Hormone's effect on adipose tissue: quality versus quantity. *Int J Mol Sci*, *8*, 1621.
9. Braun, U., Michel, N., Baumgartner, M. R., Hässig, M., & Binz, T. M. (2017). Cortisol concentration of regrown hair and hair from a previously unshorn area in dairy cows. *Res Vet Sci*, 114, 412-415. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.07.005
10. Bristow, D. J., & Holmes, D. S. (2007). Cortisol levels and anxiety-related behaviors in cattle. *Phys Behav*, 90, 626-638. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.11.015
11. Brown-Borg, H. M. (2009). Hormonal control of aging in rodents: the somatotropic axis. *Mol Cell Endocrinol*, 299, 64-71. https://doi.org/10.1016/j.mce.2008.07.001
12. Burnard, C., Ralph, C., Hynd, P., Hocking Edwards, J., & Tilbrook, A. (2017). Hair cortisol and its potential value as a physiological measure of stress response in human and non-human animals. *Anim Prod Sci*, *57*, 401-414. https://doi.org/10.1071/AN15622

13. Burnett, T. A., Madureira, A. M., Silper, B. F., Tahmasbi, A., Nadalin, A., Veira, D. M., & Cerri, R. L. (2015). Relationship of concentrations of cortisol in hair with health, biomarkers in blood, and reproductive status in dairy cows. *J Dairy Sci*, *98*(7), 4414-4426. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8871
14. Bush, J. A., Wu, G., Suryawan, A., Nguyen, H. V., & Davis, T. A. (2002). Somatotropin-induced amino acid conservation in pigs involves differential regulation of liver and gut urea cycle enzyme activity. *The Journal of Nutrition*, *132*(1), 59-67. https://doi.org/10.1093/jn/132.1.59
15. Cantalapiedra-Hijar, G., Abo-Ismail, M., Carstens, G. E., Guan, L. L., Hegarty, R., Kenny, D. A., McGee, M., Plastow, G., Relling, A., & Ortigues-Marty, I. (2018). Review: Biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle. *Animal*, *12*(s2), 321-335. https://doi.org/10.1017/S1751731118001489
16. Carrell, R. C., Smith, W. B., Kinman, L. A., Mercadante, V. R. G., Dias, N. W., & Roper, D. A. (2021). Cattle stress and pregnancy responses when imposing different restraint methods for conducting fixed time artificial insemination. *Anim Reprod Sci*, *225*, 106672. https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106672 EDN: https://elibrary.ru/FSFANM
17. Comin, A., Prandi, A., Peric, T., Corazzin, M., Dovier, S., & Bovolenta, S. (2011). Hair cortisol levels in dairy cows from winter housing to summer highland grazing. *Livest Sci*, *138*, 69-73. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.12.009
18. Dehkhoda, F., Lee, C. M. M., Medina, J., & Brooks, A. J. (2018). The growth hormone receptor: mechanism of receptor activation, cell signaling, and physiological aspects. *Front Endocrinol (Lausanne)*, *9*, 35. https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00035
19. Devesa, J., Almengló, C., & Devesa, P. (2016). Multiple Effects of Growth Hormone in the Body: Is it Really the Hormone for Growth? *Clin Med Insights Endocrinol Diabetes*, *9*, 47-71. https://doi.org/10.4137/CMED.S38201
20. Dumbell, R. (2022). An appetite for growth: The role of the hypothalamic-pituitary-growth hormone axis in energy balance. *J Neuroendocrinol*, *34*(6), e13133. https://doi.org/10.1111/jne.13133 EDN: https://elibrary.ru/UVOOVW
21. Flores, J., García, J. E., Mellado, J., Gaytán, L., de Santiago, Á., & Mellado, M. (2019). Effect of growth hormone on milk yield and reproductive performance of subfertile Holstein cows during extended lactations. *Spanish J. Agric. Res*, *17*(11), e0403. https://doi.org/10.5424/sjar/2019171-13842 EDN: https://elibrary.ru/REWXBZ
22. Florini, J. R., Ewton, D. Z., & Coolican, S. A. (1996). Growth hormone and the insulin-like growth factor system in myogenesis. *Endocr Rev*, *17*, 481-517. https://doi.org/10.1210/edrv-17-5-481

23. Furigo, I. C., Teixeira, P. D. S., & de Souza, G. O. (2019). Growth hormone regulates neuroendocrine responses to weight loss via AgRP neurons. *Nat Commun*, *1*, 662. https://doi.org/10.1038/s41467-019-08607-1 EDN: https://elibrary.ru/HMFRHT
24. Ghassemi Nejad, J., Lee, B. H., Kim, J. Y., Chemere, B., Sung, K. I., & Lee, H. G. (2021). Effect of alpine grazing on plasma and hair cortisol, serotonin, and DHEA in dairy cows and its welfare impact. *Domest Anim Endocrinol*, *75*, 106581. https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2020.106581 EDN: https://elibrary.ru/NFZMZK
25. Gómez, C. A., Fernández, M., Franco, N., & Cueva, R. (2022). Effect of two formulations of recombinant bovine somatotropin on milk production and body condition of cattle under intensive management in Peru. *Trop Anim Health Prod*, *54*(2), 96. https://doi.org/10.1007/s11250-021-03036-z EDN: https://elibrary.ru/MZNKYE
26. Gow, R., et al. (2010). An assessment of cortisol analysis in hair and its clinical applications. *Forensic science international*, *196*(1-3), 32-37. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.12.040
27. Heimbürge, S., Kanitz, E., Tuchscherer, A., & Otten, W. (2020). Within a hair's breadth — Factors influencing hair cortisol levels in pigs and cattle. *Gen Comp Endocrinol*, *1*(288), 113359. https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2019.113359
28. Holzer, Z., Aharoni, Y., Brosh, A., Orlov, A., Veenhuizen, J., & Kasser, T. R. (1999). The effects of long-term administration of recombinant bovine somatotropin (Posilac) and Synovex on performance, plasma hormone and amino acid concentration, and muscle and subcutaneous fat fatty acid composition in Holstein-Friesian bull calves. *Journal of Animal Science*, *77*(6), 1422-1430. https://doi.org/10.2527/1999.7761422x
29. Jia, J., Ahmed, I., Liu, L., Liu, Y., Xu, Z., Duan, X., Li, Q., Dou, T., Gu, D., Rong, H., Wang, K., Li, Z., Talpur, M. Z., Huang, Y., & Wang, S., et al. (2018). Selection for growth rate and body size have altered the expression profiles of somatotropic axis genes in chickens. *PLoS One*, *13*(4), e0195378. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195378
30. Kalashnikov, V., Zajcev, A., Atroshchenko, M., Kalinkova, L., Kalashnikova, T., Miroshnikov, S., Frolov, A., & Zav'yalov, O. (2018). The content of essential and toxic elements in the hair of the mane of the trotter horses depending on their speed. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(22), 21961-21967. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2334-2 EDN: https://elibrary.ru/YBUALJ
31. Levakhin, V. I., Gorlov, I. F., Azhmuldinov, E. A., Levakhin, Yu. I., Duskaev, G. K., Zlobina, E. Yu., & Karpenko, E. V. (2017). Change in physiological parameters of calves of various breeds under the transport and preslaughter stress. *Nusantara Bioscience*, *9*(1), 1-5. https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n090101 EDN: https://elibrary.ru/ZVTZPJ

32. Meyer, J., Novak, M., Hamel, A., & Rosenberg, K. (2014). Extraction and analysis of cortisol from human and monkey hair. *J Vis Exp*, *24*(83), e50882. https://doi.org/10.3791/50882
33. Miroshnikov, S., Kharlamov, A., Zavyalov, O., Frolov, A., Duskaev, G., Bolodurina, I., & Arapova, O. (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
34. 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
35. Miroshnikov, S. A., Zavyalov, O. A., Frolov, A. N., Skalny, A. V., & Grabeklis, A. R. (2020). The reference values of hair content of trace elements in dairy cows of holstein breed. *Biological Trace Element Research*, *194*(1), 145-151. https://doi.org/10.1007/s12011-019-01768-6 EDN: https://elibrary.ru/PILFQC
36. Peric, T., Comin, A., Corazzin, M., Montillo, M., Cappa, A., Campanile, G., & Prandi, A. (2013). Short communication: hair cortisol concentrations in Holstein-Friesian and crossbreed F1 heifers. *J Dairy Sci*, *96*(5), 3023-3027. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6151 EDN: https://elibrary.ru/YDIAGD
37. Rezaei, R., Wu, Z., Hou, Y., Bazer, F. W., & Wu, G. (2016). Amino acids and mammary gland development: nutritional implications for milk production and neonatal growth. *J Anim Sci Biotechnol*, *2*(7), 20. https://doi.org/10.1186/s40104-016-0078-8 EDN: https://elibrary.ru/YDFGZI
38. 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*, 589-601. https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.09.009
39. Skoupá, K., Šťastný, K., & Sládek, Z. (2022). Anabolic Steroids in Fattening Food-Producing Animals-A Review. *Animals (Basel)*, *18*(16), 2115. https://doi.org/10.3390/ani12162115 EDN: https://elibrary.ru/XBKHGY
40. Steyn, F. J., Xie, T. Y., Huang, L., Ngo, S. T., Veldhuis, J. D., Waters, M. J., & Chen, C. (2013). Increased adiposity and insulin correlates with the progressive suppression of pulsatile gh secretion during weight gain. *J Endocrinol*, *218*(2), 233-244. https://doi.org/10.1530/JOE-13-0084
41. Tallo-Parra, O., Carbajal, A., Monclús, L., Manteca, X., & Lopez-Bejar, M. (2018). Hair cortisol and progesterone detection in dairy cattle: interrelation with physiological status and milk production. *Domest Anim Endocrinol*, *64*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2018.02.001

42. 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. PMID: 25997530. https://doi.org/10.1017/S1751731115000294
43. Vann, R. V., Nguyen, H. V., Reeds, P. J., Burrin, D. G., Fiorotto, M. L., Steele, N. C., Deaver, D. R., & Davis, T. A. (2000). Somatotropin increases protein balance by lowering body protein degradation in fed, growing pigs. *Am. J. Physiol*, *278*, E477-E483. https://doi.org/10.1152/ajpendo.2000.278.3.E477
44. Zavyalov, O. A., Frolov, A. N., Medetov, E. S., Aldyyarov, T. B., & Sycheva, I. N. (2024). Effect of the level of somatotropin hormone in blood serum on the meat productivity of Aberdeen angus bulls. *BIO Web of Conferences*, *121*, 02009. https://doi.org/10.1051/bioconf/202412102009 EDN: https://elibrary.ru/IVUBIA

References

1. Kalashnikov, A. P., Fisinin, V. I., Shcheglov, V. V., & Pervov, N. G. (2003). *Norms and rations for feeding farm animals*. Moscow: Znanie. 456 p. ISBN: 5-94587-093-5 EDN: https://elibrary.ru/PXQMHL
2. Kononenko, S. I., Kharlamov, A. V., Zavyalov, O. A., & Kharlamov, V. A. (2009). Productivity of bulls born in different seasons of the year. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, *19*, 197-203. EDN: https://elibrary.ru/KVLOCL
3. Kharlamov, A. V., Zavyalov, O. A., Frolov, A. N., Kurilkina, M. Ya., & Korolev, V. L. (2017). Efficiency of beef production under different technologies of rearing and fattening. *Bulletin of Meat Cattle Breeding*, (2), 93-99. EDN: https://elibrary.ru/YTOCPP
4. Anh, N. T. L., Kunhareang, S., & Duangjinda, M. (2015). Association of Chicken Growth Hormones and Insulin-like Growth Factor Gene Polymorphisms with Growth Performance and Carcass Traits in Thai Broilers. *Asian-Australas J Anim Sci*, *28*, 1686-1695. https://doi.org/10.5713/ajas.15.0028
5. Asimov, G. J., & Krouze, N. K. (1937). The lactogenic preparations from the anterior pituitary and the increase of milk yield in cows. *J Dairy Sci*, *20*, 289-306.
6. Aytac, A. K., Bilal, A. K., & Davut, B. (2015). Determination of the alui polymorphism effect of bovine growth hormone gene on carcass traits in Zavot cattle with analysis of covariance. *Turk J Vet Anim Sci*, *39*, 16-22.
7. 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. *Front Vet Sci*, *6*, 323. https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00323

8. Berryman, D. E., & List, E. O. (2017). Growth Hormone's effect on adipose tissue: quality versus quantity. *Int J Mol Sci*, *8*, 1621.
9. Braun, U., Michel, N., Baumgartner, M. R., Hässig, M., & Binz, T. M. (2017). Cortisol concentration of regrown hair and hair from a previously unshorn area in dairy cows. *Res Vet Sci*, 114, 412-415. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.07.005
10. Bristow, D. J., & Holmes, D. S. (2007). Cortisol levels and anxiety-related behaviors in cattle. *Phys Behav*, 90, 626-638. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.11.015
11. Brown-Borg, H. M. (2009). Hormonal control of aging in rodents: the somatotropic axis. *Mol Cell Endocrinol*, 299, 64-71. https://doi.org/10.1016/j.mce.2008.07.001
12. Burnard, C., Ralph, C., Hynd, P., Hocking Edwards, J., & Tilbrook, A. (2017). Hair cortisol and its potential value as a physiological measure of stress response in human and non-human animals. *Anim Prod Sci*, *57*, 401-414. https://doi.org/10.1071/AN15622
13. Burnett, T. A., Madureira, A. M., Silper, B. F., Tahmasbi, A., Nadalin, A., Veira, D. M., & Cerri, R. L. (2015). Relationship of concentrations of cortisol in hair with health, biomarkers in blood, and reproductive status in dairy cows. *J Dairy Sci*, *98*(7), 4414-4426. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8871
14. Bush, J. A., Wu, G., Suryawan, A., Nguyen, H. V., & Davis, T. A. (2002). Somatotropin-induced amino acid conservation in pigs involves differential regulation of liver and gut urea cycle enzyme activity. *The Journal of Nutrition*, *132*(1), 59-67. https://doi.org/10.1093/jn/132.1.59
15. Cantalapiedra-Hijar, G., Abo-Ismail, M., Carstens, G. E., Guan, L. L., Hegarty, R., Kenny, D. A., McGee, M., Plastow, G., Relling, A., & Ortigues-Marty, I. (2018). Review: Biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle. *Animal*, *12*(s2), 321-335. https://doi.org/10.1017/S1751731118001489
16. Carrell, R. C., Smith, W. B., Kinman, L. A., Mercadante, V. R. G., Dias, N. W., & Roper, D. A. (2021). Cattle stress and pregnancy responses when imposing different restraint methods for conducting fixed time artificial insemination. *Anim Reprod Sci*, *225*, 106672. https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106672 EDN: https://elibrary.ru/FSFANM
17. Comin, A., Prandi, A., Peric, T., Corazzin, M., Dovier, S., & Bovolenta, S. (2011). Hair cortisol levels in dairy cows from winter housing to summer highland grazing. *Livest Sci*, *138*, 69-73. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.12.009
18. Dehkhoda, F., Lee, C. M. M., Medina, J., & Brooks, A. J. (2018). The growth hormone receptor: mechanism of receptor activation, cell signaling, and phys-

iological aspects. *Front Endocrinol (Lausanne)*, *9*, 35. https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00035

19. Devesa, J., Almengló, C., & Devesa, P. (2016). Multiple Effects of Growth Hormone in the Body: Is it Really the Hormone for Growth? *Clin Med Insights Endocrinol Diabetes*, *9*, 47-71. https://doi.org/10.4137/CMED.S38201
20. Dumbell, R. (2022). An appetite for growth: The role of the hypothalamic-pituitary-growth hormone axis in energy balance. *J Neuroendocrinol*, *34*(6), e13133. https://doi.org/10.1111/jne.13133 EDN: https://elibrary.ru/UVOOVW
21. Flores, J., García, J. E., Mellado, J., Gaytán, L., de Santiago, Á., & Mellado, M. (2019). Effect of growth hormone on milk yield and reproductive performance of subfertile Holstein cows during extended lactations. *Spanish J. Agric. Res*, *17*(11), e0403. https://doi.org/10.5424/sjar/2019171-13842 EDN: https://elibrary.ru/REWXBZ
22. Florini, J. R., Ewton, D. Z., & Coolican, S. A. (1996). Growth hormone and the insulin-like growth factor system in myogenesis. *Endocr Rev*, *17*, 481-517. https://doi.org/10.1210/edrv-17-5-481
23. Furigo, I. C., Teixeira, P. D. S., & de Souza, G. O. (2019). Growth hormone regulates neuroendocrine responses to weight loss via AgRP neurons. *Nat Commun*, *1*, 662. https://doi.org/10.1038/s41467-019-08607-1 EDN: https://elibrary.ru/HMFRHT
24. Ghassemi Nejad, J., Lee, B. H., Kim, J. Y., Chemere, B., Sung, K. I., & Lee, H. G. (2021). Effect of alpine grazing on plasma and hair cortisol, serotonin, and DHEA in dairy cows and its welfare impact. *Domest Anim Endocrinol*, *75*, 106581. https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2020.106581 EDN: https://elibrary.ru/NFZMZK
25. Gómez, C. A., Fernández, M., Franco, N., & Cueva, R. (2022). Effect of two formulations of recombinant bovine somatotropin on milk production and body condition of cattle under intensive management in Peru. *Trop Anim Health Prod*, *54*(2), 96. https://doi.org/10.1007/s11250-021-03036-z EDN: https://elibrary.ru/MZNKYE
26. Gow, R., et al. (2010). An assessment of cortisol analysis in hair and its clinical applications. *Forensic science international*, *196*(1-3), 32-37. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.12.040
27. Heimbürge, S., Kanitz, E., Tuchscherer, A., & Otten, W. (2020). Within a hair's breadth – Factors influencing hair cortisol levels in pigs and cattle. *Gen Comp Endocrinol*, *1*(288), 113359. https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2019.113359
28. Holzer, Z., Aharoni, Y., Brosh, A., Orlov, A., Veenhuizen, J., & Kasser, T. R. (1999). The effects of long-term administration of recombinant bovine somato-

tropin (Posilac) and Synovex on performance, plasma hormone and amino acid concentration, and muscle and subcutaneous fat fatty acid composition in Holstein-Friesian bull calves. *Journal of Animal Science*, *77*(6), 1422-1430. https://doi.org/10.2527/1999.7761422x

29. Jia, J., Ahmed, I., Liu, L., Liu, Y., Xu, Z., Duan, X., Li, Q., Dou, T., Gu, D., Rong, H., Wang, K., Li, Z., Talpur, M. Z., Huang, Y., & Wang, S., et al. (2018). Selection for growth rate and body size have altered the expression profiles of somatotropic axis genes in chickens. *PLoS One*, *13*(4), e0195378. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195378
30. Kalashnikov, V., Zajcev, A., Atroshchenko, M., Kalinkova, L., Kalashnikova, T., Miroshnikov, S., Frolov, A., & Zav'yalov, O. (2018). The content of essential and toxic elements in the hair of the mane of the trotter horses depending on their speed. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(22), 21961-21967. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2334-2 EDN: https://elibrary.ru/YBUALJ
31. Levakhin, V. I., Gorlov, I. F., Azhmuldinov, E. A., Levakhin, Yu. I., Duskaev, G. K., Zlobina, E. Yu., & Karpenko, E. V. (2017). Change in physiological parameters of calves of various breeds under the transport and preslaughter stress. *Nusantara Bioscience*, *9*(1), 1-5. https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n090101 EDN: https://elibrary.ru/ZVTZPJ
32. Meyer, J., Novak, M., Hamel, A., & Rosenberg, K. (2014). Extraction and analysis of cortisol from human and monkey hair. *J Vis Exp*, *24*(83), e50882. https://doi.org/10.3791/50882
33. Miroshnikov, S., Kharlamov, A., Zavyalov, O., Frolov, A., Duskaev, G., Bolodurina, I., & Arapova, O. (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
34. 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
35. Miroshnikov, S. A., Zavyalov, O. A., Frolov, A. N., Skalny, A. V., & Grabeklis, A. R. (2020). The reference values of hair content of trace elements in dairy cows of holstein breed. *Biological Trace Element Research*, *194*(1), 145-151. https://doi.org/10.1007/s12011-019-01768-6 EDN: https://elibrary.ru/PILFQC
36. Peric, T., Comin, A., Corazzin, M., Montillo, M., Cappa, A., Campanile, G., & Prandi, A. (2013). Short communication: hair cortisol concentrations in Holstein-Friesian and crossbreed F1 heifers. *J Dairy Sci*, *96*(5), 3023-3027. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6151 EDN: https://elibrary.ru/YDIAGD

37. Rezaei, R., Wu, Z., Hou, Y., Bazer, F. W., & Wu, G. (2016). Amino acids and mammary gland development: nutritional implications for milk production and neonatal growth. *J Anim Sci Biotechnol*, *2*(7), 20. https://doi.org/10.1186/s40104-016-0078-8 EDN: https://elibrary.ru/YDFGZI
38. 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*, 589-601. https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.09.009
39. Skoupá, K., Šťastný, K., & Sládek, Z. (2022). Anabolic Steroids in Fattening Food-Producing Animals-A Review. *Animals (Basel)*, *18*(16), 2115. https://doi.org/10.3390/ani12162115 EDN: https://elibrary.ru/XBKHGY
40. Steyn, F. J., Xie, T. Y., Huang, L., Ngo, S. T., Veldhuis, J. D., Waters, M. J., & Chen, C. (2013). Increased adiposity and insulin correlates with the progressive suppression of pulsatile gh secretion during weight gain. *J Endocrinol*, *218*(2), 233-244. https://doi.org/10.1530/JOE-13-0084
41. Tallo-Parra, O., Carbajal, A., Monclús, L., Manteca, X., & Lopez-Bejar, M. (2018). Hair cortisol and progesterone detection in dairy cattle: interrelation with physiological status and milk production. *Domest Anim Endocrinol*, *64*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2018.02.001
42. 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. PMID: 25997530. https://doi.org/10.1017/S1751731115000294
43. Vann, R. V., Nguyen, H. V., Reeds, P. J., Burrin, D. G., Fiorotto, M. L., Steele, N. C., Deaver, D. R., & Davis, T. A. (2000). Somatotropin increases protein balance by lowering body protein degradation in fed, growing pigs. *Am. J. Physiol*, *278*, E477-E483. https://doi.org/10.1152/ajpendo.2000.278.3.E477
44. Zavyalov, O. A., Frolov, A. N., Medetov, E. S., Aldyyarov, T. B., & Sycheva, I. N. (2024). Effect of the level of somatotropin hormone in blood serum on the meat productivity of Aberdeen angus bulls. *BIO Web of Conferences*, *121*, 02009. https://doi.org/10.1051/bioconf/202412102009 EDN: https://elibrary.ru/IVUBIA

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

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

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

Слепцов Иван Иванович, кандидат экономических наук, 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
saas2005@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Zavyalov, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, 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 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
oleg-zavyalov83@mail.ru

Alexey 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 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
forleh@mail.ru

Ivan I. Sleptsov, Candidate of Economic Sciences, Researcher, 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 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
saas2005@mail.ru

Поступила 16.10.2024 Received 16.10.2024
После рецензирования 07.11.2024 Revised 07.11.2024
Принята 15.11.2024 Accepted 15.11.2024

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1053 **EDN: ZXTFKS**
УДК 581.192:631.861:661.162.6

CC BY NC ND

Научная статья

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ НА ФИТОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛИСТЬЕВ И ШИШЕК ХМЕЛЯ ОБЫКНОВЕННОГО (*HUMULUS LUPULUS* L.)

Д. Аль Хуссейн, Е. Алмуграби, А.А. Мостякова, О.А. Тимофеева

Аннотация

Обоснование. Уже с давних времен установлено, что в лекарственных растениях содержится большое количество активных соединений, которые используются для лечения многих заболеваний. Впервые проведено сравнительное изучение листьев и шишки хмеля обыкновенного по накоплению фитохимических веществ. Были подобраны коммерческие препараты биостимуляторов роста (гибберсиб, эпин-экстра) и био-удобрение (пудрет). Установлено, что хмель, выращенная в условиях Татарстана, обладает богатым фитохимическим составом и большим содержанием биоактивных веществ. Может быть рекомендована в качестве ресурса, что позволит фармакологическую промышленность наиболее качественным сырьем.

Цель исследования. Осуществить сравнительный анализ фитохимических составов листьев и шишек хмеля обыкновенного (*Humulus lupulus* L.) при различных методах их обработоки.

Материалы и методы исследований. В мае 2023 года в лабораторных условиях была произведена посадка корневищных черенков хмеля в закрытом грунте. В соответствии со схемой эксперимента по первому варианту корневищные черенки были посажены в горшки с почвой, в которой содержался пудрет (био-удобрение из высушенного в СВЧ-лучах птичьего помета, состоит

из 88.4% органического вещества, 4.59% азота, 1.80% калия, 3.70% фосфора) в количестве 10 г на 1 кг почвы. По второму способу корневищные черенки хмеля были обработаны гибберсибом (666,6 мкг/л) посредством опрыскивания, по третьему способу они были обработаны эпин-экстра (500 мкл/л) аналогично посредством опрыскивания.

Через 4 недели образцы, обработанные по всем вариантам, и контрольный образец были пересажены в открытый грунт. (кислотность почвы составляла 6.9, концентрация органического вещества (гумуса) – 1,96%, нитратного азота – 35,5 мг/кг, аммиачного азота – 11,3 мг/кг, подвижного фосфора – 584 мг/кг, обменного кальция – 13,25 ммоль/100 г, обменного магния – 1,5 ммоль/100 г).

Пробы для анализа (листья и шишки) были извлечены спустя 12 недель с момента их посадки в открытом грунте (средняя ночная температура составила $+14^0$C).

Фитохимический состав в листьях и в шишках определяли спектрофотометрическими методами описано в исследовании Аль Хуссейн и соавторы (2023).

Опыты проводили в шести биологических повторностях. Статистическую обработку данных осуществлялась с использованием программы Excel 2016. Достоверность различия определялась по критерию Манна-Уитни с $p \leq 0,05$.

Результаты. Эпин-экстра увеличивал преимущественно концентрацию флавоноидов, дубильных веществ и витамина B_2 в образцах, гибберсиб увеличивал концентрацию фенольных соединений, каротиноидов, сахаров и белков, пудрет увеличивал концентрацию витамина С, каротиноидов, витамина B_2 и белков.

Заключение. В наших исследованиях можем сделать вывод, что экстракты хмеля имеют более широкий потенциал для использования в области медицины и пищевых технологий, чем просто ферментация, а это связано с возможностью улучшения содержание полезных первичных и вторичных веществ с использованием синтетических регуляторов роста и био-удобрение. Большое количество листьев хмеля остается неиспользованным побочным сельскохозяйственным продуктом, но по нашими исследованиями доказали возможность использования листьев хмеля в качестве источника первичных и вторичных метаболитов в медицине (в качестве седативного, антимикробного, мочегонного, противовоспалительного средства при лечении гастритов, циститов, уретритов, заболеваниях почек, печени и желчного пузыря) и пищевой промышленности (пивоваренной промышленностях, в пекарном производстве).

Ключевые слова: *Humulus lupulus* L.; Эпин-экстра; гибберсиб; пудрет; листья; шишки; фитохимический состав; спектрофотометрический метод

Для цитирования. Аль Хуссейн, Д., Алмуграби, Е., Мостякова, А. А., & Тимофеева, О. А. (2025). Влияние разных способов обработки на фитохимический состав листьев и шишек хмеля обыкновенного (*Humulus lupulus* L.). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 60-81. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1053

Original article

INFLUENCE OF DIFFERENT PROCESSING METHODS ON THE PHYTOCHEMICAL COMPOSITION OF LEAVES AND CONES OF COMMON HOPS (*HUMULUS LUPULUS* L.)

D. Al Hussein, E. Almugrabi, A.A. Mostyakova, O.A. Timofeeva

Abstract

Background. It has been established for a long time that medicinal plants contain a large number of active compounds that are used to treat many diseases. For the first time, a comparative study of the leaves and cones of common hops was conducted for the accumulation of phytochemical compositions. Commercial preparations of growth biostimulants (gibbersib, epin-extra) and bio-fertilizer (pudret) were selected. It was established that hops grown in the conditions of Tatarstan have a rich phytochemical composition and a high content of bioactive substances. can be recommended as a resource that will allow the pharmacological industry to use the highest quality raw materials.

Purpose. Conduct a comparative analysis of the phytochemical composition in the leaves and cones of common hop (*Humulus lupulus* L.) under different processing methods.

Materials and methods. Planting of rhizomatous hop cuttings was carried out at the beginning of May 2023 in protected soil under laboratory conditions. According to the experimental design, rhizome cuttings were planted in pots with soil to which pudret was added (bio-fertilizer from bird droppings dried in microwave rays, consisting of 88.4% organic matter, 4.59% nitrogen, 1.80% potassium, 3.70% phosphorus) at the rate of 10 g/kg of soil, in the second variant, rhizomatous hop cuttings were treated with gibbersib (666.6 μg/l) by spraying, and in the third variant they were treated with epin-extra (500 μl/l) also by spraying.

After 4 weeks, all variants and also the control were transplanted into open ground (soil acidity was 6.9, organic matter content (humus) 1.96%, nitrate nitrogen

content 35.5 mg/kg, ammonia nitrogen 11.3 mg/kg, available phosphorus 584 mg/kg, the amount of exchangeable calcium was 13.25 mmol/100 g and exchangeable magnesium 1.5 mmol/100 g).

Samples for analysis (leaves and cones) were taken 12 weeks after planting in open ground (average night temperature was +14^{0}C).

The phytochemical composition in the leaves and buds was determined by spectrophotometric methods described in a study by Al Hussain et al (2023).

The experiments were carried out in six biological replicates. Statistical processing of the data was carried out using Excel 2016. The significance of the difference was determined using the Mann-Whitney test with $p \leq 0.05$.

Results. Epin-extra increased the content of flavonoids, tannins and vitamin B2 to a greater extent, gibbersib increased the content of phenolic compounds, carotenoids, sugars and proteins, and powder increased the content of vitamin C, carotenoids, vitamin B2 and proteins.

Conclusion. Our research shows that hop extracts have a wider potential for use in medicine and food technology than just fermentation, and this is due to the possibility of improving the content of useful primary and secondary substances using synthetic growth regulators and bio-fertilizers. A large number of hop leaves remain an unused agricultural by-product, but our research has proven the possibility of using hop leaves as a source of primary and secondary metabolites in medicine (as a sedative, antimicrobial, diuretic, anti-inflammatory agent in the treatment of gastritis, cystitis, urethritis, kidney diseases, liver and gall bladder) and food industry (brewing industry, bakery production).

Keywords: *Humulus lupulus* L.; Epin-extra; gibbersib; pudret; leaves; cones; phytochemical composition; spectrophotometric method

For citation. Al Hussein, D., Almugrabi, E., Mostyakova, A. A., & Timofeeva, O. A. (2025). The influence of different processing methods on the phytochemical composition of leaves and cones of common hop (*Humulus lupulus* L.). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 60-81. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1053

Введение

Хмель (*Humulus lupulus* L.) – давно известное растение, культивируемое людьми. Самые ранние источники сообщают о его происхождение в древнем Китае, позже он распространился по огромной части регионов мира с умеренным климатом [35]. Несмотря на то, что в настоящее время хмель прочно связан с производством пива, это действительно было так на протяжении долгого времени, его исходное применение было иным.

Хмель часто применялся в роли лекарственных растений в известных фармакопеях, предусмотренных для смягчения симптомов разного рода заболеваний[8-15]. Ему присвоены противовоспалительные и антимикробные свойства, и, кроме этого, мочегонные, пищеварительные, седативные и прогестогеные свойства. По причине большого разнообразия его достоинств для улучшения здоровья он признавался растением, которое продлевает жизнь [8-15].

Почти все части растения хмеля богаты биологически активными соединениями [6-10], характеризующимися мощной противомикробной, антиоксидантной и противогрибковой свойствами. Хмель богат первичными метаболитами как белки, сахар и витамины, и вторичными метаболитами как смолы, эфирные масла и полифенолы [6; 8; 15; 21].

Эти особенности в сочетании с растущим интересом к натуральным веществам, способствующим укреплению здоровья, открывают новые интересные перспективы для хмеля за пределами пивной промышленности [16]. На протяжении веков и до сих пор из выращенного хмеля люди получали чай, продукты питания (приготовление молодых побегов) и даже консервант для хлеба [20]. Недавно было обнаружено, что экстракция, полученная из хмеля, действует как успокоительное и предотвращает различные заболевания, такие как стеатоз печени, воспаление, фиброз, ожирение и диабет [15-25].

Главная составная частью применяемого в настоящее время хмеля представляет собой шишка (женское соцветие растения), тем не менее, оставшиеся элементы растения хмеля тоже содержат полезные вещества в листьях, стеблях и корневищах [25-33].

Цель исследования – провести сравнительный анализ фитохимический состав в листьях и шишках хмеля обыкновенного (*Humulus lupulus* L.) при разных способах обработки.

Материалы и методы исследований

В мае 2023 года в лабораторных условиях была произведена посадка корневищных черенков хмеля в огражденный грунт. В соответствии со схемой эксперимента по первому варианту корневищные черенки были посажены в горшки с почвой, в которой содержался пудрет (био-удобрение из высушенного в СВЧ-лучах птичьего помета, состоит из 88.4% органического вещества, 4.59% азота, 1.80% калия, 3.70% фосфора) в количестве 10 г на кг почвы. По второму способу корневищные черенки хмеля были обработаны гибберсибом (666,6 мкг/л) посредством опрыскивания,

по третьему способ они были обработаны эпин-экстра (500 мкл/л) аналогично посредством опрыскивания.

Через 4 недели образцы, обработанные по всем вариантам, и контрольный образец были пересажены в открытый грунт. (кислотность почвы составляла 6.9, концентрация органического вещества (гумуса) – 1,96%, нитратного азота – 35,5 мг/кг, аммиачного азота – 11,3 мг/кг, подвижного фосфора – 584 мг/кг, обменного кальция – 13,25 ммоль/100 г, обменного магния – 1,5 ммоль/100 г).

Пробы для анализа (листья и шишки) были извлечены через 12 недель с момента их посадки в открытом грунте (средняя ночная температура составила +14 °C).

Фитохимический состав в листьях и в шишках определяли спектрофотометрическими методами описано в исследовании Аль Хуссейн и соавторы [22].

Опыты проводили в шести биологических повторностях. Статистическую обработку данных осуществлялась с использованием программы Excel 2016. Достоверность различия определялась по критерию Манна–Уитни с $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

К числу лекарственных растений с интересными биологическими свойствами относится хмель (*Humulus lupulus* L.), широко известный благодаря своему использованию в пивоваренной промышленности, но в последние годы его все чаще начали применять и в медицине. Его сильный терапевтический потенциал обусловлен наличием, особенно в шишках, широкого спектра биоактивных молекул, в основном вторичных метаболитов, некоторые из которых характеризуют само растение, например, горькие кислоты и специфические полифенолы, такие как ксантогумол [21; 27].

Известно, что хмель богат фенольными соединениями, в основном флавоноидами, которые являются вторичными метаболитами. С помощью спектрометрического анализа было обнаружено, что в растения содержится примерно 14,4% фенольных кислот, флавоноиды, проантоцианидины, халконы, а также катехины [30]. Более того, в солоде содержится 70–80% всех полифенольных соединений, присутствующих в пиве [23].

По полученным нами результатам было установлено, что в контрольных образцах содержится существенно больше фенольных соединений, флавоноидов и дубильных веществ, чем в листьях.

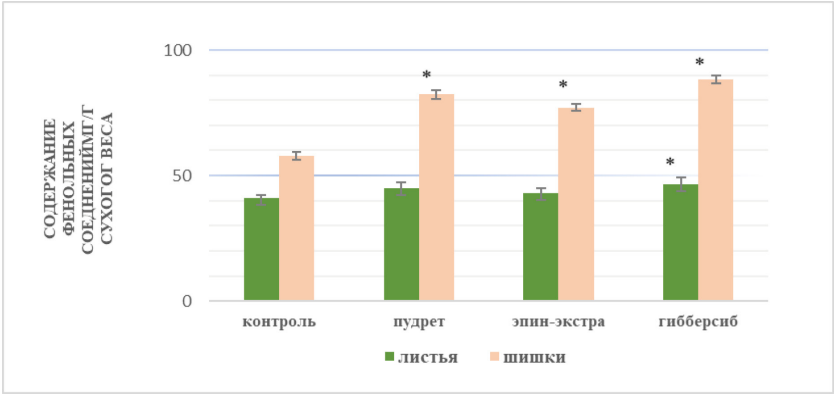


Рис. 1. Влияние разных способов обработки на содержание растворимых фенольных соединений в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) в сравнении с контролем.

Суммарное содержание фенольных соединений в наших исследований варьировалось в пределах от 41,2 до 46,4 мг/г сухого веса в листьях и от 57,9 до 88,2 мг/г в шишках (рис. 1). Наши данные совпадают с результатами, полученными Jae Il Lyu (2022), которые изучали содержание фенольных соединений и флавоноидов в шишках у шести сортах хмеля, согласно их данным, количество фенольных соединений было от 52,8 до 81,9 мг/г сухого веса, а количество флавоноидов от 3,9 до 19,7 мг/г сухого веса [16]. В то время содержание флавоноидов в наших исследований было выше, чем у них, где было от 20,56 до 30,86 мг/г сухого веса у листьев и от 23,15 до 36,04 мг/г в шишках. По другим литературным сведениям содержание флавоноидов в шишках хмеля варьируется от 14 до 85 мг/г сухого веса [18]. Это разница в содержании может быть связана с различными сортами и факторами окружающей среды.

Флавоноиды присутствуют в соплодиях, листьях и стеблях растения. Флавоноиды хмеля представлены различными группами - изофлавонами, флаванолами, флавононами, халконами, антоцианидинами, наиболее часто с ними сталкиваются в форме гликозидов [15].

Все регуляторы роста растений и био-удобрения увеличивали содержание параметров. Однако максимальный эффект продемонстрировал гибберсиб в листьях и в шишках, где он повысил содержание фенольных соединений в листьях на 13,2% и на 52,2% в шишках относительно контрольного образца. Кроме регуляторов роста и био-удобрения повысилось

содержание флавоноидов, в большей степени под влиянием эпина- экстра, их концентрация повысилась в листьях на 50,1 % и на 55,6% в шишках относительно контрольного образца. Гибберсиб был сильно схож по действию к эпину, а пудрет проявил минимальное действие (рис. 2).

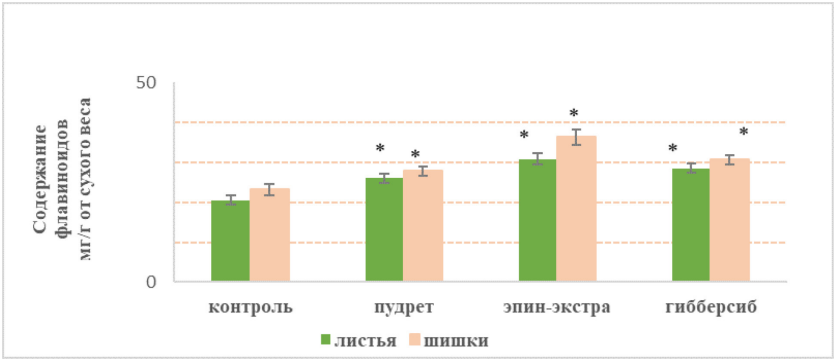


Рис. 2. Влияние разных способов обработки на содержание флавоноидов в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) по сравнению с контролем.

Одной из ведущих групп биологически активных веществ сырья *Humulus lupulus* L. выступают дубильные вещества, являющихся многообразной смесью похожих по составу фенольных соединений, характеризующихся высокой антиоксидантной активностью [2].

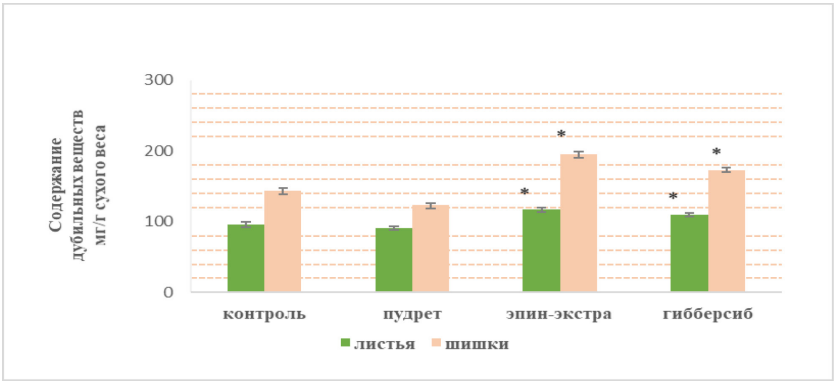


Рис. 3. Влияние разных способов обработки на содержание дубильных веществ в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) по сравнению с контролем.

Суммарная содержание дубильных веществ в наших исследованиях варьировалось от 96,5 до 116,8 мг/г сухого веса в листьях, и от 144,2 до 195,4 мг/г в шишках. Эпин преимущественно повышал содержание дубильных веществ в шишках на 35,4% и в листьях на 21,03% относительно контрольного образца (рис. 3).

Было проиллюстрировано, что эпин-экстра ускоряет биосинтез фенольных соединений на персике и задействован в уменьшении тепловыделения в процессе окислительного стресса [13], кроме того, было продемонстрировано в исследовании Алмуграби [1], что эпин-экстра и гиббресиб ускоряют синтез фенольных соединений и флавоноидов в онтогенезе у растения капуста кейл.

К основным активным веществам, присутствующих в различных растениях, относятся витамины. В шишках хмеля были обнаружены витамины (рутин, С, Е, B_2, B_6, РР). Во время роста шишек хмеля они аккумулируют до 63,5 мг % витамина С и 20-70 мг% токоферолов [3].

Согласно предыдущей литературе, аскорбиновая кислота являются мощными антиоксидантами и неизменно защищают организм от хронических заболеваний, удаляя множество различных активных форм кислорода [7].

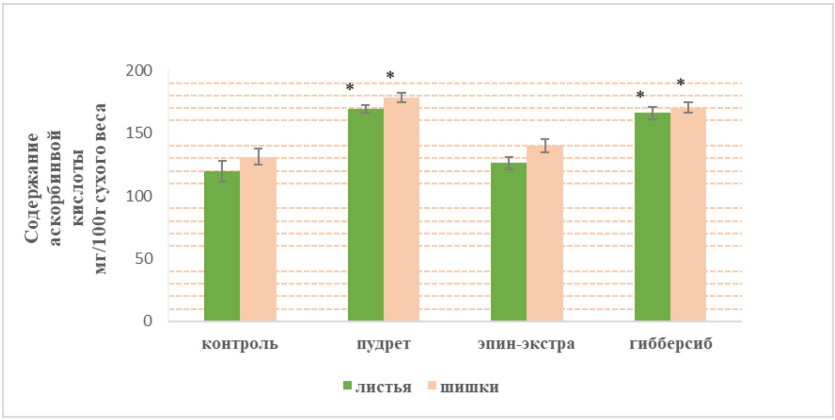


Рис. 4. Влияние разных способов обработки на содержание аскорбинвой кислоты в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) по сравнению с контролем.

Полученные нами результаты показали, что в хмеле обыкновенном содержится большое количество витамина С, B_2 и каротиноидов. Суммарная

содержание витамина С в наших исследованиях варьировалось от 119,6 до 169,3 мг/100 г сухого веса в листьях и от 131,1 до 178,2 мг/100 г в шишках. Все регуляторы роста и био-удобрения увеличивали содержание витамина С, однако в некоторой степени пудрет показал более высокие результаты, аккумулирование витамина С увеличилось на 41,5% в листьях и на 35,9% в шишках (рис. 4).

Важнейшая задача каротиноидов в живых организмах состоит в том, что они оберегают клетки организма от отрицательного эффекта свободных радикалов [14].

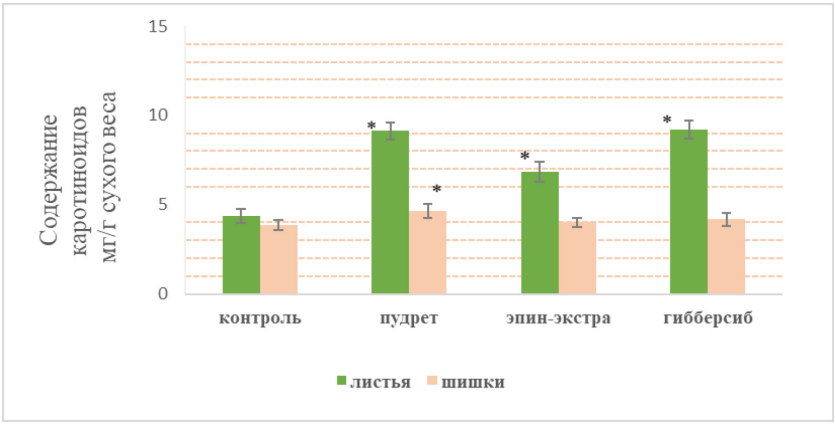


Рис. 5. Влияние разных способов обработки на содержание каротиноидов в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) по сравнению с контролем.

Общее количество каротиноидов у хмеля обыкновенного в наших исследованиях было от 4,3 мг/г до 9,2 мг/г сухого веса в листьях и от 3,8 мг/г до 4,6 мг/г сухого веса в шишках (рис. 5). По нашим результатам содержание каротиноидов было выше в листьях по сравнению с шишками в контрольном варианте. В листьях хмеля пудрет и гибберсиб повышали содержание каротиноидов, а в шишках только пудрет повышал содержание показателя.

Суммарное содержание рибофлавина в хмеле обыкновенном в полученном нами исследованиях варьировалось от 350,6 мкг/г до 432,3 мкг/г сухого веса в листьях и от 412,5 до 535,1 мкг/г сухого веса в шишках. Пудрет и эпин повышали содержание рибофлавина в листьях и также в шишках, эпин увеличивал концентрацию витамина B_2 на 23,2% в листьях и на 6,86% в шишках, пудрет повышал концентрацию данного параметра

на 29,7% в шишках. Между тем гибберсиб снижал его концентрацию в листьях на 5,69% и на 3,1% в шишках (рис. 6).

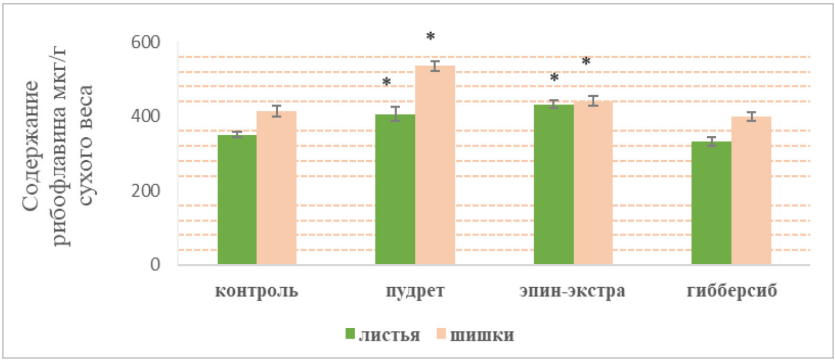


Рис. 6. Влияние разных способов обработки на содержание рибофлавина в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) по сравнению с контролем.

Как видно из наших результатов, пудрет повышал содержание всех изученных витаминов, это может быть связано с содержанием в нем азота. Есть много исследований, которые показывают увеличение содержания витамина С, каротиноидов, и рибофлавина в растениях под влиянием азотных удобрений [4; 19].

Faivre et al. (2007) и Farag et al. (2011) подтвердили присутствие некоторых сахаров в хмеле, среди которых глюкоза, фруктоза и мальтоза [10; 11]. В наших экспериментах зафиксировали существенное различие в концентрации сахаров между листьями и шишками. Суммарное содержание сахаров в хмеле обыкновенном в наших работах было 47,6 мг/г сухого веса в контрольных листьях и 117,3 мг /г сухого веса в шишках. Содержание сахара в наших трудах варьируется от 47,69 мг/г до 62,93 мг/г сухого веса в листьях и от 117,3 мг/г до 149,7 мг/г сухого веса в шишках (рис. 7).

Регуляторы роста увеличивали содержание сахаров в листьях и в шишках, в особенности при воздействии гибберсибом, который повышал концентрацию сахаров на 31.9% в листьях хмеля и на 27,6% в шишках, а эпин-экстра увеличивал содержание на 11.3% в шишках. Между тем пудрет снижал содержание сахаров в листьях на 16.8% и также в шишках на 15,7%.

Было показано, что гиббереллин инициирует образование α-амилазы, что предположительно, является одной из причин увеличения содержание сахаров под действием гибберсиба в наших исследованиях [12].

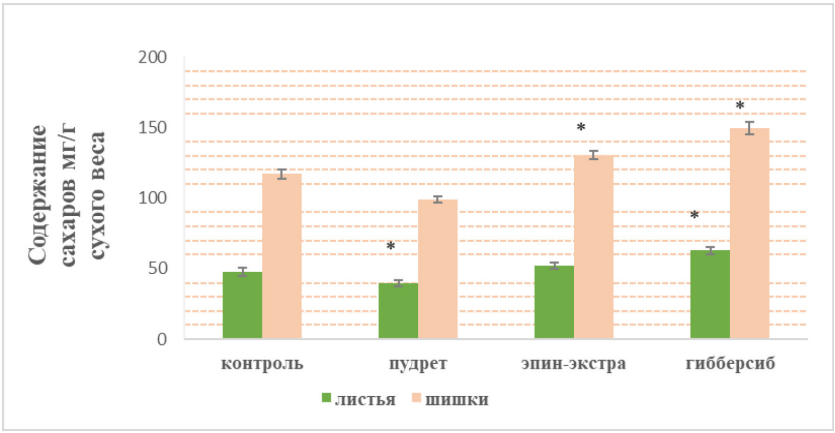


Рис. 7. Влияние разных способов обработки на содержание сахаров в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) по сравнению с контролем.

Олигосахариды представляют собой главные соединения для синтеза фенола из шикимовой кислоты, так как промежуточные продукты гликолиза, и пентозофосфатного пути принимают участие в синтезе ароматических аминокислот. Ранее было продемонстрировано, что содержание вторичных метаболитов преимущественно обусловлено балансом между образованием и расходованием олигосахаридов: чем выше это отношение, тем интенсивнее образуются вторичные метаболиты [28].

Белки осуществляют огромное количество жизненно важных задач в организме для образования и восстановления тканей, кроме того, они расходуются в процессе образования ферментов, гормонов и других химических веществ организма. Tanaka et al. (2014) доказали наличие триптофана у хмеля [31].

Согласно нашим результатам, количество белка составляло от 72,5 мг/г до 81,9 мг/г сухого веса в листьях и от 70,7 мг/г до 123,1 мг/г сухого веса в шишках. Пудрет и гибберсиб повысили содержание белков в листьях и шишках, но эпин-экстра уменьшал его концентрацию в листьях и увеличивал его в шишках.

Пудрет увеличивал концентрацию на 74,03% в шишках и на 12,9% в листьях (рис. 8), эти повышения может быть связано с содержанием в нем азота, который входит в синтезе аминокислоты. Однако он уменьшал содержание углеродсодержащих метаболитов в растениях хмель (как сахара

и дубильные вещества), это согласуется с теорией (соотношение между N и C) [12].

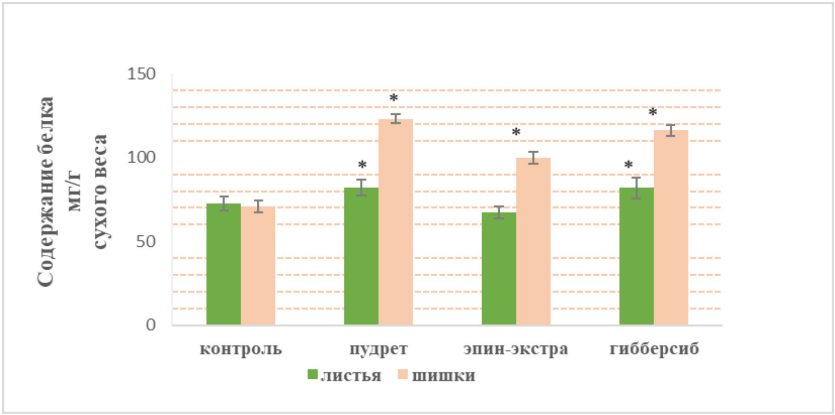


Рис. 8. Влияние разных способов обработки на содержание белка в растениях *Humulus lupulus* L.
*- Статистически значимые различия ($p<0.05$) по сравнению с контролем.

Для каждого конкретного фитохимического вещества и соответствующего пути его биосинтеза существует свое оптимальное соотношение этих элементов.

Фенилаланин является предшественником в биосинтезе фенолов, а также аминокислотой, используемой в синтезе белка. Следовательно, может существовать конкуренция за фенилаланин между синтезом белка и синтезом углеродсодержащих метаболитов, и поэтому биосинтез сахара и дубильные вещество в наших исследованиях может быть ингибирован из-за включения фенилаланина в синтез белка [29].

Так же калий активно участвует в синтез белка и каротиноидов [34]. Присутствие калия в составе пудрета, может быть, он играл роль в повышения уровня каротиноидов и белков в наших исследованиях.

В работе [1] было показано что, гибберсиб повышает содержание белков и сахаров в растениях капуста кейл.

Заключение

В наших исследованиях можем сделать вывод, что экстракт хмеля имеет более широкий потенциал для использования в области медицины и пищевых технологий, чем просто ферментация, а это связано с возможно-

стью улучшения содержание полезных первичных и вторичных веществ с использованием синтетических регуляторов роста и био-удобрение. Большое количество листьев хмеля остается неиспользованным побочным сельскохозяйственным продуктом, но по нашими исследованиями доказали возможность использования листьев хмеля в качестве источника первичных и вторичных метаболитов в медицине (в качестве седативного, антимикробного, мочегонного, противовоспалительного средства при лечении гастритов, циститов, уретритов, заболеваниях почек, печени и желчного пузыря) и пищевой промышленности (пивоваренной промышленности, в пекарном производстве).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке программы стратегического академического лидерства Казанского федерального университета

Список литературы

1. Алмуграби, Е. (2021). Фитохимический состав и антиоксидантный статус *Brassica oleraceae* L. при действии природных и синтетических регуляторов роста растений: Дис. … к-та биол. наук. Казань, 170 с.
2. Киреева, Т. Б. & Китова, Е. А. (2006). Экологически онтогенетические особенности накопления дубильных веществ в траве душицы обыкновенной в условиях Удмуртии. *Биология*, (10), 85-96.
3. Маланкина, Е. Л. Лекарственное применение хмеля. https://www.greeninfo.ru/lianes/humulus_lupulus.html/Article/_/aID/5359
4. Сажина, Н. Н. & Мисин, В. М. (2011). Измерение суммарного содержания фенольных соединений в различных частях лекарственных растений. *Химия растительного сырья*, (3), 149-152. EDN: https://elibrary.ru/OHSURD
5. Шафикова, С. Ф. (2013). Фармакогностическое изучение листьев хмеля обыкновенного (*Humulus lupulus* L.): Дис. … к-та фарм. наук. Самара, 181 с. EDN: https://elibrary.ru/YGMBGB
6. Astray, G. & Gullón, P. & Gullón, B. & Munekata, P. E. & Lorenzo, J. M. (2020). Humulus lupulus L. as a natural source of functional biomolecules. *Appl. Sci.*, *10*, 5074. https://doi.org/10.3390/app10155074 EDN: https://elibrary.ru/HVXHXH
7. Colville, L. & Smirnoff, N. (2008). Antioxidant status, peroxidase activity, and PR protein transcript levels in ascorbate-deficient *Arabidopsis thaliana* vtc mutants. *Journal of Experimental Botany*, *59*(14), 3857-3868. https://www.jstor.org/stable/24037641

8. Carbone, K. & Gervasi, F. (2022). An Updated Review of the Genus Humulus: A Valuable Source of Bioactive Compounds for Health and Disease Prevention. *Plants*, (11), 3434. https://doi.org/10.3390/plants11243434 EDN: https://elibrary.ru/UHHOVD
9. Dedei, A. J. (2021). Assessment of mineral nutrient impact on metabolites accumulation in kale (*Brassica oleracea* var. sabellica). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *13*(3), 208-224. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-3-208-224 EDN: https://elibrary.ru/GFXXKY
10. Faivre, C. & Ghedira, K. & Goetz, P. et al. (2007). Humulus lupulus L. *Phytothérapie*, *5*(2), 86-89. https://doi.org/10.1007/s10298-007-0217-7
11. Farag, M. A. & Porzel, A. & Schmidt, J. et al. (2011). Metabolite profiling and fingerprinting of commercial cultivars of *Humulus lupulus* L. (hop): a comparison of MS and NMR methods in metabolomics. *Metabolomics*, *8*(3), 492-507. https://doi.org/10.1007/s11306-011-0335-y EDN: https://elibrary.ru/IDBQZY
12. Finkelstein, R. R. & Gampala, S. S. L. & Rock, C. (2002). Abscisic Acid Signalling in Seeds and Seedlings. *The Plant Cell*, *18*, 15-45. https://doi.org/10.1105/tpc.010441
13. Gao, H. & Zhang, Z. & Lv, X. & Cheng, N. & Peng, B. & Cao, W. (2016). Effect of 24-epibrassinolide on chilling injury of peach fruit in relation to phenolic and proline metabolisms. *Postharvest Biology and Technology*, *111*, 390-397.
14. Kopsell, D. A. & Lefsrud, M. G. & Kopsell, D. E. & Curran Celentano, J. (2005). Air temperature affects biomass and carotenoid pigment accumulation in kale and spinach grown in a controlled environment. *Hortscience*, *40*(7), 2026-2030. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.7.2026 EDN: https://elibrary.ru/MFRVSL
15. Bocquet, L. & Sahpaz, S. & Hilbert, J. L. & Rambaud, C. (2018). *Humulus lupulus* L., a very popular beer ingredient and medicinal plant: overview of its phytochemistry, its bioactivity, and its biotechnology. *Phytochem Rev*, (17), 1047-1090. https://doi.org/10.1007/s11101-018-9584-y EDN: https://elibrary.ru/KKXZIB
16. Lyu, J. I. & Ryu, J. & Seo, K. S. & Kang, K. Y. & Park, S. H. & Ha, T. H. & Ahn, J. W. & Kang, S. Y. (2022). Comparative Study on Phenolic Compounds and Antioxidant Activities of Hop (*Humulus lupulus* L.) Strobile Extracts. *Plants*, (11), 135. https://doi.org/10.3390/plants11010135 EDN: https://elibrary.ru/CWQHXA
17. Maša, K. & Eva, Š. & Iztok, J. K. & Željko, K. & Urban, B. (2019). Hop Compounds: Extraction Techniques, Chemical Analyses, Antioxidative, Antimicrobial, and Anticarcinogenic Effects. *Nutrients*, (11), 257. https://doi.org/10.3390/nu11020257

18. Muzykiewicz, A. & Nowak, A. & Zielonka-Brzezicka, J. & Florkowska, K. & Duchnik, W. & Klimowicz, A. (2019). Comparison of antioxidant activity of extracts of hop leaves harvested in different years. *Herba Pol*, *65*, 1-9. https://doi.org/10.2478/hepo-2019-0013
19. Mozafar, A. (2008). Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants. *Plant Nutrition*, *16*(12), 2479-2506. https://doi.org/10.1080/01904169309364698
20. Nionelli, L. & Pontonio, E. & Gobbetti, M. & Rizzello, C. G. (2018). Use of hop extract as antifungal ingredient for bread making and selection of autochthonous resistant starters for sourdough fermentation. *Int. J. Food Microbiol*, *266*, 173-172. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.12.002
21. Okafor, V. N. & Anyalebechi, R. I. & Okafor, U. W. & Okonkwo, C. P. & Obiefuna, J. N. et al. (2020). Phytochemical Constituents of Extracts of Hops and Some Potential Nigerian Hop Substitutes: A Comparative Study in Beer Brewing. *Int J Biol Chem Res*, *11*(1), 1-7. https://www.researchgate.net/publication/350005833
22. Al Hussein, D. & Almugrabi, E. & Mostyakova, A. & Timofeeva, A. (2023). Phytochemical composition of *Humulus Lupulus* L. in ontogeny under different treatments. *E3S Web of Conferences*, *381*, 01022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338101022 EDN: https://elibrary.ru/KDHRXU
23. Quifer-Rada, P. & Vallverdú-Queralt, A. & Martínez-Huélamo, M. & Chiva-Blanch, G. & Jáuregui, O. & Estruch, R. & Lamuela-Raventós, R. (2015). A comprehensive characterisation of beer polyphenols by high resolution mass spectrometry (LC-ESI-LTQ-Orbitrap-MS). *Food Chem*, *169*, 336-343. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.154
24. Rodolfi, M. & Barbanti, L. & Giordano, C. & Rinaldi, M. & Fabbri, A. & Pretti, L. & Casolari, R. & Beghé, D. & Petruccelli, R. & Ganino, T. (2021). The Effect of Different Organic Foliar Fertilization on Physiological and Chemical Characters in Hop (*Humulus lupulus* L., cv Cascade) Leaves and Cones. *Appl. Sci.*, (11), 6778. https://doi.org/10.3390/app11156778 EDN: https://elibrary.ru/NIVHWI
25. Stanius, Ž. & Dūdenas, M. & Kaškonienė, V. & Stankevičius, M. M. & Skrzydlewska, E. & Drevinskas, T. & Ragažinskienė, O. & Obelevičius, K. & Maruška, A. (2022). Analysis of the Leaves and Cones of Lithuanian Hops (*Humulus lupulus* L.) Varieties by Chromatographic and Spectrophotometric Methods. *Molecules*, *27*, 2705. https://doi.org/10.3390/molecules27092705 EDN: https://elibrary.ru/CMGBSD
26. Schmidt, S. & Zietz, M. & Schreiner, M. & Rohn, S. & Kroh, L. & Krumbein, A. (2010). Genotypic and climatic influences on the concentration and compo-

sition of flavonoids in Kale (*Brassica oleracea* var. sabellica). *Food Chemistry*, *119*, 1293-1299. https://doi.org/10.1021/jf9033909 EDN: https://elibrary.ru/NAZVGT

27. Wei, S. & Sun, T. & Du, J. & Zhang, B. & Xiang, D. & Li, W. (2018). Xanthohumol, a prenylated flavonoid from Hops, exerts anticancer effects against gastric cancer in vitro. *Oncol. Rep.*, *40*, 3213-3222. https://doi.org/10.3892/or.2018.6723
28. Shui, Y. C. & Feng, X. & Yan, W. (2009). Advances in the study of flavonoids in Gingko biloba leaves. *Medicinal Plant Research*, *3*, 1248-1252. http://www.academicjournals.org/JMPR
29. Scheible, W. & Morcuende, R. & Czechowski, T. & Fritz, C. & Osuna, D. & Palacios-Rojas, N. & Schindelasch, D. & Thimm, O. & Udvardi, M. K. & Stitt, M. (2004). Genome-Wide Reprogramming of Primary and Secondary Metabolism, Protein Synthesis, Cellular growth processes, and the regulatory infrastructure of Arabidopsis in response to nitrogen. *Plant Physiology*, *136*, 2483-2499. https://doi.org/10.1104/pp.104.047019
30. Taylor, A. W. & Barofsky, E. & Kennedy, J. A. & Deinzer, M. L. (2003). Hop (*Humulus lupulus* L.) proanthocyanidins characterized by mass spectrometry, acid catalysis, and gel permeation chromatography. *J. Agric Food Chem*, *51*, 4101-4110. https://doi.org/10.1021/jf0340409
31. Tanaka, Y. & Yanagida, A. & Komeya, S. et al. (2014). Comprehensive separation and structural analyses of polyphenols and related compounds from bracts of hops (*Humulus lupulus* L.). *J Agric Food Chem*, *62*(10), 2198-2206. https://doi.org/10.1021/jf405544n EDN: https://elibrary.ru/SSVWBJ
32. Treutter, D. (2010). Managing Phenol Contents in Crop Plants by Phytochemical Farming and Breeding-Visions and Constraints. *International Journal of Molecular Sciences*, (11), 807-857. https://doi.org/10.3390/ijms11030807 EDN: https://elibrary.ru/MZMCTJ
33. Abrama, V. & Cehb, B. & Vidmara, M. & Hercezia, M. & Lazića, N. & Bucika, V. & Možinaa, S. S. & Koširb, I. J. & Lea Demšara, M. K. & Ulriha, N. P. (2015). A comparison of antioxidant and antimicrobial activity between hop leaves and hop cones. *Industrial Crops and Products*, *64*, 124-134.
34. Wang, M. & Zheng, Q. & Shen, Q. & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, *14*(4), 7370-7390. https://doi.org/10.3390/ijms14047370
35. Zanoli, P. & Zavatti, M. (2008). Pharmacognostic and pharmacological profile of *Humulus lupulus* L. *J. Ethnopharmacol.*, *116*, 383-396. https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.01.011 EDN: https://elibrary.ru/PRUNSW

References

1. Almugraby, E. (2021). Phytochemical composition and antioxidant status of Brassica oleraceae L. under the action of natural and synthetic plant growth regulators (Doctoral dissertation). Kazan, 170 p.
2. Kireeva, T. B., & Kitova, E. A. (2006). Ecological ontogenetic features of tannin accumulation in the grass of common oregano under the conditions of Udmurtia. *Biology*, *(10)*, 85-96.
3. Malankina, E. L. Medicinal use of hops. Retrieved from https://www.greeninfo.ru/lianes/humulus_lupulus.html/Article/_/aID/5359
4. Sazhina, N. N., & Misin, V. M. (2011). Measurement of total phenolic compounds content in different parts of medicinal plants. *Chemistry of Plant Raw Materials*, *(3)*, 149-152. EDN: https://elibrary.ru/OHSURD
5. Shafikova, S. F. (2013). Pharmacognostic study of common hop leaves (Humulus lupulus L.) (Doctoral dissertation). Samara, 181 p. EDN: https://elibrary.ru/YGMBGB
6. Astray, G. & Gullón, P. & Gullón, B. & Munekata, P. E. & Lorenzo, J. M. (2020). Humulus lupulus L. as a natural source of functional biomolecules. *Appl. Sci.*, *10*, 5074. https://doi.org/10.3390/app10155074 EDN: https://elibrary.ru/HVXHXH
7. Colville, L. & Smirnoff, N. (2008). Antioxidant status, peroxidase activity, and PR protein transcript levels in ascorbate-deficient *Arabidopsis thaliana* vtc mutants. *Journal of Experimental Botany*, *59*(14), 3857-3868. https://www.jstor.org/stable/24037641
8. Carbone, K. & Gervasi, F. (2022). An Updated Review of the Genus Humulus: A Valuable Source of Bioactive Compounds for Health and Disease Prevention. *Plants*, (11), 3434. https://doi.org/10.3390/plants11243434 EDN: https://elibrary.ru/UHHOVD
9. Dedei, A. J. (2021). Assessment of mineral nutrient impact on metabolites accumulation in kale (*Brassica oleracea* var. sabellica). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *13*(3), 208-224. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-3-208-224 EDN: https://elibrary.ru/GFXXKY
10. Faivre, C. & Ghedira, K. & Goetz, P. et al. (2007). Humulus lupulus L. *Phytothérapie*, *5*(2), 86-89. https://doi.org/10.1007/s10298-007-0217-7
11. Farag, M. A. & Porzel, A. & Schmidt, J. et al. (2011). Metabolite profiling and fingerprinting of commercial cultivars of *Humulus lupulus* L. (hop): a comparison of MS and NMR methods in metabolomics. *Metabolomics*, *8*(3), 492-507. https://doi.org/10.1007/s11306-011-0335-y EDN: https://elibrary.ru/IDBQZY
12. Finkelstein, R. R. & Gampala, S. S. L. & Rock, C. (2002). Abscisic Acid Signalling in Seeds and Seedlings. *The Plant Cell*, *18*, 15-45. https://doi.org/10.1105/tpc.010441

13. Gao, H. & Zhang, Z. & Lv, X. & Cheng, N. & Peng, B. & Cao, W. (2016). Effect of 24-epibrassinolide on chilling injury of peach fruit in relation to phenolic and proline metabolisms. *Postharvest Biology and Technology*, *111*, 390-397.
14. Kopsell, D. A. & Lefsrud, M. G. & Kopsell, D. E. & Curran Celentano, J. (2005). Air temperature affects biomass and carotenoid pigment accumulation in kale and spinach grown in a controlled environment. *Hortscience*, *40*(7), 2026-2030. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.7.2026 EDN: https://elibrary.ru/MFRVSL
15. Bocquet, L. & Sahpaz, S. & Hilbert, J. L. & Rambaud, C. (2018). *Humulus lupulus* L., a very popular beer ingredient and medicinal plant: overview of its phytochemistry, its bioactivity, and its biotechnology. *Phytochem Rev*, (17), 1047-1090. https://doi.org/10.1007/s11101-018-9584-y EDN: https://elibrary.ru/KKXZIB
16. Lyu, J. I. & Ryu, J. & Seo, K. S. & Kang, K. Y. & Park, S. H. & Ha, T. H. & Ahn, J. W. & Kang, S. Y. (2022). Comparative Study on Phenolic Compounds and Antioxidant Activities of Hop (*Humulus lupulus* L.) Strobile Extracts. *Plants*, (11), 135. https://doi.org/10.3390/plants11010135 EDN: https://elibrary.ru/CWQHXA
17. Maša, K. & Eva, Š. & Iztok, J. K. & Željko, K. & Urban, B. (2019). Hop Compounds: Extraction Techniques, Chemical Analyses, Antioxidative, Antimicrobial, and Anticarcinogenic Effects. *Nutrients*, (11), 257. https://doi.org/10.3390/nu11020257
18. Muzykiewicz, A. & Nowak, A. & Zielonka-Brzezicka, J. & Florkowska, K. & Duchnik, W. & Klimowicz, A. (2019). Comparison of antioxidant activity of extracts of hop leaves harvested in different years. *Herba Pol*, *65*, 1-9. https://doi.org/10.2478/hepo-2019-0013
19. Mozafar, A. (2008). Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants. *Plant Nutrition*, *16*(12), 2479-2506. https://doi.org/10.1080/01904169309364698
20. Nionelli, L. & Pontonio, E. & Gobbetti, M. & Rizzello, C. G. (2018). Use of hop extract as antifungal ingredient for bread making and selection of autochthonous resistant starters for sourdough fermentation. *Int. J. Food Microbiol*, *266*, 173-172. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.12.002
21. Okafor, V. N. & Anyalebechi, R. I. & Okafor, U. W. & Okonkwo, C. P. & Obiefuna, J. N. et al. (2020). Phytochemical Constituents of Extracts of Hops and Some Potential Nigerian Hop Substitutes: A Comparative Study in Beer Brewing. *Int J Biol Chem Res*, *11*(1), 1-7. https://www.researchgate.net/publication/350005833
22. Al Hussein, D. & Almugrabi, E. & Mostyakova, A. & Timofeeva, A. (2023). Phytochemical composition of *Humulus Lupulus* L. in ontogeny under different treatments. *E3S Web of Conferences*, *381*, 01022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338101022 EDN: https://elibrary.ru/KDHRXU
23. Quifer-Rada, P. & Vallverdú-Queralt, A. & Martínez-Huélamo, M. & Chiva-Blanch, G. & Jáuregui, O. & Estruch, R. & Lamuela-Raventós, R. (2015). A comprehensive characterisation of beer polyphenols by high resolution mass

spectrometry (LC-ESI-LTQ-Orbitrap-MS). *Food Chem*, *169*, 336-343. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.154

24. Rodolfi, M. & Barbanti, L. & Giordano, C. & Rinaldi, M. & Fabbri, A. & Pretti, L. & Casolari, R. & Beghé, D. & Petruccelli, R. & Ganino, T. (2021). The Effect of Different Organic Foliar Fertilization on Physiological and Chemical Characters in Hop (*Humulus lupulus* L., cv Cascade) Leaves and Cones. *Appl. Sci.*, (11), 6778. https://doi.org/10.3390/app11156778 EDN: https://elibrary.ru/NIVHWI
25. Stanius, Ž. & Dūdenas, M. & Kaškonienė, V. & Stankevičius, M. M. & Skrzydlewska, E. & Drevinskas, T. & Ragažinskienė, O. & Obelevičius, K. & Maruška, A. (2022). Analysis of the Leaves and Cones of Lithuanian Hops (*Humulus lupulus* L.) Varieties by Chromatographic and Spectrophotometric Methods. *Molecules*, *27*, 2705. https://doi.org/10.3390/molecules27092705 EDN: https://elibrary.ru/CMGBSD
26. Schmidt, S. & Zietz, M. & Schreiner, M. & Rohn, S. & Kroh, L. & Krumbein, A. (2010). Genotypic and climatic influences on the concentration and composition of flavonoids in Kale (*Brassica oleracea* var. sabellica). *Food Chemistry*, *119*, 1293-1299. https://doi.org/10.1021/jf9033909 EDN: https://elibrary.ru/NAZVGT
27. Wei, S. & Sun, T. & Du, J. & Zhang, B. & Xiang, D. & Li, W. (2018). Xanthohumol, a prenylated flavonoid from Hops, exerts anticancer effects against gastric cancer in vitro. *Oncol. Rep.*, *40*, 3213-3222. https://doi.org/10.3892/or.2018.6723
28. Shui, Y. C. & Feng, X. & Yan, W. (2009). Advances in the study of flavonoids in Gingko biloba leaves. *Medicinal Plant Research*, *3*, 1248-1252. http://www.academicjournals.org/JMPR
29. Scheible, W. & Morcuende, R. & Czechowski, T. & Fritz, C. & Osuna, D. & Palacios-Rojas, N. & Schindelasch, D. & Thimm, O. & Udvardi, M. K. & Stitt, M. (2004). Genome-Wide Reprogramming of Primary and Secondary Metabolism, Protein Synthesis, Cellular growth processes, and the regulatory infrastructure of Arabidopsis in response to nitrogen. *Plant Physiology*, *136*, 2483-2499. https://doi.org/10.1104/pp.104.047019
30. Taylor, A. W. & Barofsky, E. & Kennedy, J. A. & Deinzer, M. L. (2003). Hop (*Humulus lupulus* L.) proanthocyanidins characterized by mass spectrometry, acid catalysis, and gel permeation chromatography. *J. Agric Food Chem*, *51*, 4101-4110. https://doi.org/10.1021/jf0340409
31. Tanaka, Y. & Yanagida, A. & Komeya, S. et al. (2014). Comprehensive separation and structural analyses of polyphenols and related compounds from bracts of hops (*Humulus lupulus* L.). *J Agric Food Chem*, *62*(10), 2198-2206. https://doi.org/10.1021/jf405544n EDN: https://elibrary.ru/SSVWBJ

32. Treutter, D. (2010). Managing Phenol Contents in Crop Plants by Phytochemical Farming and Breeding-Visions and Constraints. *International Journal of Molecular Sciences*, (11), 807-857. https://doi.org/10.3390/ijms11030807 EDN: https://elibrary.ru/MZMCTJ
33. Abrama, V. & Cehb, B. & Vidmara, M. & Hercezia, M. & Lazića, N. & Bucika, V. & Možinaa, S. S. & Koširb, I. J. & Lea Demšara, M. K. & Ulriha, N. P. (2015). A comparison of antioxidant and antimicrobial activity between hop leaves and hop cones. *Industrial Crops and Products*, *64*, 124-134.
34. Wang, M. & Zheng, Q. & Shen, Q. & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, *14*(4), 7370-7390. https://doi.org/10.3390/ijms14047370
35. Zanoli, P. & Zavatti, M. (2008). Pharmacognostic and pharmacological profile of *Humulus lupulus* L. *J. Ethnopharmacol.*, *116*, 383-396. https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.01.011 EDN: https://elibrary.ru/PRUNSW

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Аль Хуссейн Далаль, аспирант, кафедра ботаники и физиологии растений, институт фундаментальной медицины и биологии; ассистент, факультет сельского хозяйства
Казанский федеральный университет; Университет Аль-Фурат
ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация; Дейр-эз-Зор, Сирийская Арабская Республика
dalal.matar91@gmail.com

Алмуграби Есраа, старший преподаватель кафедры ботаники и физиологии растений, институт фундаментальной медицины и биологии
Казанский федеральный университет
ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
esraaalmgrabe@gmail.com

Мостякова Антонина Анатольевна, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, институт фундаментальной медицины и биологии
Казанский федеральный университет
ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
runga540@mail.ru

Тимофеева Ольга Арнольдовна, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой ботаники и физиологии растений, институт фундаментальной медицины и биологии

Казанский федеральный университет
ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
otimofeeva2008@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dalal Al Hussein, PhD Student, Department of Botany, Plant Physiology and Biochemistry Institute of Fundamental Medicine and Biology; Assistant, Faculty of Agriculture
Kazan Federal University; Al-Furat University
18, Kremlyovskaya Str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russian Federation; Deir -ez-Zor, Syrian Arab Republic
dalal.matar91@gmail.com

Esraa Almugrabi, Senior Instructor, Department of Botany and Plant Physiology, Institute of Fundamental Medicine and Biology
Kazan Federal University
18, Kremlyovskaya Str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russian Federation
esraaalmgrabe@gmail.com

Antonina A. Mostyakova, Associate Professor, Department of Botany and Plant Physiology, Institute of Fundamental Medicine and Biology
Kazan Federal University
18, Kremlyovskaya Str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russian Federation
runga540@mail.ru

Olga A. Timofeeva, Dr. of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Botany, Plant Physiology and Biochemistry, Institute of Fundamental Medicine and Biology
Kazan Federal University
18, Kremlyovskaya Str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420008, Russian Federation
otimofeeva2008@mail.ru

Поступила 16.05.2024 Received 16.05.2024
После рецензирования 14.09.2024 Revised 14.09.2024
Принята 29.11.2024 Accepted 29.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1115 **EDN: WKRCPL**
УДК 631.52

CC BY NC ND

Научная статья

ГЕНОТИПИРОВАНИЕ *GLEDITSIA TRIACANTHOS* L. ПО ЭКСПРЕССИИ ГЕНА RBCL И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ISSR-МАРКЕРОВ В УСЛОВИЯХ АРИДНОГО КЛИМАТА

П.А. Крылов, П.А. Кузьмин

Аннотация

Обоснование. Борьба с опустыниванием является одним из приоритетов в мире. *Gleditsia triacanthos* L. является перспективным видом для защитного лесоразведения так как обладает высокой засухоустойчивостью. Генотипирование *G. Triacanthos* на основе изучения фотосинтетической продуктивности путем оценки экспрессии гена большой субъединицы гена RuBisCo – *RbcL* и привязки к ISSR ранее не проводилось.

Цель. Провести генотипирование особей популяции *G. Triacanthos* по оценке количественной экспрессии большой субъединицы гена RuBisCo – *RbcL* и их привязки к ISSR-маркерам.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе питомника древесных растений ФНЦ агроэкологии РАН, где были отобраны 10 особей *G. triacanthos* с хорошим жизненным состоянием. Оценка экспрессии *RbcL* проводилась с помощью метода ОТ-ПЦР-РВ. Для изучения генетической структуры исследуемых особей *G. Triacanthos* использовался ISSR-анализ. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью пакета прикладных программ Statistica 12.0 (StatSoft, USA) и POPGENE версии 1.31.

Результаты. По результатам оценки экспрессии *RbcL* были выявлены особи с различной транскрипционной активности, а именно 20% особей *G. Triacanthos* имели высокую экспрессию, 40% умеренную и 40% низкую. В ходе проведения ISSR-анализа были выявлены эффективные праймеры из группы UBC: 836 и 873 у особей *G. Triacanthos*. Генотипирование по ISSR позволило выявить две группы особей *G. Triacanthos* с высокой и низкой экспрессией *RbcL*.

Заключение. Полученные данные могут быть в перспективе использованы в молекулярной селекции *G. Triacanthos* для получения не только устойчивых

к засухе, но и с высокой фотосинтетической продуктивностью для решения задач агролесомелиорации.

Ключевые слова: фотосинтетическая продуктивность; экспрессия генов; *RbcL*; ISSR; *Gleditsia triacanthos* L.; аридные территории

Для цитирования. Крылов, П. А., & Кузьмин, П. А. (2025). Генотипирование *Gleditsia triacanthos* L. по экспрессии гена *RbcL* и с использованием ISSR-маркеров в условиях аридного климата. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 82-97. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1115

Original article

GENOTYPING OF *GLEDITSIA TRIACANTHOS* L. BASED ON RBCL GENE EXPRESSION AND USING ISSR MARKERS IN ARID CLIMATE CONDITIONS

P.A. Krylov, P.A. Kuzmin

Abstract

Background. Fighting against desertification is one of the priorities in the world. *Gleditsia triacanthos* L. is a promising species for afforestation as it has high drought resistance. Genotyping of *G. triacanthos* has not been previously conducted based on the study of photosynthetic productivity by evaluating the expression of the large subunit gene of RuBisCo - *RbcL* and linking it to ISSR markers.

Purpose. To conduct the genotyping of individuals in the *G. triacanthos* population by evaluation the quantitative expression of the large subunit gene of RuBisCo - *RbcL* and their linkage to ISSR markers.

Materials and methods. The study was carried out at the arboretum of the FSC of agroecology RAS, where 10 individuals of *G. triacanthos* in good vital state were selected. The expression of *RbcL* was evaluated using RT-PCR. ISSR analysis was performed to examine the genetic structure of the studied *G. triacanthos* individuals. Statistical analysis of experimental data was performed using the software package Statistica 12.0 (StatSoft, USA) and POPGENE version 1.31.

Results. Based on the results of the *RbcL* expression evaluation, individuals with different transcriptional activity were identified: 20% of G. *triacanthos* individuals had high expression, 40% had moderate expression, and 40% had low expression. Effective primers from the UBC group, 836 and 873, were identified during ISSR analysis in *G. triacanthos* individuals. Genotyping by ISSR revealed two groups of *G. triacanthos* individuals with high and low *RbcL* expression.

Conclusion. The acquired data can potentially be used in molecular breeding of *G. Triacanthos* to obtain not only drought-resistant genotypes, but also genotypes with high photosynthetic productivity to address agroforestry tasks.

Keywords: Photosynthetic productivity; gene expression; *RbcL*; ISSR; *Gleditsia triacanthos* L.; arid areas

For citation. Krylov, P. A., & Kuzmin, P. A. (2025). Genotyping of *Gleditsia triacanthos* L. based on *RbcL* gene expression and using ISSR markers in arid climate conditions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 82-97. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1115

Введение

Борьба с деградацией территорий Юга России, в частности опустынивания, является одной из приоритетных задач агролесомелиорации [4; 9]. К самому распространённому и экономически выгодному способу борьбы, из уже существующих, можно отнести создание новых лесозащитных полос. Видовой состав лесозащитных полос может быть очень разнообразным, например, в Волгоградской области с характерным аридным климатом, который включает в себя представителей родов дуб, тополь, ясень, сосна и другие виды древесно-кустарниковых растений [3]. Несмотря на большое число аборигенных видов древесных растений под действием неблагоприятных факторов внешней среды, таких как опустынивание, происходит снижение биологического разнообразия [6].

Для поддержания биологического разнообразия используется интродукция видов древесных растений, обладающих высокой продуктивностью или теми или иными хозяйственно-ценными признаками [13]. Одним из перспективных интродуцированных видов древесных растений является *Gleditsia triacanthos* L. (Гледичия трехколючковая), которая используется в агролесомелиорации [1; 7].

Продуктивность древесных растений зависит от функционирования фотосинтетического аппарата [19]. На молекулярно-генетическом уровне хлоропластный ген фермента рибулозо-1,5-бисфосфаткарбоксилазы/ оксигеназы (RuBisCo) отвечает за продуктивность путем участия в регуляции цикла Кальвина и фотодыхания у всех растений, за счет преобразования CO_2 в углеводы [14; 19; 22].

Важным фактором является установление взаимосвязи(-ей) какого-либо признака, в данном исследовании – экспрессии большой субъединицы гена RuBisCo – RbcL, с тем или иным маркером. Особенностью

маркер-опосредованного анализа является возможность его проведения на любой стадии онтогенеза древесного растения. Существует широкое разнообразие неспецифических и специфических молекулярно-генетические маркеры, так как: ISSR [9], RAPD [12], и другие [15; 21]. С учетом отсутствия аннотированного генома *G. triacanthos*, несмотря на наличие черновых секвенированных фрагментов, эффективным является использование ISSR-маркеров, так как они являются неспецифическими маркерами мультилокусного типа и обладают более высокой информативностью и часто используются с целью генотипирования [8, 11, 17].

Цель исследования

Провести генотипирование особей популяции *G. Triacanthos* по оценке количественной экспрессии большой субъединицы гена RuBisCo – *RbcL* и их привязки к ISSR-маркерам.

Материалы и методы исследования

Растительный материал. Исследование проводилось на базе кластерных дендрологических коллекций (кадастр №34:34:000000:122 – питомник древесных растений ФНЦ агроэкологии РАН). Семенная популяции *G. triacanthos* включала 10 взрослых особей на данном участке. Все особи имели хорошее жизненное состояние. Отбор образцов листовой пластинки для изучения экспрессии большой субъединицы гена RuBisCo (*RbcL*) и ISSR-маркеров проводился 18 июля 2023 года с каждой отдельной особи и помещались в фиксирующий раствор IntactRNA (cat: #BC031, Евроген, Россия), после чего транспортировались в лабораторию и хранились при -80°C в течение суток.

Выделение ДНК и РНК. Геномная ДНК экстрагировалась из 50 мг листвой пластинки с использованием модифицированного метода CTAB с добавлением 0,2% β-меркаптоэтанола [18]. Выделение РНК из листовой пластинки осуществлялось согласно протоколу из коммерческого набора HiPure Plant RNA Mini Kit (Magen, Китай) из 100 мг растительной ткани без использования жидкого азота. Концентрацию и качество (A260/A280) ДНК и РНК в образцах оценивали с помощью флуориметра Qubit 4.0. (Thermo Fisher Scientific Inc., США) и спектрофотометр SpectrostarNano (BMG Labtech, Германия) соответственно.

Оценка количественной экспрессии с помощью ОТ-ПЦР-РВ и скрининг праймеров ISSR. Для оценки экспрессии *RbcL* и выявления ISSR были использованы праймеры, синтезированные ЗАО Evrogen, Россия (табл. 1)

Таблица 1.

Наименование и последовательность ISSR праймеров

Наименование	Последовательность	Tm, °C
RbcL	F: CTTGAATGCTACTGCAGGTA R: ATCCCGGCAATAATGAGC	55.1 54.8
EF1alpha	F: AACGGTGATGCTGGTATG R: CTCCTTCTTCTCTACATTCTTG	60,2 58,8
	Последовательность ′5–3′	
UBC807	AGAGAGAGAGAG AGAGT	50.0
UBC808	AGAGAGAGAGAGAGAGC	50.6
UBC811	GAGAGAGAGAGAGAGAC	54.2
UBC823	TCTCTCTCTCTCTCTCC	50.7
UBC826	ACACACACACACACACC	54.7
UBC834	AGAGAGAGAGAGAGAGY	51.5
UBC835	AGAGAGAGAGAGAGAGYC	54.0
UBC836	AGAGAGAGAGAGAGAGYA	51.5
UBC840	GAGAGAGAGAGAGAGAYT	51.5
UBC841	GAGAGAGAGAGAGAGAYC	54.0
UBC873	GACAGACAGACAGACA	50.0
UBC890	VHVGTGTGTGTGTGTGT	50.0

Количественную ОТ-ПЦР-РВ и ISSR-ПЦР проводили на амплификаторе Applied Biosystems QuantStudio 5 (Thermo Fisher Scientific, США) с использованием коммерческого набора 50X SYBR Green I для ОТ-ПЦР-РВ (cat: #PB025S, Евроген, Россия) и qPCRmix-HS (cat: #PK145L, Евроген, Россия) соответственно, согласно инструкциями производителя в трех технических проворностях.

Количественную оценку экспрессии *RbcL* оценивали в программе QuantStudio Design and Analysis Software v1.5.1 (Thermo Fisher Scientific Inc., США) на основе построения стандартной кривой и метода $2^{-\Delta\Delta Ct}$ [23] с нормализацией по экспрессии гена «домашнего хозяйства» *EF1 alpha* в каждом образце. Для избежания недостоверных результатов количественной ПЦР, были поставлены отрицательные контроли без добавления ревертазы. Программа амплификации включала: стадию обратной транскрипции при 55ºС в течение 15 мин, инактивация ревертазы при 95ºС в течение 1 мин, затем 40 циклов по 20 с при 95ºС, 30 с при 56ºС и 1 мин при 72ºС. Кроме того, стадия кривой плавления была использована для проверки специфичности праймеров.

Программа амплификации для выявления ISSR-маркеров включала: начальную денатурацию при 95°С в течение 10 мин с последующим про-

ведением 40 циклов, 95°C в течение 30 с, температура отжига для различных праймеров при 55°C в течение 30 с и окончательное удлинение при 72°C в течение 4 мин.

Гель-электрофорез. Визуализация результатов ПЦР проводилось путем разделения ПЦР-продуктов в 2% агарозном геле. Размер полос ДНК на геле рассчитывали с использованием ДНК-маркера длиной более 100 п.н. (cat: #NL002, Евроген, Россия). Для окрашивания агарозного геля использовали бромид этидия (Хеликон, Россия). Визуализацию результатов проводили с использованием гель-документирующей системы iBright CL750 Imaging Systems (Thermo Fisher Scientific, США). Частота полиморфизмов и количество полос, продуцируемых каждым праймером, были рассчитаны индивидуально.

Анализ данных. Локусы ISSR оценивались как присутствующие «1» или отсутствующие «0», каждый из которых рассматривался как независимый. Данные были собраны в двоичную матрицу данных 0/1 с использованием MS Excel. Сгенерированные двоичные данные были использованы для расчета характеристик связывания праймера с использованием POPGENE версии 1.31 [Louati, M. 2019].

Количественные данные обрабатывались с помощью программы Statistica 12.0 (StatSoft Inc., USA), где рассчитывались медиана [1-й квартиль, 3-й квартиль]. Для выявления статистически значимой связи между экспрессией *RbcL* и исследуемыми локусами был использован точный критерий Фишера для непараметрической выборки при достоверности $p<0.05$.

Результаты исследования

По результатам выделения ДНК из всех образцов были получены концентрации от 33.2 до 48.6 нг/мкл с высокими значениями A260/A280. Наилучшее качество, выше 1.8 по соотношению A260/A280, выделенной РНК было обнаружено в пробах с концентрацией выше 15 нг/мкл. Перед постановкой обычной ПЦР и ОТ-ПЦР-РВ все образцы, концентрация которых была свыше 10 нг/мкл, разбавили до этого значения стерильной дистиллированной водой свободной от ДНКаз и РНКаз. Дополнительно для исследования количественной экспрессии *RbcL*, к исследуемым образцам была взята общая проба для построения стандартной кривой. Стандартная кривая содержала 7 разведений и выполнялась в трех технических проворностях, эффективность ПЦР, которой составила 95.09%.

По результатам амплификации была рассчитана количественная экспрессия *RbcL* в листьях исследуемых особей *G. triacanthos*, произрастающих в засушливых условиях (Рис. 1).

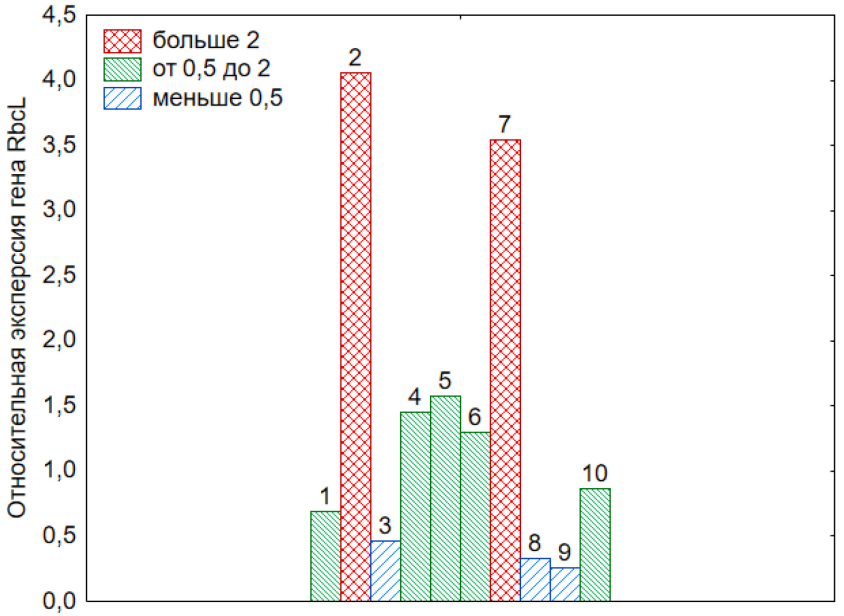


Рис. 1. Относительная экспрессия генов *RbcL* у особей *G. triacanthos*.

Данные, полученные с помощью ОТ-ПЦР-РВ позволили определить две особи *G. triacanthos*, чья относительная экспрессия *RbcL* имела наивысшие значения. При этом стоит отметить, что наработка продукта начиналась на 14 цикле у этих двух особей. У трех особей (3, 8, 9) *G. triacanthos* экспрессия гена составила менее 0,5, что в 7-8 раз меньше по сравнению со 2 и 7 особью (пороговый цикл амплификации 16-17). У остальных пяти особей *G. triacanthos* относительная экспрессия *RbcL* была в диапазоне от 0,5 до 2, что среднем в 2 раза меньше, чем у 2 и 7 особи.

Для выявления внутривидового генетического разнообразия *G. Triacanthos*. и связи с экспрессией *RbcL* было протестировано 18 ISSR-праймеров. В результате проведенного тестирования было отобрано 12 ISSR-праймеров отличающиеся высокой эффективностью амплификации большего количества фрагментов геномной ДНК. Остальные 6 праймеров не аплифицировались с образцами выделенной геномной ДНК, поэтому были исключены из дальнейших исследований. В результате были получены генетические спектры всех десяти особей *G. Triacanthos* (прил. 2). На основе полученных спектров ампликонов у исследуемых

особей *G. Triacanthos*, было выявлено низкое внутрипопуляционное генетическое разнообразие, которое характеризовалось следующими показателями: общие число аллей (na) – 1.81±0.39, эффективное число аллелей (ne) – 1.46±0.36, генетическое расстояние по Нею (h) – 0.27±0.18 и индекс Шенона (I) – 0.41±0.25, что говорит о близкородственности деревьев в популяции. Расчет процента полиморфных локусов составил 81.2%.

В результате сопоставления ISSR-локусов исследуемых особей с экспрессией *RbcL* было обнаружено 2 группы по локусам UBC 836, представленных на рисунке (Рис. 2).

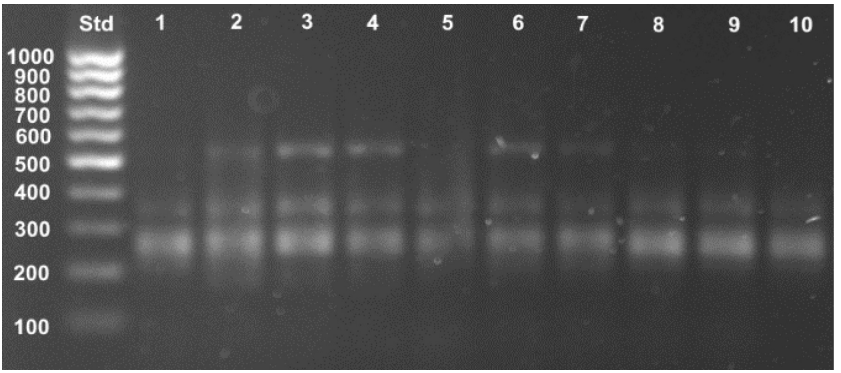


Рис. 2. Электрофореграмма ампликонов с UBC 836.

Первая группа с условно высокой экспрессией *RbcL* имела размеры локусов UBC 836 250, 350 и 500 п.н. (особи 2, 3, 4, 6, 7), несмотря на наличие третьей особи у которой наблюдалась низкая транскрипционная активность исследуемого гена. Вторая группа, включающая оставшиеся особи с умеренной и низкой экспрессией *RbcL* с размерами локусов UBC 836 250 и 350 п.н.

Частота встречаемости локуса UBC 836 составила 1.00 (250), 0.77 (350), и 0.70 (500) у особей в исследуемой популяции *G. Triacanthos*. По ISSR-праймеру UBC 873 исследуемые особи *G. Triacanthos* также разделились на две группы с высокой и умеренной экспрессией *RbcL*. У первой группы (особи 2, 5, 6, 7), с высокой экспрессией *RbcL* отсутствовали локусы по данному ISSR-праймеру, в то время как во второй группе с умеренной и низкой экспрессией *RbcL* были выявлены следующие локусы в различных комбинациях (прил. 2): 400 (0.05), 450 (0.11), 500 (0.05), 600 (0.22), 800 (0.22), 900 (0.36). По результатам анализа связи с помощью

точного критерия Фишера между экспрессией *RbcL* у разных особей *G. Triacanthos* сгруппированных по локусам по UBC 836 и UBC 873 была показана достоверность 0.004 и 0.0048 соответственно. Это может служить обоснованием использования данных маркеров для выявления высокопродуктивных особей для селекции.

Таким образом, из 18 протестированных ISSR-праймеров, двенадцать являются эффективными для анализа полиморфизма *G. Triacanthos*. Сравнительный анализ генетических структур по полилокусным спектрам продуктов амплификации исследуемых маркеров позволил определить в геноме определенные микросателлитные повторы.

Обсуждение

Полученные результаты показали, что фотосинтетическая продуктивность может очень сильно варьировать между особями в одной популяции [19]. Важным аспектом фотосинтетической продуктивности является комплекс условий произрастания *G. Triacanthos*, которые характеризуются оптимальным сочетанием факторов среды обитания, влияющих на ее жизнедеятельность. Исследуемая популяция *G. Triacanthos* произрастает в условиях засухи, при дефиците влаги в почве, что может оказывать негативное влияние на их водный режим и продуктивность. Также немаловажным является тот факт, что фермент RuBisCo на биохимическом уровне зависит от гидротермического режима, а именно при высокой температуре воздуха, данный фермент может менять свою специфичность связывания O_2 и CO_2 [16].

С целью выявления перспективных особей в популяциях опираются на различные маркеры, среди которых наиболее точными является ДНК-маркеры, связанные с хозяйственно-ценными признаками. При изучении *G. Triacanthos* на геномным уровне в полной мере не представляется возможным так как ядерный и хлоропластный геномы не секвенированы [2]. В связи с этим нам пришлось сделать акцент на использовании неспецифических ДНК-маркеров, а именно ISSR. Комплекс используемых ISSR-маркеров позволил выявить два ISSR-праймера (UBC 836 и 873), которые были информативны в данной популяции и позволили выделить две группы по интенсивности экспрессии *RbcL* среди особей *G. Triacanthos* в данной популяции. Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей селекционно-семеноводческой работы, которая позволить создать более продуктивные формы данного вида для условий почвенной и воздушной засухи [5], способных депонировать больший объем диоксида углерода.

Заключение

Исследование показало, что фотосинтетическая продуктивность особей *G. Triacanthos* внутри одной популяции может значительно различаться, при том, что они произрастают в одинаковых неблагоприятных условиях. По оценке экспрессии большой субъединицы гена RuBisCo было выявлено 2 особи *G. Triacanthos* обладающие высокой экспрессией *RbcL*, 4 особи умеренной и 4 оставшиеся с низкой. Использование ISSR-маркеров позволило выявить различия в локусах UBC 836 и 873 у исследуемых деревьев. Генотипирование с помощью ISSR-маркеров показало возможную связь наличия уникальных комбинаций локусов и степенью экспрессии *RbcL*. В итоге особи *G. Triacanthos* были разделены на две группы с высокой и низкой экспрессией *RbcL*. Полученные результаты исследования могут быть использованы для дальнейшей селекции *G. Triacanthos* обладающих устойчивостью к засухе и высокой фотосинтетической продуктивностью.

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

Информация о спонсорстве. Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FNFE-2022-0022 «Поиск и управление паттернами экспрессии генов лесных и культурных растений, отвечающих за адаптацию к неблагоприятным факторам внешней среды и продуктивность» и № FNFE-2022-0009 «Поиск селекционно-ценного генетического материала для создания новых генотипов древесно-кустарниковых пород методами молекулярной селекции».

Список литературы

1. Балакина, А. А., Нефедьева, Е. Э., & Ларикова, Ю. С. (2021). Исследование строения и состава семенной оболочки гледичии и некоторых изменений в ее структуре при набухании. *Аграрный вестник Урала*, *206*(3), 46-52. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-206-03-46-52 EDN: https://elibrary.ru/BTTYJU
2. Беляев, А. И., Крылов, П. А., Пугачева, А. М., & Деревщикова, Л. В. (2023). Анализ наличия геномов древесно-кустарниковых растений, используемых в агролесомелиорации южных регионов России. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, *70*(2), 30-42. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-02-03 EDN: https://elibrary.ru/TTKJCA
3. Крючков, С. Н., Солонкин, А. В., & Соломенцева, А. С. (2024). Интенсивные приемы выращивания посадочного материала мелкосемянных дре-

весных видов в условиях полупустыни. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *16*(1), 144-163. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-702 EDN: https://elibrary.ru/VWPTXX

4. Кулик, К. Н. (2022). Современное состояние защитных лесонасаждений в Российской Федерации и их роль в смягчении последствий засух и опустынивания земель. *Научно-агрономический журнал*, *188*(3), 8-13. https://doi.org/10.34736/FNC.2022.118.3.001.08-13 EDN: https://elibrary.ru/LWWQFG
5. Кулик, К. Н., Беляев, А. И., & Пугачёва, А. М. (2023). Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов. *Аридные экосистемы*, *94*(1), 4-14. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-4-14 EDN: https://elibrary.ru/CSZXWA
6. Мартынюк, А. А., Турчин, Т. Я., Чеплянский, И. Я., & Кулик, А. К. (2023). Современное состояние государственных защитных лесных полос степной и полупустынной зон, основные направления их сохранения и реабилитации. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, *69*(1), 78-81. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-01-07 EDN: https://elibrary.ru/TLKSNA
7. Мельник, К. А., & Хужахметова, А. Ш. (2022). Особенности плодоношения интродуцированных представителей родового комплекса Gleditsia в возрастном аспекте. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, *68*(4), 184-193. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-04-21 EDN: https://elibrary.ru/YWSHZO
8. Якушина, Л. Г., & Шхалахова, Р. М. (2021). Эффективность SSR- и ISSR-маркеров для оценки генетического полиморфизма сортов и гибридов хризантемы садовой (Chrysanthemum × hortorum Bailey). *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, *20-1*, 520-525. https://doi.org/10.14258/pbssm.2021105
9. Abd-Dada, H., Bouda, S., Khachtib, Y., Bella, Y. A., & Haddioui, A. (2023). Use of ISSR markers to assess the genetic diversity of an endemic plant of Morocco (Euphorbia resinifera O. Berg). *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, *21*(1), 91. https://doi.org/10.1186/s43141-023-00543-4 EDN: https://elibrary.ru/FWMQAY
10. Andablo-Reyes, A. D. C., Moreno-Calles, A. I., Cancio-Coyac, B. A., Gutiérrez-Coatecatl, E., Rivero-Romero, A. D., et al. (2023). Agri-silvicultures of Mexican Arid America. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, *19*(1), 39. https://doi.org/10.1186/s13002-023-00612-5 EDN: https://elibrary.ru/YEMDHA
11. Dorogina, O. V., Nuzhdina, N. S., Zueva, G. A., Gismatulina, Y. A., & Vasilyeva, O. Y. (2022). Specific shoot formation in Miscanthus sacchariflorus (Po-

aceae) under different environmental factors and DNA passportization using ISSR markers. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii*, *26*(1), 22-29. https://doi.org/10.18699/VJGB-22-04 EDN: https://elibrary.ru/AAYMFL

12. Kader, A., Sinha, S. N., & Ghosh, P. (2022). Clonal fidelity investigation of micropropagated hardened plants of jackfruit tree (Artocarpus heterophyllus L.) with RAPD markers. *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, *20*(1), 145. https://doi.org/10.1186/s43141-022-00426-0 EDN: https://elibrary.ru/EJPWVA
13. Kalmykova, E., & Lazarev, S. (2023). Increasing the biodiversity of the dendroflora of sparsely wooded regions by adapted representatives of the genus Robinia L. *Agriculture*, *13*(3), 695. https://doi.org/10.3390/agriculture13030695 EDN: https://elibrary.ru/FVQNPY
14. Martin-Avila, E., Lim, Y. L., Birch, R., Dirk, L. M. A., Buck, S., Rhodes, T., et al. (2020). Modifying plant photosynthesis and growth via simultaneous chloroplast transformation of rubisco large and small subunits. *The Plant Cell*, *32*(9), 2898-2916. https://doi.org/10.1105/tpc.20.00288 EDN: https://elibrary.ru/FJTOLD
15. Müller, M., Kües, U., Budde, K. B., & Gailing, O. (2023). Applying molecular and genetic methods to trees and their fungal communities. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *107*(9), 2783-2830. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12480-w EDN: https://elibrary.ru/VEICHK
16. Sharwood, R. E., Ghannoum, O., Kapralov, M. V., Gunn, L. H., & Whitney, S. M. (2016). Temperature responses of Rubisco from Paniceae grasses provide opportunities for improving C3 photosynthesis. *Nature Plants*, *2*, 16186. https://doi.org/10.1038/nplants.2016.186 EDN: https://elibrary.ru/WVMHWA
17. Sheikina, O. V., & Romanov, E. M. (2024). Variability of Scots pine (Pinus sylvestris L.) plus trees in the Middle and Upper Volga Region with the use of ISSR markers. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii*, *28*(2), 148-154. https://doi.org/10.18699/vjgb-24-17 EDN: https://elibrary.ru/TVPFSO
18. Shestibratov, K. A., Baranov, O. Y., Mescherova, E. N., Kiryanov, P. S., Panteleev, S. V., Mozharovskaya, L. V., et al. (2021). Structure and phylogeny of the curly birch chloroplast genome. *Frontiers in Genetics*, *12*, 625764. https://doi.org/10.3389/fgene.2021.625764 EDN: https://elibrary.ru/SLSAEC
19. Tao, Y., Chiu, L.-W., Hoyle, J. W., Dewhirst, R. A., Richey, C., Rasmussen, K., et al. (2023). Enhanced photosynthetic efficiency for increased carbon assimilation and woody biomass production in engineered hybrid poplar. *Forests*, *14*(4), 827. https://doi.org/10.3390/f14040827 EDN: https://elibrary.ru/WVJMEF
20. Xiao, F., Zhao, Y., Wang, X., & Jian, X. (2023). Full-length transcriptome characterization and comparative analysis of Gleditsia sinensis. *BMC Genomics*,

24(1), 757. https://doi.org/10.1186/s12864-023-09843-y EDN: https://elibrary.ru/FLFRPG

21. Zhao, Z., Zhang, H., Wang, P., Yang, Y., Sun, H., et al. (2023). Development of SSR molecular markers and genetic diversity analysis of Clematis acerifolia from Taihang Mountains. *PLOS ONE*, *18*(5), e0285754. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285754 EDN: https://elibrary.ru/EOIASA
22. Zoschke, R., & Bock, R. (2018). Chloroplast translation: structural and functional organization, operational control, and regulation. *Plant Cell*, *30*(4), 745-770. https://doi.org/10.1105/tpc.18.00016 EDN: https://elibrary.ru/YIIWHJ

References

1. Balakina, A. A., Nefedieva, E. E., & Larikova, Yu. S. (2021). Study of the structure and composition of the seed coat of Gleditsia and some changes in its structure during swelling. *Agrarian Bulletin of the Urals*, *206(3)*, 46-52. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-206-03-46-52 EDN: https://elibrary.ru/BTTYJU
2. Belyaev, A. I., Krylov, P. A., Pugacheva, A. M., & Derevshchikova, L. V. (2023). Analysis of the presence of genomes of woody shrub plants used in agroforestry of the southern regions of Russia. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo Agrouniversitetskogo Kompleksa: Nauka i Vysshee Professionalnoe Obrazovanie*, *70(2)*, 30-42. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-02-03 EDN: https://elibrary.ru/TTKJCA
3. Kryuchkov, S. N., Solonkin, A. V., & Solomentseva, A. S. (2024). Intensive methods for growing seedlings of small-seeded woody species in semi-desert conditions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *16(1)*, 144-163. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-702 EDN: https://elibrary.ru/VWPTXX
4. Kulik, K. N. (2022). Current state of protective plantations in the Russian Federation and their role in mitigating the consequences of droughts and desertification of lands. *Scientific and Agricultural Journal*, *188(3)*, 8-13. https://doi.org/10.34736/FNC.2022.118.3.001.08-13 EDN: https://elibrary.ru/LWWQFG
5. Kulik, K. N., Belyaev, A. I., & Pugacheva, A. M. (2023). The role of protective afforestation in combating drought and desertification of agricultural landscapes. *Arid Ecosystems*, *94(1)*, 4-14. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-4-14 EDN: https://elibrary.ru/CSZXWA
6. Martynyuk, A. A., Turchin, T. Ya., Cheplyansky, I. Ya., & Kulik, A. K. (2023). Current state of state protective forest belts of the steppe and semi-desert zones, main directions of their preservation and rehabilitation. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo Agrouniversitetskogo Kompleksa: Nauka i Vysshee Professionalnoe Obrazovanie*, *69(1)*, 78-81. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-01-07 EDN: https://elibrary.ru/TLKSNA

7. Melnik, K. A., & Khuzakhmetova, A. Sh. (2022). Features of fruiting of introduced representatives of the Gleditsia genus complex in terms of age. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo Agrouniversitetskogo Kompleksa: Nauka i Vysshee Professionalnoe Obrazovanie*, *68(4)*, 184-193. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-04-21 EDN: https://elibrary.ru/YWSHZO
8. Yakushina, L. G., & Shkhalakhova, R. M. (2021). Efficiency of SSR and ISSR markers for assessing genetic polymorphism of varieties and hybrids of garden chrysanthemum (Chrysanthemum × hortorum Bailey). *Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia*, *20-1*, 520-525. https://doi.org/10.14258/pbssm.2021105
9. Abd-Dada, H., Bouda, S., Khachtib, Y., Bella, Y. A., & Haddioui, A. (2023). Use of ISSR markers to assess the genetic diversity of an endemic plant of Morocco (Euphorbia resinifera O. Berg). *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, *21*(1), 91. https://doi.org/10.1186/s43141-023-00543-4 EDN: https://elibrary.ru/FWMQAY
10. Andablo-Reyes, A. D. C., Moreno-Calles, A. I., Cancio-Coyac, B. A., Gutiérrez-Coatecatl, E., Rivero-Romero, A. D., et al. (2023). Agri-silvicultures of Mexican Arid America. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, *19*(1), 39. https://doi.org/10.1186/s13002-023-00612-5 EDN: https://elibrary.ru/YEMDHA
11. Dorogina, O. V., Nuzhdina, N. S., Zueva, G. A., Gismatulina, Y. A., & Vasilyeva, O. Y. (2022). Specific shoot formation in Miscanthus sacchariflorus (Poaceae) under different environmental factors and DNA passportization using ISSR markers. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii*, *26*(1), 22-29. https://doi.org/10.18699/VJGB-22-04 EDN: https://elibrary.ru/AAYMFL
12. Kader, A., Sinha, S. N., & Ghosh, P. (2022). Clonal fidelity investigation of micropropagated hardened plants of jackfruit tree (Artocarpus heterophyllus L.) with RAPD markers. *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, *20*(1), 145. https://doi.org/10.1186/s43141-022-00426-0 EDN: https://elibrary.ru/EJPWVA
13. Kalmykova, E., & Lazarev, S. (2023). Increasing the biodiversity of the dendroflora of sparsely wooded regions by adapted representatives of the genus Robinia L. *Agriculture*, *13*(3), 695. https://doi.org/10.3390/agriculture13030695 EDN: https://elibrary.ru/FVQNPY
14. Martin-Avila, E., Lim, Y. L., Birch, R., Dirk, L. M. A., Buck, S., Rhodes, T., et al. (2020). Modifying plant photosynthesis and growth via simultaneous chloroplast transformation of rubisco large and small subunits. *The Plant Cell*, *32*(9), 2898-2916. https://doi.org/10.1105/tpc.20.00288 EDN: https://elibrary.ru/FJTOLD
15. Müller, M., Kües, U., Budde, K. B., & Gailing, O. (2023). Applying molecular and genetic methods to trees and their fungal communities. *Applied Microbi-*

ology and Biotechnology, *107*(9), 2783-2830. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12480-w EDN: https://elibrary.ru/VEICHK
16. Sharwood, R. E., Ghannoum, O., Kapralov, M. V., Gunn, L. H., & Whitney, S. M. (2016). Temperature responses of Rubisco from Paniceae grasses provide opportunities for improving C3 photosynthesis. *Nature Plants*, *2*, 16186. https://doi.org/10.1038/nplants.2016.186 EDN: https://elibrary.ru/WVMHWA
17. Sheikina, O. V., & Romanov, E. M. (2024). Variability of Scots pine (Pinus sylvestris L.) plus trees in the Middle and Upper Volga Region with the use of ISSR markers. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii*, *28*(2), 148-154. https://doi.org/10.18699/vjgb-24-17 EDN: https://elibrary.ru/TVPFSO
18. Shestibratov, K. A., Baranov, O. Y., Mescherova, E. N., Kiryanov, P. S., Panteleev, S. V., Mozharovskaya, L. V., et al. (2021). Structure and phylogeny of the curly birch chloroplast genome. *Frontiers in Genetics*, *12*, 625764. https://doi.org/10.3389/fgene.2021.625764 EDN: https://elibrary.ru/SLSAEC
19. Tao, Y., Chiu, L.-W., Hoyle, J. W., Dewhirst, R. A., Richey, C., Rasmussen, K., et al. (2023). Enhanced photosynthetic efficiency for increased carbon assimilation and woody biomass production in engineered hybrid poplar. *Forests*, *14*(4), 827. https://doi.org/10.3390/f14040827 EDN: https://elibrary.ru/WVJMEF
20. Xiao, F., Zhao, Y., Wang, X., & Jian, X. (2023). Full-length transcriptome characterization and comparative analysis of Gleditsia sinensis. *BMC Genomics*, *24*(1), 757. https://doi.org/10.1186/s12864-023-09843-y EDN: https://elibrary.ru/FLFRPG
21. Zhao, Z., Zhang, H., Wang, P., Yang, Y., Sun, H., et al. (2023). Development of SSR molecular markers and genetic diversity analysis of Clematis acerifolia from Taihang Mountains. *PLOS ONE*, *18*(5), e0285754. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285754 EDN: https://elibrary.ru/EOIASA
22. Zoschke, R., & Bock, R. (2018). Chloroplast translation: structural and functional organization, operational control, and regulation. *Plant Cell*, *30*(4), 745-770. https://doi.org/10.1105/tpc.18.00016 EDN: https://elibrary.ru/YIIWHJ

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Крылов Павел Андреевич, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геномных и постгеномных технологий

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
krylov-p@vfanc.ru

Кузьмин Петр Анатольевич, канд. с.-х. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией молекулярной селекции
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
kuzmin-p@vfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Krylov, Cand. Sc. (Biology), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
krylov-p@vfanc.ru
SPIN-code: 9652-7459
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9587-5886
ResearcherID: V-6884-2017
Scopus Author ID: 57213164834

Petr A. Kuzmin, Cand. Sc. (Agriculture), Docent, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Molecular Breeding
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
kuzmin-p@vfanc.ru
SPIN-code: 7551-8803
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1303-765X
ResearcherID: N-4277-2016
Scopus Author ID: 56192995500

Поступила 25.07.2024 Received 25.07.2024
После рецензирования 03.09.2024 Revised 03.09.2024
Принята 01.10.2024 Accepted 01.10.2024

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1109 **EDN: WVFHBJ**
УДК 502.51:556.535.8(571.1)

Научная статья

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ РЕКИ ИРТЫШ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ В ГРАНИЦАХ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.Н. Жаркова, О.П. Баженова, А.С. Болтовская

Аннотация

Обоснование. Актуальность работы обусловлена необходимостью проведения мониторинга качества вод подверженной интенсивному антропогенному воздействию трансграничной реки Иртыш и выявлению закономерностей изменений концентраций тяжелых металлов ($Fe_{общ.}$, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}) в период открытой воды в границах Омской области. Новизна исследований обусловлена отсутствием актуальных данных по содержанию тяжелых металлов в воде р. Иртыш на территории Омской области.

Цель. Оценить уровень содержания тяжелых металлов в воде реки Иртыш и установить их динамику в период открытой воды в границах Омской области.

Материалы и методы. В статье использованы материалы гидрохимического анализа реки Иртыш на территории Омской области в период открытой воды (май–октябрь) 2023 г. Отбор проб воды осуществляли один раз в месяц из поверхностного слоя (0–0,2 м) пробоотборником в 15 пунктах по течению реки. Гидрохимический анализ осуществляли в аккредитованной лаборатории ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Сибирскому федеральному

округу» (г. Омск) по 6 показателям: $Fe_{общ.}$, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}. Концентрации $Fe_{общ.}$, Zn, Cu, Mn, определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, Hg – атомно-эмиссионным методом.

Результаты. Установлено превышение среднемесячных значений предельно допустимых концентраций для вод рыбохозяйственного назначения по ряду показателей: $Fe_{общ.}$ – в 1,4-5,3 раза, Zn^{2+} – в 1,1-7,6 раз, Cu^{2+} – в 2,0-5,0 раз, Mn^{2+} – в 1,2-1,9 раз. Среднемесячные концентрации Hg^{2+} не превышали нормативных значений. Показатели содержания $Fe_{общ.}$, Cu^{2+} и Mn^{2+} зависели от сезона года – максимальные значения отмечались в весеннее половодье, а в период летне-осенней межени снижались. Для Zn^{2+} четких закономерностей в изменении содержания в природных водах по сезонам года не выявлено.

Заключение. Динамика содержания тяжелых металлов ($Fe_{общ.}$, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}) в воде р. Иртыш в период открытой воды 2023 г. в границах Омской области определяется взаимодействием антропогенных и природных факторов. Концентрации указанных ионов тяжелых металлов, кроме ртути, по всему течению реки в границах Омской области превышают $ПДК_{р.х.}$. Качество воды не соответствует гигиеническим нормативам.

Ключевые слова: поверхностные воды; тяжелые металлы; река; Иртыш; Омская область

Для цитирования. Жаркова, Н. Н., Баженова, О. П., & Болтовская, А. С. (2025). Динамика содержания тяжелых металлов в воде реки Иртыш в период открытой воды в границах Омской области. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 98-123. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1109

Original article

DYNAMICS OF HEAVY METALS CONTENT IN THE IRTYSH RIVER WATER DURING THE OPEN WATER PERIOD WITHIN THE BOUNDARIES OF OMSK REGION

N.N. Zharkova, O.P. Bazhenova, A.S. Boltovskaya

Abstract

Background. The relevance of the work is due to the need to monitor the water quality of the trans-boundary Irtysh River subjected to intensive anthropogenic impact and to identify patterns of changes in the concentrations of heavy metals (Fe_{total},

Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}) during the open water period within the boundaries of the Omsk region. The novelty of the research is due to the lack of current data on the content of heavy metals in the Irtysh River water in the Omsk region.

Purpose. To estimate the level of heavy metals content in the Irtysh River water and to establish their dynamics during the period of open water within the boundaries of the Omsk region.

Materials and methods. Materials of hydrochemical analysis of the Irtysh River in the territory of Omsk region in the period of open water (May-October) 2023 were used in the article. Sampling was carried out once a month from the surface water layer (0-0.2 m) by sampler in 15 points along the river. A total of 90 water samples were collected and analyzed during the study period. Hydrochemical analysis was carried out in the accredited laboratory of FGBU "Center for Laboratory Analysis and Technical Measurements in the Siberian Federal District" (Omsk) for 6 indicators: Fe_{total}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}. Concentrations of Fe_{total}, Zn, Cu, Mn were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, Hg – by atomic emission method.

Results. The average monthly values of maximum permissible concentrations for fishery waters were found to be exceeded for a number of indicators: Fe – 1.4-5.3 times, Zn – 1.1-7.6 times, Cu – 2.0-5.0 times, Mn – 1.2-1.9 times. Average monthly concentrations of mercury did not exceed the normative values. Concentrations of Fe, Cu and Mn depended on the season of the year - maximum values were observed in spring floods. During the summer-autumn low water period the concentrations of these elements decreased. For Zn ions no clear patterns in the change of content in natural waters by seasons of the year were revealed.

Conclusion. Dynamics of heavy metal content (Fe_{total}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}) in the Irtysh River water during the period of open water in 2023 within the boundaries of the Omsk region is determined by the interaction of anthropogenic and natural factors. Concentrations of the mentioned heavy metal ions, except for mercury, along the whole course of the river within the boundaries of the Omsk region exceed MPC_{fish}. Water quality does not meet hygienic standards.

Keywords: surface water; heavy metals; river; Irtysh; Omsk Region

For citation. Zharkova, N. N., Bazhenova, O. P., & Boltovskaya, A. S. (2025). Dynamics of heavy metals content in the Irtysh River water during the open water period within the boundaries of Omsk Region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 98-123. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1109

Введение

Трансграничная река Иртыш является самым крупным левым притоком Оби с площадью бассейна 1643 тыс. км^2, протекающий по тер-

ритории трех государств: Китайской Народной Республики (КНР), Республики Казахстан (РК) и Российской Федерации (РФ). Наибольшую протяженность Иртыш имеет на территории России – 2048 км, в КНР длина реки составляет 618 км, в РК – 1614 км [6]. Водные ресурсы Иртыша интенсивно используются для обеспечения потребностей в питьевом, промышленном и сельскохозяйственном водоснабжении растущего населения трех государств.

Экосистема Иртыша подвержена высокому уровню антропогенного воздействия, что обусловлено рядом причин. Прежде всего, это зарегулирование верхнего течения реки каскадом глубоководных водохранилищ, расположенных на территории Казахстана – Бухтарминским, Усть-Каменогорским и Шульбинским [6]. В бассейне реки расположены крупные промышленные комплексы Казахстана и России, сточные воды которых в итоге поступают в Иртыш, поэтому для вод реки и его притоков на территории России характерна высокая загрязненность соединениями тяжелых металлов [14].

Водосборная площадь бассейна Иртыша в пределах РК подвержена значительному техногенному загрязнению тяжелых металлов, их средняя многолетняя концентрация превышает фоновое значение в десятки и сотни раз [23]. Кроме этого, бассейн Иртыша издавна является территорией интенсивного земледелия, огромное влияние на экосистему реки оказывают стоки с сельскохозяйственных угодий, животноводческих комплексов, продукты эрозии почв и неочищенные сточные воды населенных пунктов [6, 28].

В 2022 г. Иртыш был включен в единый федеральный проект по экологическому оздоровлению крупных рек России, начало которого планируется в 2025 г. [30]. В настоящее время, в целях повышения эффективности проводимых надзорных мероприятий в области использования и охраны водных объектов, а также предупреждения и пресечения правонарушений в области охраны окружающей среды, Федеральной службой по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) организована работа по предварительной оценке экологического состояния пяти крупных рек и их водоохранных зон в Российской Федерации, в т. ч. реки Иртыш [15].

Российский участок Иртыша расположен последним по течению реки и охватывает его среднее и нижнее течение, именно здесь наиболее полно проявляются все антропогенные воздействия, оказываемые на экосистему трансграничной реки [7]. Первый субъект РФ, на территорию которого

поступают воды Иртыша – Омская область, полностью расположенная в бассейне среднего течения реки.

Тяжелыми металлами (ТМ) принято считать элементы с атомной массой больше 50. Данные элементы обладают высокой токсичностью для многих живых организмов и являются опасными загрязнителями водной среды, так как не подвергаются биодеградации и могут накапливаться в донных отложениях и гидробионтах [32, с. 48]. Определение содержания ТМ в водных объектах включают в программы экологического мониторинга, так как от концентрации этих элементов зависит качество воды.

На сегодняшний день загрязнение речных систем ТМ стало особой проблемой, так как их соединения в поверхностных водах способны сохраняться долгое время даже после устранения источника загрязнения. ТМ не подвергаются естественному разложению и способны накапливаться в различных компонентах окружающей среды, в том числе и в живых организмах. Поэтому наряду с определением концентраций ТМ важное значение имеет изучение закономерностей их распределения в основные фазы водного режима на отдельных участках речных систем [3, с. 121; 39].

В связи с вышесказанным, исследование качества вод Иртыша на территории Омской области имеет ключевое значение в оценке экологического состояния реки в целом.

Цель исследования – оценить уровень содержания тяжелых металлов (Zn, Cu, Mn, Fe, Hg) в воде реки Иртыш установить их динамику в период открытой воды в границах Омской области**.**

Материалы и методы исследования

В статье использованы материалы гидрохимического анализа реки Иртыш на территории Омской области в период открытой воды (май–октябрь) 2023 г. Пункты отбора проб были расположены в наиболее подверженных загрязнению участках, а также вблизи крупных объектов, расположенных на территории Омской области, и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (табл. 1).

Отбор проб проводили один раз в месяц из поверхностного слоя воды (0–0,2 м) пробоотборником ПЦР-2,0 НС в 15 пунктах по течению реки, согласно требованиям ГОСТ 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб». Отбор проб осуществлялся лично одним из соавторов. Общее количество проб воды – 90 (рис. 1).

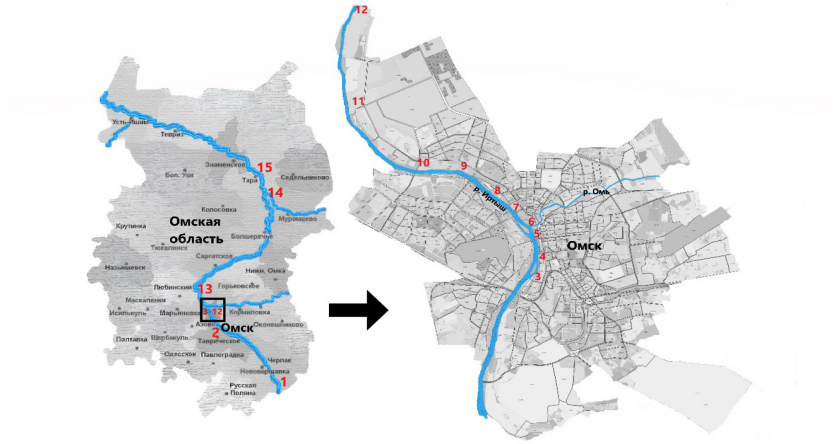
Таблица 1.

Координаты пунктов отбора проб воды реки Иртыш в границах Омской области, 2023 г. [15]

№	Пункты отбора	Географические координаты
1	д. Ольховка, Черлакский район (граница с Республикой Казахстан)	N 53.88875° E 75.04651°
2	Выше пос. Ачаир, Омский район	N 54.58524° E 74.01983°
3	В створе ул. Рождественского, г. Омск	N 54.94709° E 73.37420°
4	В створе ул. Циолковского, г. Омск	N 54.96608° E 73.37640°
5	Ниже Ленинградского моста, г. Омск	N 54.97685° E 73.37216°
6	Ниже устья р. Оми, г. Омск	N 54.98396° E 73.36089°
7	Выше моста им. 60-летия Победы, г. Омск	N 54.98861° E 73.34826°
8	Затон вблизи пос. Рыбачий, г. Омск	N 55.00179° E 73.32338°
9	Ниже моста им. 60-летия ВЛКСМ, г. Омск	N 55.01679° E 73.29318°
10	В створе дома 27/2 по ул. Пригородная, г. Омск	N 55.02123° E 73.25544°
11	Ниже пос. Николаевка, г. Омск	N 55.07213° E 73.15096°
12	Ниже Красногорского гидроузла, г. Омск	N 55.09603° E 73.14217°
13	Ниже с. Красноярка, Омский район	N 55.34974° E 73.17397°
14	Ниже устья р. Тары, Тарский район	N 56.69556° E 74.60164°
15	Ниже г. Тары	N 56.93456° E 74.35900°

Гидрохимический анализ осуществляли в аккредитованной лаборатории ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Сибирскому федеральному округу» (г. Омск) по 5 показателям: $Fe_{общ.}$, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}. Концентрации $Fe_{общ.}$, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+} определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ПНД

Ф14.1:2:4.135-98), Hg^{2+} – атомно-эмиссионным методом с применением спектрометров серии ICAP 6000 D (ФР.1.31.2013.15940, НЦВ – 002-2012).



Примечание: номера пунктов отбора проб те же, что в табл. 1.
Рис. 1. Схема отбора проб воды реки Иртыш в границах Омской области [15]

Оценку качества воды проводили на основании Приказа Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [15].

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием Microsoft Excel 2013. Рассчитывали среднее арифметическое, стандартное отклонение, ошибку средней и коэффициент корреляции (по Пирсону). Приведенные в работе средние значения и коэффициенты парной корреляции (r) значимы на уровне $p \leq 0,05$. Интерпретация и анализ данных проведены лично авторами статьи.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время во всем мире уделяется особое внимание исследованию содержания Fe в природных водах. По мнению Kritzberg E.S. и др. (2012), Пузанова А.В. и др. (2023), это связано с тем, что на значительной части Северного полушария отмечается явление «браунификации» или побурение внутренних вод, что является следствием поступления в них избыточного количества терригенного гумуса, смываемого с водосборного

бассейна, и увеличения количества растворенного органического вещества в водах. Браунификация также может быть вызвана поступлением в воду соединений Fe, влияющих на изменение цвета воды [26, с. 150; 41, с. 1465]. Присутствие соединений Fe в природных водах объясняется его широким распространением в земной коре – кларк Fe составляет 3,6 %, что соответствует четвертому месту среди других элементов [12].

Железо является важным биогенным элементом для многих гидробионтов. Повышенные концентрации Fe в природных водах ухудшают показатели качества воды, а недостаточное его содержание – снижается биопродуктивность водных объектов [35].

Одним из источников поступления соединений железа в поверхностные воды являются процессы химического выветривания горных пород [38]. Значительное количество ионов Fe поступает в водоемы с подземными стоками, промышленными и сельскохозяйственными сточными водами [43]. В природных водах соединения Fe образуют сложные комплексы с минеральными и органическими веществами [38].

Таблица 2.

Концентрация тяжелых металлов в воде р. Иртыш в границах Омской области, 2023 г.

Месяц	Среднемесячная концентрация, мг/дм^3				
	$Fe_{общ}$	Zn^{2+}	Cu^{2+}	Mn^{2+}	Hg^{2+}
Май	0,14–0,78 / **0,53 ± 0,04**	0,005–0,02 / 0,009 ± 0,001	0,003–0,007 / **0,005 ± 0,0004**	0,009–0,034 / **0,017 ± 0,002**	< 0,00001
Июнь	0,06–0,66 / **0,35 ± 0,05**	0,001–0,05 / **0,011 ± 0,003**	0,003–0,008 / **0,005 ± 0,0004**	0,005–0,024 / **0,012 ± 0,002**	< 0,00001
Июль	0,06–0,42 / **0,14 ± 0,02**	0,005–0,02 / 0,006 ± 0,001	0,002–0,008 / **0,004 ± 0,0004**	0,003–0,018 / 0,006 ± 0,001	< 0,00001
Август	0,05–0,34 / 0,09 ± 0,02	0,005–0,06 / 0,009 ± 0,003	0,002–0,004 / **0,003 ± 0,0002**	0,002–0,018 / 0,006 ± 0,001	< 0,00001
Сентябрь	0,05–0,34 / **0,14 ± 0,03**	0,05–0,11 / **0,076 ± 0,004**	0,001–0,004 / **0,002 ± 0,0002**	0,003–0,012 / 0,007 ± 0,001	< 0,00001
Октябрь	0,05–0,39 / **0,17 ± 0,02**	0,005–0,005 / 0,005 ± 0	0,002–0,004 / **0,003 ± 0,0002**	0,001–0,068 / **0,019 ± 0,004**	< 0,00001
$ПДК_{р.х}$	0,1	0,01	0,001	0,01	0,0005

Примечание: в числителе приведены минимальные и максимальные значения показателей; в знаменателе – среднее ± ошибка средней; жирным шрифтом выделены превышения нормативного показателя.

В воде Иртыша были зафиксированы широкие диапазоны значений концентрации $Fe_{общ.}$ (0,09–0,53 мг/дм^3), выходящие за пределы нормативных показателей в течение всего времени исследований, за исключением августа (табл. 2).

Среднемесячные концентрации $Fe_{общ.}$ в воде Иртыша были почти в 8 раз выше его кларка в речных водах (0,067 мг/дм^3) [12]. В водах реки Оби, куда впадает Иртыш, содержание железа постепенно возрастает от верхнего до нижнего течения. Эйрих А.Н. и др. (2022) в своих исследованиях установили, что в верхнем течении Оби в районе г. Барнаула средняя концентрация Fe составляла 0,064 мг/дм^3, что практически сопоставимо с его кларком в речных водах [37]. В то же время по данным Робертус Ю.В. и др. (2018) в притоках Верхней Оби (Катунь, Майма, Каяс, Улала) в районе г. Горно-Алтайска наблюдались аномально высокие превышения (более 10 кларков) концентрации Fe – от 0,16 до 0,66 мг/дм^3 [29]. В нижнем течении Оби, после впадения в нее реки Иртыш, в границах Сургутского и Нефтеюганского районов во всех пробах были превышены нормативы ПДК по Fe, в среднем концентрация железа здесь составляла 1,3 мг/дм^3 [34].

В водах верхнего течения р. Енисей (ниже Красноярского водохранилища), по данным Бадмаевой С.Э., Соколова Ю.А. (2017), в 2014–2015 гг. концентрация Fe составляла 0,113–0,117 мг/дм^3, что превышает кларк железа почти в 2 раза и незначительно ПДК [5].

В наших исследованиях наибольшие среднемесячные концентрации $Fe_{общ.}$ в Иртыше отмечались в весенний период (табл. 2). Это связано с тем, что в период весеннего половодья в речную систему поступают поверхностно-склоновые воды, содержащие в значительном количестве гуминовые вещества и железо-органические комплексы, обеспечивающие максимальные концентрации $Fe_{общ.}$. Относительно низкий уровень развития фитопланктона в это время [6] обусловливает незначительное поглощение железа водорослями, способствуя высокому его содержанию в воде. В летне-осенний период (июль–октябрь) концентрации $Fe_{общ.}$ в воде снизились в 3–6 раз, что вызвано, в основном, наступлением летне-осенней межени и интенсивным развитием фитопланктона до эвтрофного уровня [7].

Превышение $ПДК_{р.х.}$ $Fe_{общ.}$ в значительных пределах было зарегистрировано по всему исследованному течению реки во все сезоны года. Наибольшее превышение ПДК характерно для периода весеннего половодья (май, 1,4–7,8 ПДК), постепенно пределы превышения ПДК снижаются (июнь 1,6–6,6 ПДК, июль 1,1–4,2 ПДК) и достигают минимума осенью в октябре (1,3–3,8 ПДК) (рис. 1).

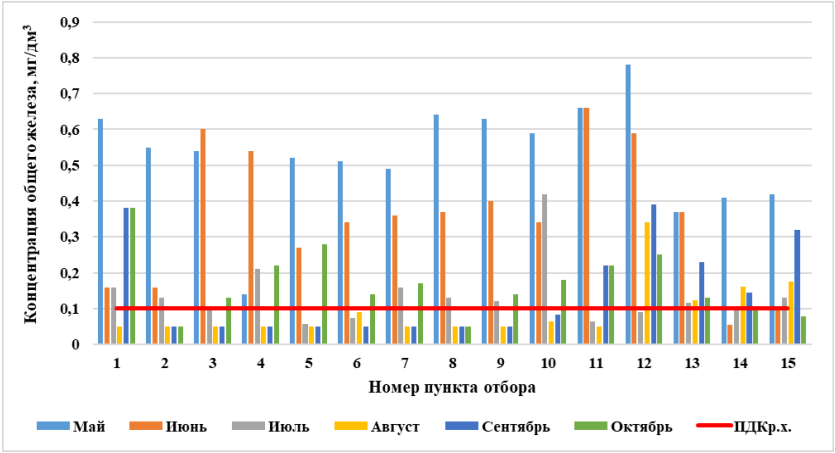


Рис. 1. Динамика среднемесячной концентрации $Fe_{общ.}$ в воде р. Иртыш в границах Омской области, 2023 г.

В 2023 г. в верхнем течении бассейна Иртыша на территории РК также отмечено превышения $ПДК_{р.х.}$ по железу [42]. В нижнем течении Иртыша в границах Тюменской области, куда вода поступает из Омской области, также было установлено превышение установленного $ПДК_{р.х.}$ по железу от 2 до 10 $ПДК_{р.х.}$. Многолетняя динамика (> 10 лет) содержания общего железа в воде Иртыша в границах Тюменской области указывает на увеличение концентрации этого элемента в воде к 2021 г., что связано со снижением уровня воды в реке [20].

Основными источниками соединений Fe в поверхностных водах являются естественные процессы химического выветривания горных пород [34, 38, 40]. Но в большей степени повышенное содержание общего железа в воде Иртыша обусловлено региональными особенностями, связанными с болотным происхождением правых притоков Иртыша на территории региона [10], поскольку болотные и грунтовые кислые воды отличаются высокими концентрациями железа [4]. Кроме того, Fe поступает в речные системы с поверхностно-склоновыми водами, которые еще не проникли в почву, поэтому другим источником этого элемента в поверхностных водах, по мнению Даценко Ю.С. (2018), следует считать разложение лиственного опада на территории водосбора [11].

Цинк, как и многие тяжелые металлы, попадает в речные системы в результате процессов разрушения и растворения горных пород и минералов с

его высоким содержанием, а также со сточными водами химических предприятий, с цинкосодержащими минеральными удобрениями и др. [38].

Среднемесячные концентрации Zn^{2+} в воде Иртыша во время исследований варьировали в широких пределах. Максимальное превышение ПДК$_{р.х.}$ по цинку в 5,3–10,8 раз наблюдалось в сентябре во всех точках отбора. В это время максимальная концентрация Zn^{2+} была зарегистрирована на границе с Республикой Казахстан и ниже пос. Николаевка, г. Омск – 0,101 мг/дм^3 и 0,108 мг/дм^3 соответственно, что превышало ПДК$_{р.х.}$ в 10,1–10,8 раз. Единичные случаи превышения ПДК$_{Zn}$ были отмечены в июне на границе с Республикой Казахстан, выше п. Ачаир и ниже с. Красноярка, Омский район. В августе превышение ПДК было зафиксировано только в одной точке в черте г. Омска ниже устья р. Оми, в октябре превышений нормативных значений по Zn не было (рис. 2).

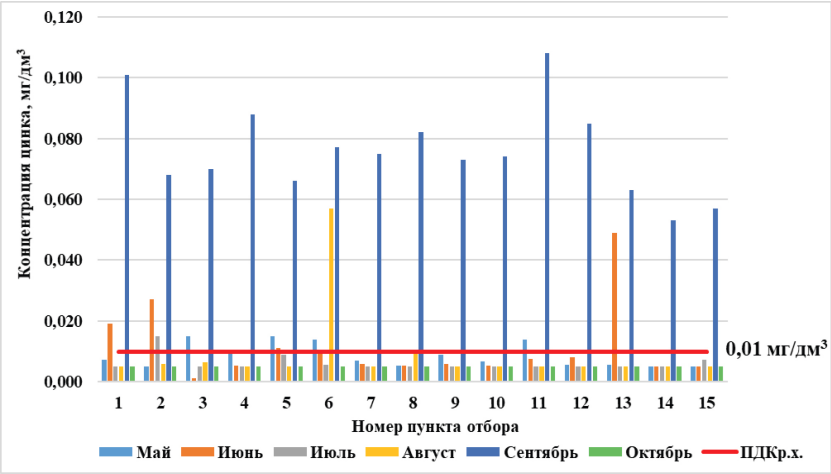


Рис. 2. Динамика среднемесячной концентрации цинка в воде р. Иртыш в границах Омской области, 2023 г.

По данным Колесникова В.А., Бойченко Н.Б. (2018), Шестеркиной Н.М., Шестеркина В.П. (2022), Эйрих А.Н. и др. (2022) повышенные концентрации ионов Zn^{2+} в речных водах обычно отмечаются в период весеннего половодья [17; 36; 37]. В реке Иртыш этой закономерности не отмечено как на территории Ханты-Мансийского автономного округа [10], так и в наших исследованиях. Установленное нами резкое превышение концентрации Zn^{2+} в сентябре по всему исследованному течению реки,

вероятно, имело антропогенный характер и связано с деятельностью предприятий цветной металлургии на территории Восточного Казахстана. Это косвенно подтверждается установленными в 2023 г. локальными превышениями содержания ионов цинка в воде Иртыша на территории РК [42].

Соединения Cu^{2+} имеют широкое распространение в природных водах. Шестеркина Н.М. и Шестеркин В.П. (2022) отмечают, что данный элемент образует прочные комплексы со многими органическими веществами, при этом их устойчивость намного выше, чем с другими металлами со степенью окисления 2^{+} [36, с. 109].

Соединения Cu в поверхностных водах, как и другие тяжелые металлы, относятся к веществам двойного генезиса, их содержание обусловлено как естественными, так и антропогенными факторами [2]. Основными природными источниками поступления Cu в поверхностные воды являются процессы выветривания горных пород [40], антропогенным источником являются сточные воды предприятий металлургической, химической промышленности, альдегидные реагенты [38].

За исследуемый период наиболее значительный уровень загрязнения вод Иртыша был характерен для ионов меди. Превышения $ПДК_{р.х.}$ по меди от 1,5 до 8 раз регулярно фиксировались во всех точках отбора во все сезоны года (рис. 3).

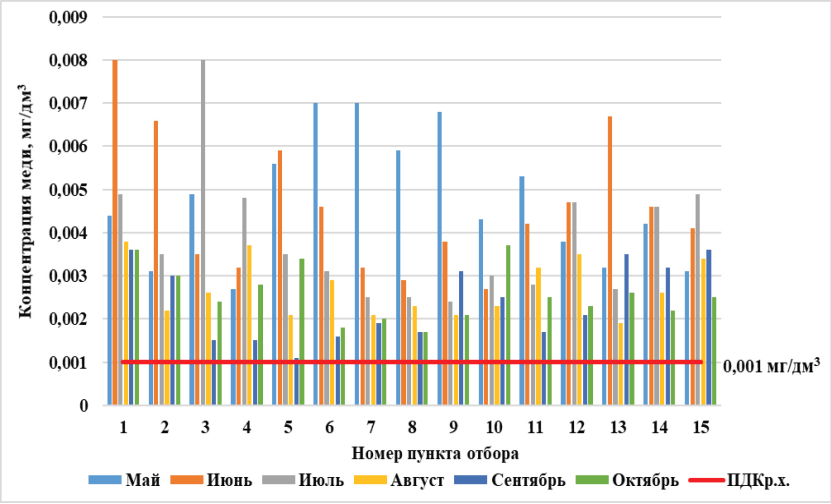


Рис. 3. Динамика среднемесячной концентрации меди в воде р. Иртыш в границах Омской области, 2023 г.

Среднемесячные концентрации Cu^{2+} изменялись в довольно узких пределах – от 0,002 до 0,005 мг/дм^3 (табл. 2). Содержание меди в воде р. Иртыш было подвержено сезонным изменениям. Наибольшие среднемесячные показатели содержания Cu^{2+} в Иртыше были отмечены в период весеннего половодья (0,005 мг/дм^3), в летне-осенний период концентрация меди снижалась, достигая минимума в сентябре-октябре (0,0024–0,0026 мг/дм^3). В.С. Валиев и др. (2018) отмечают, что ТМ, содержащиеся в твердых фракциях, имеют четкую взаимосвязь с содержанием взвешенных веществ и, особенно, с мутностью воды [9, с. 94]. Именно этот показатель оказывает влияние на сезонную динамику содержания взвешенных форм ТМ. В весенне-летний период с увеличением мутности повышается концентрация ТМ, а в зимний и осенний периоды отмечается обратная ситуация [9, с. 95].

Усенова Н.А., Дильмагамбетов С.Н. (2010) повышенное содержание ионов меди в речных системах связывают с ландшафтно-геохимическими особенностями региона, активным выщелачиванием и высокой миграционной подвижностью данного элемента в поверхностных и подземных водах [33, с. 151], а также с наличием антропогенных источников, прежде всего горно-металлургических комбинатов, занимающихся добычей, обогащением и переработкой медной руды на территории Казахстана [42].

Другим важным элементом, повышенное содержание которого в основном связано с ландшафтно-геохимическими факторами, является марганец [20]. Этот элемент имеет высокую подвижность и способен легко переходить в водные объекты [13, с. 70]. Основными источниками поступления Mn^{2+} в водные объекты являются сточные воды металлургических заводов, марганцевых обогатительных фабрик, предприятий химической промышленности и шахтные воды [13, с. 70; 22, с. 177]. Кроме того, марганец поступает в природные водотоки в процессе разложения водных животных и растительных организмов, таких как цианопрокариоты, диатомовые водоросли, высшие водные растения [13, с. 70; 22, с. 177]. Соединения марганца являются одним из основных загрязнителей многих рек Российской Федерации, в том числе и р. Иртыш [8; 13].

Сибиркина А.Р. и др. (2021) отмечают, что концентрация Mn^{2+} в воде Иртыша подвержена сезонным колебаниям. Основными факторами, определяющими изменения его концентрации, являются соотношение между поверхностным и подземным стоком, интенсивность потребления при фотосинтезе, разложение фитопланктона, микроорганизмов и высшей водной растительности, а также процессы осаждения на дно водных объектов [31, с. 28].

Наибольшее содержание марганца в реке Иртыш отмечалось в мае и октябре, максимальные показатели превышали $ПДК_{р.х.}$ в 1,2–6,8 раз (рис. 4).

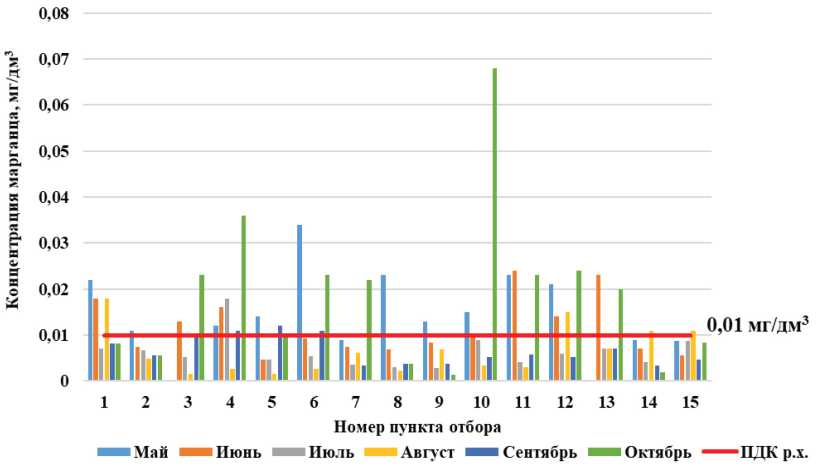


Рис. 4. Динамика среднемесячной концентрации марганца в воде р. Иртыш в границах Омской области, 2023 г.

Резкое повышение концентрации Mn^{2+} (в 3,4 раза) было отмечено в мае в точке «впадение реки Омь в реку Иртыш» и в октябре (в 6,8 раз) в точке «в створе дома 27 к. 2 по улице Пригородная». Единичные случаи превышения ПДК по Mn^{2+} спорадически регистрировались в различных точках отбора.

Сезонная динамика содержания ионов марганца в р. Иртыш имеет следующие закономерности – значительные превышения ПДК в мае и снижение в летне-осенний период до нормативных значений. Аналогичные закономерности были установлены для р. Иртыш ранее [10]. Высокие концентрации марганца в весенний период определяются большим количеством органических веществ, поступающих с территории водосбора в период весенних паводков [18].

Особый интерес представляет исследование содержания ртути в р. Иртыш, что связано с неоднократно зафиксированными в последние годы (2020, 2021, 2024) многократными превышениями содержания этого высокотоксичного ТМ. При этом конкретные источники поступления ртути в реку Иртыш до сих пор не установлены. Никаноров А.М. (2005) изменение содержания ртути в воде связывает с переходом этого металла из донных

отложений в водную среду [21]. Кроме того, им установлена высокая корреляция между содержанием в воде ртути и растворенным органическим веществом [21]. Миграция соединений ртути в водных объектах происходит, главным образом, в растворенной форме, а во взвешенном веществе переносится не более 17% [19]. Многими исследованиями [16; 24; 25] установлено, что максимальный сток ртути приходится на весенний паводок и связан с переносом взвешенного вещества (67–88%), количество и качество которого зависит от гидрологического режима и времени года. Наибольшее содержание Hg^{2+} в речных водах приходится на холодное время года [27].

В 2023 г. содержание Hg^{2+} в воде Иртыша в течение всего периода исследований не превышало $ПДК_{р.х.}$.

Проведенный корреляционный анализ между содержанием в воде Иртыша взвешенных веществ (далее – ВВ) и тяжелых металлов позволил установить связи между наблюдаемыми параметрами. Была отмечена сильная положительная связь между содержанием ВВ и $Fe_{общ.}$ (r = 0,71), ВВ и Mn^{2+} (r = 0,78), $Fe_{общ.}$ и Cu^{2+} (r = 0,87). Средняя положительная связь установлена между содержанием $Fe_{общ.}$ и Mn^{2+} (r = 0,58), ВВ и Cu^{2+} (r = 0,59) (рис. 5).

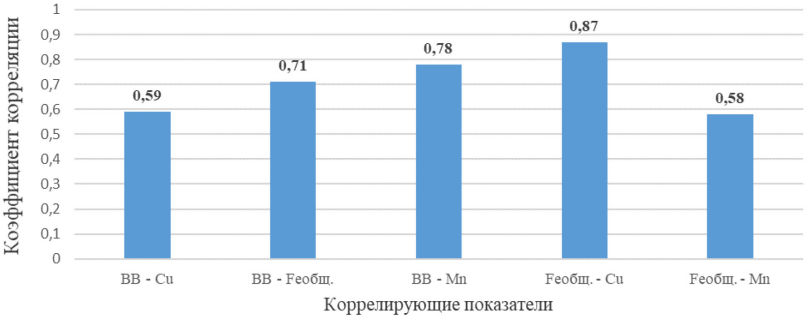


Рис. 5. Коррелирующие взаимосвязи между гидрохимическими показателями качества воды

Некоторые корреляционные связи являются ожидаемыми и хорошо объяснимыми. Например, отмеченная сильная связь между содержанием ВВ и $Fe_{общ.}$, Cu^{2+}, Mn^{2+} обусловлена их содержанием в твердой фракции речной воды. Валиев В.С. и др. (2018) отмечают, что взвешенные вещества как органического, так и минерального происхождения обеспечивают автохтонный и аллохтонный перенос металлов в водных объектах. Именно на их поверхности протекает межсредовой перенос того или иного металла [9, с. 94].

Положительная корреляция между содержанием железа и марганца обусловлена одинаковым геохимическим происхождением этих металлов, связанным с вымыванием их подвижных форм из водосборного бассейна в условиях кислых значений pH склоновых и грунтовых вод [1, с. 22].

Заключение

Динамика содержания тяжелых металлов ($Fe_{общ.}$, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}, Hg^{2+}) в воде р. Иртыш в период открытой воды в границах Омской области определяется взаимодействием антропогенных и природных факторов. В период открытой воды 2023 г. по всему течению реки Иртыш в границах Омской области наблюдалось превышение нормативных показателей по четырем показателям – концентрации железа (1,4–7,8 раз), меди (1,5–8,0 раз), цинка (2,0–10,8 раз), марганца (1,2–6,8 раз). Экстремально высоких превышений $ПДК_{р.х.}$ веществ в воде Иртыша в исследуемый период обнаружено не было. Среднемесячные концентрации ртути не превышали ПДК.

Динамика содержания тяжелых металлов в воде Иртыша имеет определенные закономерности: повышение концентрации ионов $Fe_{общ.}$, Mn^{2+}, Cu^{2+} в период весеннего половодья (май) и снижение в период летне-осенней межени. Характер распределения ионов Zn^{2+} не зависел от сезона года.

Корреляционный анализ показал наличие сильной положительной связи между концентрациями $Fe_{общ.}$ и Cu^{2+} ($r = 0,87$); взвешенных веществ и Mn^{2+} ($r = 0,78$).

Качество воды р. Иртыш в границах Омской области по содержанию тяжелых металлов не соответствует гигиеническим нормативам.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при поддержке гранта АО «Россельхозбанк» (РСХБ-009-40/39-2023).

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Sponsorship information. The study was supported by the grant of JSC «RosSelkhozbank» (RSHB-009-40/39-2023).

Список литературы

1. Арсланова, М. М., & Шорникова, Е. А. (2021). Взаимосвязь гидрохимических показателей и структуры микробного сообщества водотоков территорий нефтедобычи в Ханты-Мансийском автономном округе —

Югре. *Самарский научный вестник*, *10*(1), 20-23. https://doi.org/10.17816/snv2021101102 EDN: https://elibrary.ru/AVOUMS

2. Атабиева, Ф. А., & Отарова, А. С. (2023). Исследование уровня содержания и миграции меди в воде рек Центрального Кавказа. *Успехи современного естествознания*, *9*, 22-27. https://doi.org/10.17513/use.38098 EDN: https://elibrary.ru/OSNRIE
3. Атабиева, Ф. А., Чередник, Е. А., & Отарова, А. С. (2021). Пространственно-временная изменчивость уровня содержания соединений тяжелых металлов в воде рек Малка и Баксан. *Наука. Инновации. Технологии*, *3*, 119-132. https://doi.org/10.37493/2308-4758.2021.3.8 EDN: https://elibrary.ru/NTVWBV
4. Бабушкин, А. Г., Московченко, Д. В., & Пикунов, С. В. (2007). *Гидрохимический мониторинг поверхностных вод Ханты-Мансийского автономного округа Югры*. Новосибирск: 151 с.
5. Бадмаева, С. Э., & Соколова, Ю. А. (2017). Мониторинг гидрохимического состояния реки Енисей в г. Красноярске. *Вестник КрасГАУ*, *8*(131), 100-104. EDN: https://elibrary.ru/ZDUDSP
6. Баженова, О. П. (2005). *Многолетняя динамика фитопланктона бассейна реки Иртыш (Состояние и тенденции)*: дис. … д-ра биол. наук. Омск: 318 с.
7. Баженова, О. П., Барсукова, Н. Н., & Янчевская, А. М. (2018). Современное состояние экосистемы реки Иртыш по данным биомониторинга. В: *Человек и Север: Антропология, археология, экология: матер. Всерос. науч. конф. (г. Тюмень, 2-6 апреля 2018 г.)*. Тюмень: ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, Вып. 4, 478-482. EDN: https://elibrary.ru/YVHHIK
8. Бобренко, Е. Г., Розбах, Т. В., & Бобренко, М. И. (2013). Оценка трансграничного загрязнения реки Иртыш медью и марганцем. *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность*, *3*, 096-099. EDN: https://elibrary.ru/RQCWSJ
9. Валиев, В. С., Иванов, Д. В., Шамаев, Д. Е., [и др.] (2018). Анализ структурных связей между гидрохимическими показателями речного стока. *Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина*, *4*(61), 90-101. EDN: https://elibrary.ru/YRJFHV
10. Голованова, О. А., & Маловская, Е. А. (2016). Динамика загрязнения ионами тяжелых металлов поверхностных вод рек Сибирского региона. *Вестник Омского университета*, *3*(81), 64-73. EDN: https://elibrary.ru/WRQSFB
11. Даценко, Ю. С. (2018). Особенности формирования речного стока марганца и железа в периоды половодья. *Вода: химия и экология*, *4-6*(115), 3-6. EDN: https://elibrary.ru/XZUENV

12. Добровольский, В. В. (1998). *Основы биогеохимии*. Москва: 413 с.
13. Дударева, И. А., Алимова, Г. С., & Токарева, А. Ю. (2017). Марганец в воде и донных отложениях нижнего течения реки Иртыш. *Успехи современного естествознания*, *8*, 70-74. EDN: https://elibrary.ru/ZFDNMB
14. Ежегодник качества поверхностных вод РФ за 2022 год / Под ред. М. М. Трофимчука. Ростов-на-Дону: 2023. 613 с.
15. Жаркова, Н. Н., Баженова, О. П., Гаврильченко, О. Л., & Болтовская, А. С. (2024). Сезонная динамика химического состава воды реки Иртыш на территории Омской области. *Водные биоресурсы и среда обитания*, *7*(2), 7-20. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_2_7 EDN: https://elibrary.ru/AIJEKV
16. Козлова, С. И., Кулебакина, Л. Г., & Зелюкова, Ю. В. (1985). Содержание ртути в воде, взвешенном веществе и донных отложениях устьевой зоны реки Дунай. *Водные ресурсы*, *12*(1), 155-159.
17. Колесников, В. А., & Бойченко, Н. Б. (2014). Годовая и сезонная динамика содержания тяжелых металлов в воде рек Бузим и Есауловка Красноярского края. *Вестник КрасГАУ*, *6*(93), 186-190. EDN: https://elibrary.ru/SMWOUN
18. Кондратьева, Л. М., & Голубева, Е. М. (2015). Сезонные изменения содержания марганца в р. Амур при различном гидрологическом режиме. *Тихоокеанская геология*, *34*(3), 93-103. EDN: https://elibrary.ru/UUTCWL
19. Лобус, Н. В., Комов, В. Т., & Нгуен Тхи Хай Тхань (2011). Содержание ртути в компонентах экосистем водоемов и водотоков провинции Кхань Хоа (Центральный Вьетнам). *Водные ресурсы*, *38*(6), 733-739. EDN: https://elibrary.ru/OJHDAL
20. Меркушина, Г. А. (2020). Содержание железа и марганца в поверхностных водах Тюменской области. *Вестник рыбохозяйственной науки*, *7*(4), 13-19. EDN: https://elibrary.ru/CITCJG
21. Никаноров, А. М. (2005). *Научные основы мониторинга качества вод*. Санкт-Петербург: 576 с. ISBN: 5-286-01512-3 EDN: https://elibrary.ru/QKOJYL
22. Огрызкова, О. С., Эйрих, А. Н., Серых, Т. Г., и др. (2014). Сезонные изменения содержания марганца в воде Новосибирского водохранилища. *Известия Алтайского государственного университета*, *3-2*(83), 176-180. https://doi.org/10.14258/izvasu(2014)3.2-31 EDN: https://elibrary.ru/TACFHL
23. Панин, М. С. (2000). Антропогенное загрязнение тяжелыми металлами водосборной площади бассейна реки Иртыш в пределах Республики Казахстан. В: *Экология и рациональное природопользование на рубеже веков. Итоги и перспективы: матер. науч. конф*. Томск, 21-22.

24. Папина, Т. С. (2001). *Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода — взвешенное вещество — донные отложения речных экосистем: аналит. обзор*. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН, 58 с.
25. Папина, Т. С., Артемьева, С. С., & Темерев, С. В. (1995). Особенности миграции ртути в бассейне Катуни. *Водные ресурсы*, *22*(1), 60-66. EDN: https://elibrary.ru/SGCOHR
26. Пузанов, А. В., Бабошкина, С. В., Рождественская, Т. А., и др. (2023). Динамика содержания растворенных форм железа в водах притоков Телецкого озера и ее анализ в связи с показателями солнечной активности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, *334*(11), 147-155. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4134 EDN: https://elibrary.ru/ABWTOD
27. Решетняк, О. С. (2022). Многолетняя изменчивость содержания соединений ртути в речных экосистемах России по данным мониторинга. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, *2*, 70-79. https://doi.org/10.31857/S0869780922020060 EDN: https://elibrary.ru/YYBJJK
28. Решетняк, О. С., Брызгало, В. А., & Косменко, Л. С. (2013). Региональные особенности высокого уровня загрязненности рек Обь-Иртышского бассейна. *Вода: химия и экология*, *6*(60), 3-9. EDN: https://elibrary.ru/QJDVMD
29. Робертус, Ю. В., Ситникова, В. А., & Кивацкая, А. В. (2018). Особенности макро- и микрохимического состава руслового стока Верхней Оби в районе города Горно-Алтайска. *Вода: химия и экология*, *1-3*(114), 32-40. EDN: https://elibrary.ru/XZTWOD
30. Сибина, С. (2023). Иртыш вошел в программу экологического оздоровления рек и озер. *Российская газета - Экономика Сибири*, №74(9019). URL: https://rg.ru/2023/04/06/reg-sibfo/irtysh-voshel-v-programmu-ekologicheskogo-ozdorovleniia-rek-i-ozer.html (дата обращения: 04.06.2024)
31. Сибиркина, А. Р., Лихачев, С. Ф., Двинин, Д. Ю., и др. (2021). Экологическая оценка состояния озера Аракуль (Челябинская область) по результатам мониторинговых исследований 2007 и 2020 годов. *Международный научно-исследовательский журнал*, *4*(106), 24-29. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.029 EDN: https://elibrary.ru/OPEESL
32. Соромотин, А. В., Кудрявцев, А. А., Ефимова, А. А., и др. (2019). Фоновое содержание тяжелых металлов в воде малых рек Надым-Пуровского междуречья. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, *2*, 48-55. https://doi.org/10.31857/S0869-78092019248-55 EDN: https://elibrary.ru/TWTCHQ

33. Усенова, Н. А., & Дильмаганбетов, С. Н. (2010). О содержании некоторых микроэлементов в воде р. Эмбы Актюбинской области. *Геология, география и глобальная энергия*, *2*(37), 148-152. EDN: https://elibrary.ru/MWILZL
34. Чернига, Ю. В., & Шорникова, Е. А. (2022). Гидрохимическая характеристика реки Оби и ее притоков (в границах Сургутского и Нефтеюганского районов). *Вестник Сургутского государственного педагогического университета*, *6*(81), 183-191. https://doi.org/10.26105/SSPU.2022.81.6.019 EDN: https://elibrary.ru/NQTRZD
35. Шестеркин, В. П., & Шестеркина, Н. М. (2016). Пространственная и сезонная динамика содержания железа в водах среднего Амура. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, *5*(189), 21-30. EDN: https://elibrary.ru/XHOEER
36. Шестеркина, Н. М., & Шестеркин, В. П. (2022). Микроэлементы в воде малых рек бассейна реки Анюй (западный макросклон северного Сихотэ-Алиня). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, *333*(7), 104-114. https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3294 EDN: https://elibrary.ru/WQJRFU
37. Эйрих, А. Н., Серых, Т. Г., Овчаренко, Е. А., и др. (2022). Сезонная динамика химического состава поверхностной воды р. Оби. *Теоретическая и прикладная экология*, *3*, 96-102. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-096-102 EDN: https://elibrary.ru/VUALDX
38. Яровая, О. В., Молчанова, Т. В., Гусева, А. А., и др. (2014). *Растворенные и взвешенные неорганические вещества в водных системах*. Москва: 64 с.
39. Atabieva, F., & Gekkieva, S. (2020). Seasonal variability of the content of heavy metal compounds in the water of rivers in the foothills of the Central Caucasus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *913*, 052055. https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/5/052055 EDN: https://elibrary.ru/HLZILY
40. Khilchevskyi, V. K., Leta, V. V., Sherstyuk, N. P., Pylypovych, O. V., Zabokrytska, M. R., Pasichnyk, M. P., & Tsvietaieva, O. V. (2023). Hydrochemical characteristics of the Upper reaches of the Tisza River. *Journal of Geology and Geography*, *32*(2), 283-294. https://doi.org/10.15421/112327 EDN: https://elibrary.ru/TBDTQM
41. Kritzberg, E. S., & Ekström, S. M. (2012). Increasing iron concentrations in surface waters — A factor behind brownification? *Biogeosciences*, *9*, 1465-1478. https://doi.org/10.5194/bgd-8-12285-2011
42. Krupa, E., Romanova, S., Serikova, A., & Shakhvorostova, L. (2024). A Comprehensive Assessment of the Ecological State of the Transboundary Irtysh

River (Kazakhstan, Central Asia). *Water*, *16*(7), 973. https://doi.org/10.3390/w16070973 EDN: https://elibrary.ru/KGBEDO

43. Slazhneva, S., Kozyreva, Y., & Maurer, M. (2022). Assessment of surface water quality (on the example of the Chumysh river). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(2), 296-311. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-2-296-311 EDN: https://elibrary.ru/EWYWZL

References

1. Arslanova, M. M., & Shornikova, E. A. (2021). Relationship between hydrochemical indicators and the structure of the microbial community of watercourses in the oil-producing areas of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra. *Samara Scientific Bulletin*, *10(1)*, 20-23. https://doi.org/10.17816/snv2021101102 EDN: https://elibrary.ru/AVOUMS
2. Atabieva, F. A., & Otarova, A. S. (2023). Study of the level of copper content and migration in the water of the rivers of the Central Caucasus. *Advances in Modern Natural Sciences*, *9*, 22-27. https://doi.org/10.17513/use.38098 EDN: https://elibrary.ru/OSNRIE
3. Atabieva, F. A., Cherendnik, E. A., & Otarova, A. S. (2021). Spatio-temporal variability of the level of heavy metal compounds in the water of the Malka and Baksan rivers. *Science. Innovations. Technologies*, *3*, 119-132. https://doi.org/10.37493/2308-4758.2021.3.8 EDN: https://elibrary.ru/NTVWBV
4. Babushkin, A. G., Moskovchenko, D. V., & Pikunov, S. V. (2007). *Hydrochemical monitoring of surface waters of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra*. Novosibirsk. 151 p.
5. Badmaeva, S. E., & Sokolova, Yu. A. (2017). Monitoring of the hydrochemical state of the Yenisei River in Krasnoyarsk. *Vestnik KrasGAU*, *8(131)*, 100-104. EDN: https://elibrary.ru/ZDUDSP
6. Bazhenova, O. P. (2005). *Long-term dynamics of phytoplankton in the Irtysh River basin (State and trends)* (Doctoral dissertation). Omsk. 318 p.
7. Bazhenova, O. P., Barsukova, N. N., & Yanchovskaya, A. M. (2018). Current state of the Irtysh River ecosystem based on biomonitoring data. In *Man and the North: Anthropology, Archaeology, Ecology: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference (Tyumen, April 2-6, 2018)* (Vol. 4, pp. 478-482). Tyumen: FIC TymNC SO RAS. EDN: https://elibrary.ru/YVHHIK
8. Bobrenko, E. G., Rozbah, T. V., & Bobrenko, M. I. (2013). Assessment of transboundary pollution of the Irtysh River with copper and manganese. *Russia is young: advanced technologies — to industry*, *3*, 096-099. EDN: https://elibrary.ru/RQCWSJ

9. Valiev, V. S., Ivanov, D. V., Shamayev, D. E., et al. (2018). Analysis of structural relationships between hydrochemical indicators of river runoff. *Bulletin of Ryazan State University named after S.A. Yesenin*, *4(61)*, 90-101. EDN: https://elibrary.ru/YRJFHV
10. Golovanova, O. A., & Malovskaya, E. A. (2016). Dynamics of heavy metal ion pollution of surface waters of Siberian rivers. *Bulletin of Omsk University*, *3(81)*, 64-73. EDN: https://elibrary.ru/WRQSFB
11. Datsenko, Yu. S. (2018). Features of manganese and iron river runoff formation during flood periods. *Water: Chemistry and Ecology*, *4-6(115)*, 3-6. EDN: https://elibrary.ru/XZUENV
12. Dobrovolsky, V. V. (1998). *Fundamentals of biogeochemistry*. Moscow. 413 p.
13. Dudareva, I. A., Alimova, G. S., & Tokareva, A. Yu. (2017). Manganese in water and bottom sediments of the lower reaches of the Irtysh River. *Advances in Modern Natural Sciences*, *8*, 70-74. EDN: https://elibrary.ru/ZFDNMB
14. *Annual Report on the Quality of Surface Waters of the Russian Federation for 2022* (Ed. M. M. Trofimchuk). Rostov-on-Don: 2023. 613 p.
15. Zharkova, N. N., Bazhenova, O. P., Gavrilchenko, O. L., & Boltovskaya, A. S. (2024). Seasonal dynamics of the chemical composition of the Irtysh River water in the Omsk region. *Water Bioresources and Habitat*, *7(2)*, 7-20. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_2_7 EDN: https://elibrary.ru/AIJEKV
16. Kozlova, S. I., Kulebakina, L. G., & Zelyukova, Yu. V. (1985). Mercury content in water, suspended matter and bottom sediments of the Danube River estuary zone. *Water Resources*, *12(1)*, 155-159.
17. Kolesnikov, V. A., & Boychenko, N. B. (2014). Annual and seasonal dynamics of heavy metal content in the waters of the Buzim and Esaulovka rivers of the Krasnoyarsk Territory. *Vestnik KrasGAU*, *6(93)*, 186-190. EDN: https://elibrary.ru/SMWOUN
18. Kondratyeva, L. M., & Golubeva, E. M. (2015). Seasonal changes in manganese content in the Amur River under different hydrological regimes. *Pacific Geology*, *34(3)*, 93-103. EDN: https://elibrary.ru/UUTCWL
19. Lobus, N. V., Komov, V. T., & Nguyen Thi Hai Thanh (2011). Mercury content in the components of aquatic ecosystems of reservoirs and streams of Khanh Hoa province (Central Vietnam). *Water Resources*, *38(6)*, 733-739. EDN: https://elibrary.ru/OJHDAL
20. Merkushina, G. A. (2020). Iron and manganese content in surface waters of the Tyumen region. *Bulletin of Fisheries Science*, *7(4)*, 13-19. EDN: https://elibrary.ru/CITCJG
21. Nikanorov, A. M. (2005). *Scientific foundations of water quality monitoring*. Saint Petersburg. 576 p. ISBN: 5-286-01512-3 EDN: https://elibrary.ru/QKOJYL

22. Ogryzkova, O. S., Eyrich, A. N., Serykh, T. G., et al. (2014). Seasonal changes in manganese content in the water of the Novosibirsk reservoir. *Izvestiya Altai State University*, *3-2(83)*, 176-180. https://doi.org/10.14258/izvasu(2014)3.2-31 EDN: https://elibrary.ru/TACFHL
23. Panin, M. S. (2000). Anthropogenic pollution of heavy metals in the watershed area of the Irtysh River basin within the Republic of Kazakhstan. In *Ecology and rational nature management at the turn of the century. Results and prospects: Proceedings of the scientific conference* (Tomsk, 21-22).
24. Papina, T. S. (2001). Transport and distribution features of heavy metals in the series: water — suspended matter — bottom sediments of river ecosystems: analytical review. Novosibirsk: GNTB SO RAN; IVEP SO RAN. 58 p.
25. Papina, T. S., Artemyeva, S. S., & Temerev, S. V. (1995). Features of mercury migration in the Katun basin. *Water Resources*, *22(1)*, 60-66. EDN: https://elibrary.ru/SGCOHR
26. Puzanov, A. V., Baboshkina, S. V., Rozhdestvenskaya, T. A., et al. (2023). Dynamics of dissolved iron content in the waters of the inflows of Lake Teletskoye and its analysis in relation to solar activity indicators. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Engineering of georesources*, *334(11)*, 147-155. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4134 EDN: https://elibrary.ru/ABWTOD
27. Reshetnyak, O. S. (2022). Multi-year variability of mercury compounds content in Russian river ecosystems based on monitoring data. *Geoeconomics. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, *2*, 70-79. https://doi.org/10.31857/S0869780922020060 EDN: https://elibrary.ru/YYBJJK
28. Reshetnyak, O. S., Bryzgalo, V. A., & Kosmenko, L. S. (2013). Regional features of high pollution levels in the Ob-Irtysh basin. *Water: Chemistry and Ecology*, *6(60)*, 3-9. EDN: https://elibrary.ru/QJDVMD
29. Robertus, Yu. V., Sitnikova, V. A., & Kivatskaya, A. V. (2018). Macro- and microchemical composition features of the Upper Ob river flow in the city of Gorno-Altaysk. *Water: Chemistry and Ecology*, *1-3(114)*, 32-40. EDN: https://elibrary.ru/XZTWOD
30. Sibina, S. (2023). Irtysh has entered the program of environmental rehabilitation of rivers and lakes. *Rossiyskaya Gazeta - Economy of Siberia*, №74(9019). URL: https://rg.ru/2023/04/06/reg-sibfo/irtysh-voshel-v-programmu-ekologicheskogo-ozdorovleniia-rek-i-ozer.html (Accessed: June 4, 2024)
31. Sibirskina, A. R., Likhachev, S. F., Dvinin, D. Yu., et al. (2021). Environmental assessment of the Arakul Lake (Chelyabinsk region) based on the results of monitoring studies in 2007 and 2020. *International Research Journal*, *4(106)*, 24-29. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.029 EDN: https://elibrary.ru/OPEESL

32. Soromotin, A. V., Kudryavtsev, A. A., Efimova, A. A., et al. (2019). Background content of heavy metals in the water of small rivers of the Nadym-Pur interfluve. *Geoeconomics. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, *2*, 48-55. https://doi.org/10.31857/S0869-78092019248-55 EDN: https://elibrary.ru/TWTCHQ
33. Usenova, N. A., & Dilmanbetov, S. N. (2010). On the content of some trace elements in the water of the Emba River in the Aktobe region. *Geology, Geography and Global Energy*, *2(37)*, 148-152. EDN: https://elibrary.ru/MWILZL
34. Cherniga, Yu. V., & Shornikova, E. A. (2022). Hydrochemical characteristics of the Ob River and its tributaries (within the boundaries of the Surgut and Nefteyugansk districts). *Bulletin of the Surgut State Pedagogical University*, *6(81)*, 183-191. https://doi.org/10.26105/SSPU.2022.81.6.019 EDN: https://elibrary.ru/NQTRZD
35. Shesterkin, V. P., & Shesterkina, N. M. (2016). Spatial and seasonal dynamics of iron content in the waters of the middle Amur River. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, *5(189)*, 21-30. EDN: https://elibrary.ru/XHOEER
36. Shesterkina, N. M., & Shesterkin, V. P. (2022). Trace elements in the water of small rivers of the Anyuy River basin (western macrocline of the northern Sikhote-Alin). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Engineering of georesources*, *333(7)*, 104-114. https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3294 EDN: https://elibrary.ru/WQJRFU
37. Eyrikh, A. N., Serykh, T. G., Ovcharenko, E. A., et al. (2022). Seasonal dynamics of the chemical composition of surface water of the Ob River. *Theoretical and Applied Ecology*, *3*, 96-102. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-096-102 EDN: https://elibrary.ru/VUALDX
38. Yarova, O. V., Molchanova, T. V., Guseva, A. A., et al. (2014). *Dissolved and suspended inorganic substances in aquatic systems*. Moscow. 64 p.
39. Atabieva, F., & Gekkieva, S. (2020). Seasonal variability of the content of heavy metal compounds in the water of rivers in the foothills of the Central Caucasus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *913*, 052055. https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/5/052055 EDN: https://elibrary.ru/HLZILY
40. Khilchevskyi, V. K., Leta, V. V., Sherstyuk, N. P., Pylypovych, O. V., Zabokrytska, M. R., Pasichnyk, M. P., & Tsvietaieva, O. V. (2023). Hydrochemical characteristics of the Upper reaches of the Tisza River. *Journal of Geology and Geography*, *32*(2), 283-294. https://doi.org/10.15421/112327 EDN: https://elibrary.ru/TBDTQM

41. Kritzberg, E. S., & Ekström, S. M. (2012). Increasing iron concentrations in surface waters — A factor behind brownification? *Biogeosciences*, *9*, 1465-1478. https://doi.org/10.5194/bgd-8-12285-2011
42. Krupa, E., Romanova, S., Serikova, A., & Shakhvorostova, L. (2024). A Comprehensive Assessment of the Ecological State of the Transboundary Irtysh River (Kazakhstan, Central Asia). *Water*, *16*(7), 973. https://doi.org/10.3390/w16070973 EDN: https://elibrary.ru/KGBEDO
43. Slazhneva, S., Kozyreva, Y., & Maurer, M. (2022). Assessment of surface water quality (on the example of the Chumysh river). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14*(2), 296-311. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-2-296-311 EDN: https://elibrary.ru/EWYWZL

ВКЛАД АВТОРОВ

Жаркова Н.Н.: разработка концепции научной работы, статистическая обработка материалов, анализ данных, написание рукописи.
Баженова О.П.: разработка концепции научной работы, редактирование черновика рукописи.
Болтовская А.С.: сбор и анализ данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Zharkova N.N.: study conception, statistical data analysis of materials, data analysis, writing of the manuscript.
Bazhenova O.P.: study conception, editing of the draft of the manuscript.
Фамилия И.О.: data collection and analysis.
Фамилия И.О.: statistical data analysis.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Жаркова Наталья Николаевна, д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры экологии, природопользования и биологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»
Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
nn.zharkova@omgau.org

Баженова Ольга Прокопьевна, д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры экологии, природопользования и биологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»

Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
op.bazhenova@omgau.org

Болтовская Алена Сергеевна, аспирант кафедры экологии, природопользования и биологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»
Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
as.kravets2025@omgau.org

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalya N. Zharkova, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Ecology, Nature Management and Biology
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Pl., Omsk, 644008, Russian Federation
nn.zharkova@omgau.org
SPIN-code: 8434-3574
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2970-328X

Olga P. Bazhenova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Ecology, Nature Management and Biology
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Pl., Omsk, 644008, Russian Federation
op.bazhenova@omgau.org
SPIN-code: 6495-5649
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2406-4319
ResearcherID: https://publons.com/researcher/ABB-8737-2021/
Scopus AuthorID: 6603882158

Alena S. Boltovskaya, postgraduate student of the Department of Ecology, Nature Management and Biology
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Pl., Omsk, 644008, Russian Federation
as.kravets2025@omgau.org
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5229-822X

Поступила 25.07.2024 Received 25.07.2024
После рецензирования 24.09.2024 Revised 24.09.2024
Принята 16.10.2024 Accepted 16.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1430 **EDN: WVTHLI**
УДК 57.084.1

Научная статья

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕДУР БИОТЕСТИРОВАНИЯ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

А.С. Олькова

Аннотация

Обоснование. В методологии биотестирования остаются проблемными вопросы поиска целевых биотестов, количества оцениваемых тест-функций организмов, а также поддержания чувствительности тест-культуры в диапазоне, заданном методикой.

Целью исследования было обобщение научных подходов, способствующих повышению качества процедур биотестирования и их результатов: выбор наиболее подходящих методик, поддержание качества лабораторной культуры, реализация системного биотестирования с использованием нескольких конечных точек одного организма.

Методы исследования. В течение 2006-2024 гг. велись научно-исследовательские работы в лаборатории биотестирования Вятского государственного университета (г. Киров, Россия), по результатам которых далее были предложены научно обоснованные подходы повышения качества процедур биотестирования.

Результаты. В работе предложены три направления повышения качества процедур биотестирования для специализированных лабораторий. Алгоритм выбора метода биотестирования должен основываться на определении чувствительности доступных методов анализа. Подход работает, когда известны основные загрязнители (приоритетные токсиканты). Кроме того, рекомендуется проводить регулярный внутрилабораторный контроль качества тест-культуры, включающий оценку чувствительности организмов к эталонному токсиканту и набор показателей жизнедеятельности. Для многоклеточных организмов это средняя продолжительность жизни, начало размножения, суточный прирост смертности и т.д.; для одноклеточных – прирост биомассы или количества клеток. Затем, для прогноза воздействие загрязнения на окру-

жающую среду, рекомендуется оценить несколько конечных точек воздействия на один стандартизированный вид.

Выводы. Реализация концепции «обоснованный выбор методов + качество тест-культуры + оценка спектра реакций организма» позволит сэкономить трудовые и временные ресурсы, получить воспроизводимые результаты, что особенно важно в условиях длительного экологического мониторинга.

Ключевые слова: биотестирование; мониторинг окружающей среды; качество тест-культуры; выбор биотестов; системное биотестирование

Для цитирования. Олькова, А. С. (2025). Повышение качества процедур биотестирования в специализированных лабораториях. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 124-139. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1430

Original article

QUALITY IMPROVEMENT BIOASSAY PROCEDURE IN SPECIALIZED LABORATORIES

A.S. Olkova

Abstract

Background. In the methodology of bioassay, the issues of searching for target biotests, the number of evaluated test-functions of organisms, as well as maintaining the sensitivity of the test-culture in the range specified by the methodology remain problematic.

The aim of the study was to generalize scientific approaches that contribute to improving the quality of bioassay procedures and their results: choosing the most appropriate techniques, maintaining the quality of laboratory culture, implementing systemic bioassay using several endpoints of one organism.

Research methods. During 2006-2024, research work was carried out in the laboratory of bioassay at Vyatka State University (Kirov, Russia), according to the results of which scientific approaches to improving the quality of bioassay procedures were further proposed.

Results. The paper suggests three ways to improve the quality of bioassay procedures for specialized laboratories. The algorithm for selecting the bioassay method should be based on determining the sensitivity of the available methods of analysis. The approach works when the main pollutants (priority toxicants) are known. In addition, it is recommended to conduct regular in-laboratory quality con-

trol of the test culture, including an assessment of the sensitivity of organisms to a reference toxicant and a set of vital signs. For multicellular organisms, this is the average duration of life, the beginning of reproduction, the daily increase in mortality, etc.; for single-celled organisms, it is an increase in biomass or the number of cells. Then, in order to predict the environmental impact of pollution, it is recommended to estimate a few endpoints of exposure per standardized species.

Conclusion. The implementation of the concept of "reasonable choice of methods + quality of test-culture + assessment of the spectrum of body reactions" will save labor and time resources, obtain reproducible results, which is especially important in conditions of long-term environmental monitoring.

Keywords: bioassay; environmental monitoring; quality of test culture; selection of bioassays; systemic bioassay

For citation. Olkova, A. S. (2025). Quality improvement bioassay procedure in specialized laboratories. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 124-139. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1430

Введение

Биотестирование – это комплекс методологических подходов, направленных на определение реакций одного или нескольких организмов на тестируемую среду. В научно-исследовательских работах, производственном экологическом контроле и мониторинге сред и объектов чаще всего тест-средами являются природные и сточные воды, почва и грунты, отходы, отдельные химические соединения и их комбинации, и даже воздух.

В методологии биотестирования сложились несколько векторов развития:

- разработка новых методик биотестирования, что связано с запросами на повышение чувствительности тест-организмов, в том числе избирательной, к приоритетным загрязняющим веществам, с одновременной простотой их лабораторного культивирования, а также этической необходимостью перехода на биотестирование с помощью выделенных клеток или тканей (*in vitro*) [7, 10];

- разработка приборов для автоматизированного биотестирования или части процедуры. Их надежность до сих пор сравнивают с результатами классических визуальных биотестов [6];

- поиск новых тест-функций организмов (конечных точек). Важно оценивать предлетальные ответные реакции организмов, поскольку именно так можно определить относительно низкие концентрации токсикантов, способные вызвать нарушения в окружающей среде [3];

- оценка и интерпретация результатов токсикологического анализа. Известно, что природный состав воды или почвы значительно влияет на проявление токсичных свойств загрязняющих веществ [9]. Комбинации загрязняющих веществ приводят к модификации токсических эффектов [13].

Несмотря на признанную важность методов биотестирования в оценке состояния окружающей среды и экологическом мониторинге, специалисты признают ряд проблем, свойственных группе методов. Например, в разных лабораториях может различаться не только чувствительность тест-культуры, но и некоторые морфологические параметры составляющих её особей (цвет, размер и т.д.). Использование набора методов («батареи биотестов») экологически оправдано, но экономически не целесообразно. При этом методики предполагают оценку одной или нескольких тест-функций подопытных организмов, тогда как специалист визуально может заметить гораздо больше изменений, которые никак не отразятся на заключении о токсичности исследованной среды.

Целью данной работы стало обобщение научных подходов, способствующих повышению информативности методов биотестирования, а именно – выбору наиболее подходящих методик, поддержанию качества лабораторной культуры, реализации системного биотестирования с использованием нескольких конечных точек одного организма.

Материалы и методы исследования

Подходы оптимизации методов биотестирования сформированы по результатам многолетних (2006-2024 гг.) научно-исследовательских работ с использованием методов биотестирования. Основные экспериментальные работы проведены в аккредитованной научно-исследовательской экоаналитической лаборатории Вятского государственного университета (г. Киров, Россия) и легли в основу концепции биотестирования водных сред с учетом многофакторности ответных реакций тест-организмов [2].

В данной статье представлен итог этих исследований - концепция «обоснованный выбор методов + качество тест-культуры + оценка спектра реакций организма», а также материалы апробации предложенных подходов.

Апробация проводилась на природных водах, отобранных в окружающей среде, а также на природных водах с внесением дополнительного моделируемого загрязнения. В экспериментах в основном использовались аттестованные методики биотестирования (табл. 1). Для разработки системного биотестирования по множеству тест-функций *D. magna* вводился учет дополнительных параметров жизнедеятельности рачков.

Таблица 1.
Характеристика основных методик биотестирования, используемых в работе

Методика	Тест-организм	Тест-функция / функции	Продолжительность теста
ФР 1.39.2007.03222	*Daphnia magna* Straus, 1820	Смертность / плодовитость	96 часов / 24 дня
ФР 1.39.2007.03221	*Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg, 1900	Смертность / плодовитость	48 часов / 12 дней
ФР 1.39.2015.19242	*Paramecium caudatum* Ehrenberg, 1838	Хемотаксическая реакция	30 минут
ПНДФ Т 14.1:2:3:4.11-04	*Escherichia coli* Migula, 1895, штамм М17	Биолюминесценция	30 минут

Проводилось как моделирование загрязнения воды и почвы методом внесения известных массовых долей токсикантов, так и биотестирование природных сред и техногенных объектов, накопивших загрязняющие вещества вследствие антропогенной деятельности.

Результаты и их обсуждение

Выбор методов биотестирования

Алгоритм обоснованного выбора методов биотестирования должен быть основан на ранжировании чувствительности биотестов к тем веществам, которые потенциально будут присутствовать в пробах. Так, в сельскохозяйственных почвах приоритетными токсикантами являются пестициды, а в сточных водах металлургического завода – тяжелые металлы. Предлагаемый алгоритм заключается в следующем:

1. Определение летальных и витальных концентраций интересующего вещества или комбинации соединений по базовому биотесту. Им может быть метод определения токсичности водной среды по смертности *Daphnia magna* Straus, введенный в практику биотестирования практически по всему миру.

Диапазон концентраций определяются согласно опубликованным данным либо согласно концентрациям, аналитически определяемым в тест-среде. Готовятся модельные растворы на основе природной воды района последующих исследований. Это позволяет сразу учесть эффекты совместного действия токсиканта и веществ, входящих в химический состав природной воды.

2. Биотестирование модельных растворов приоритетных токсикантов с использованием других тест-организмов, отличающихся от *D. magna* по биологической систематике и трофическому уровню. Желательно, чтобы набор тест-организмов представлял продуцентов, консументов и редуцентов, а также одноклеточные и многоклеточные организмы. В первую очередь тестируют летальные концентрации для *D. magna*, далее нелетальные, но действующие концентрации. При значительных отличиях чувствительности от *D. magna* необходимо увеличить серию растворов.

3. Сравнение результатов разных биотестов и демонстрация шкал их чувствительности.

Сравнение необходимо проводить по отклику биотестов на массовые концентрации испытуемого вещества, а не на действующие предельно допустимые концентрации, поскольку нередко возникают разногласия по виду используемого норматива и их корректности.

4. Определение хронических и отсроченных эффектов испытуемого вещества (смеси). При этом удобно использовать биотест на *D. magna*. Ускоренным вариантом является определение хронической токсичности по плодовитости *Ceriodaphnia affinis*.

Таблица 2.

Пример матрицы чувствительности биотестов.
Уровень чувствительности биотестов показан знаками и цветом: «+» – минимальная (белый), «++» – средняя (оранжевый), «+++» – «желтый», «++++» – максимальная чувствительность (зеленый) [2]

Токсикант			Биотест / оцениваемая реакция			
			Смертность *D. magna*	Смертность *C. affinis*	Биолюминесценция *E. coli*	Хемотаксис *P. caudatum*
Минеральные вещества	Cu	Тяжелые металлы	+	++	++++	+++
	Cd		+++	++	+	++++
	Pb		++	+++	+	++++
	Zn		+++	++	+	++++
	NO_3^-	Минеральные формы азота	+++	++++	+	++
	NO_2^-		+++	++++	+	++
	NH_4^+		+++	++++	++	+
	$NO_3^- + NH_4^+$		+++	++++	+	++
	$NO_2^- + NH_4^+$		+++	++++	++	+
	$(P_xO_y)^{z-}$	Пирофосфаты и фосфаты	+	++	++++	+++

Органические вещества	Имазетапир	Гербициды	+	++	+++	++++
	Имазамокс		+	++	+++	++++
	Нефтепродукты (бензин)		+	++	+++	++++

Включение в план исследований определения хронических эффектов проводится по необходимости. Например, в случае известного факта постоянного поступления в окружающую среду интересующего вещества.

Данный алгоритм апробирован на нескольких веществах. В таблице 2 указаны разные уровни чувствительности четырёх биотестов.

Десятки тысяч химических веществ и практически бесконечное количество потенциальных комбинаций химических и нехимических факторов стресса требуют методов определения приоритетности воздействия [11]. Описанный алгоритм способствует накоплению научных фактов о токсичности и особенностях действия на живые организмы множества поллютантов. При реализации долгосрочных мониторинговых программ, выбор целевого биотеста согласно показанному примеру матрицы чувствительности сбережет трудовые и материальные ресурсы.

Поддержание качества лабораторной культуры

Каждая тест-культура требует разработки стандартных условий для её содержания, позволяющих длительное время поддерживать её здоровье.

В биотестировании главным инструментом анализа, датчиком токсичности, является живой тест-организм, чаще модельная популяция – культура тест-организмов. Выполнение функций культуры зависит от её здоровья. Под здоровьем культуры тест-организмов следует понимать её способность длительно существовать в качестве модельной популяции со стабильной продолжительностью жизни особей и сохранением способности к самовоспроизводству [2].

В экспериментах на *D. magna* провели оценку влияния факторов плотности популяции и температуры содержания организмов [8]. Именно эти факторы различаются в протоколах биотестирования, реализуемых в разных странах, и, к сожалению, до сих пор слабо контролируются в лабораториях.

Для базового тест-организма *D. magna* механизмы поддержания здоровья лабораторной культуры и, соответственно, её качества, таковы:

1. Необходимо проводить плановый контроль способности особей к размножению в контрольных условиях, то есть без токсического воздействия. Периодичность – 1 раз в 6 месяцев. Регулярное ведение карт Шухарта по этому показателю покажет тренд ухудшения здоровья модельной популяции.

2. Контроль показателя «день появления первой молоди» будет более оперативной мерой. Более того, наблюдение за этим показателем можно внедрить в оценку здоровья каждой новой синхронизированной группы *D. magna*. Критерием ухудшения здоровья культуры будет отставание в развитии особей на 5 и более дней по сравнению со средними ранее зафиксированными в благоприятный период значениями.

3. Один раз в год необходимо специально моделировать группу одновозрастных рачков и наблюдать за коэффицентом суточного прироста смертности. Показано, что этот параметр стабилен, его значительные отклонения укажут на проблемы здоровья культуры [8].

4. Соблюдение плотности культуры, рекомендованной методикой анализа, - важная процедура не только в период проведения экспериментов, но и на протяжении всего времени содержания культуры. Для *D. magna* она составляет 25 особей на 1 литр. Пониженная плотность культуры вызывает пики плодовитости и истощает культуру (снижается продолжительность жизни), повышенная плотность вызывает задержку развития особей.

5. Проведение экспериментов на установление чувствительности молоди *D. magna* к модельному токсиканту желательно сопровождать выстраиванием карт Шухарата, что позволит не только доказывать соответствие культуры требованиям методики, но и принимать превентивные меры при негативном тренде.

Предложенные параметры стандартизации условий культивирования и состояния тест-организма *D. magna* можно адаптировать и для других культур, используя ведущий принцип: регулярное отслеживание параметров жизнедеятельности всего жизненного цикла организмов. Предложенные мероприятия соответствуют концепции контроля качества и валидации биоанализа [12].

Системное биотестирование по спектру тест-функций одного тест-организма

Признано, что использование тест-функций, основанных на предлетальных эффектах загрязняющих веществ, наиболее целесообразно [4]. Однако, многие надежные методы биотестирования не содержат рекомендаций по фиксации и оценке дополнительных реакций организма-датчика,

которые могут проявится в процессе экотоксикологического эксперимента. Системное биотестирование, заключающееся в оценке откликов одного биологического вида, последовательно проявляющихся в течение жизни организмов, укажет на токсикологические мишени загрязняющего вещества и будет способствовать учёту максимального количества реакций тест-организма.

Вновь была использована культура *D. magna*, у которой выделили 14 тест-функций, включающих наиболее подробное наблюдение за условным первым поколением подопытных особей, а также вторым и третьим поколениями, появившимися в тестируемой среде. Предлагаемая последовательность оценки тест-функций (конечных точек) состоит из доступных для учета показателей (табл. 3).

Таблица 3.

Перечень тест-функций, используемых для комплексной оценки токсичности водных сред [1]

№ п/п	Тест-функция	Способ учёта	Необходимость специальных приборов	Экспозиция
1	Смертность	Визуальный	Нет	96 часов
2	Двигательная активность	Визуальный	Нет	3-96 часов
3	Трофическая активность	Приборный	ИПС-03* или спектрофотометр	5 суток
4	Задержка или стимуляция созревания особей (по выводковым камерам)	Визуальный + микроскопирование	Микроскоп	5-10 суток
5	Уменьшение линейных размеров	Микроскопирование	Микроскоп с микрометром	10 и 25 суток
6	Пигментация тела	Визуальный	Нет	25 суток
7	Задержка появления первого потомства	Визуальный	Нет	7-12 суток
8	Качество «молоди»	Визуальный + микроскопирование	Микроскоп с микрометром	25 суток

9	Плодовитость	Визуальный	Нет	25 суток
10	Доля абортивных яиц от общего количества молоди	Визуальный	Нет	Весь жизненный цикл
11	Средняя продолжительность жизни	Визуальный	Нет	Весь жизненный цикл
12	Смертность особей в поколениях F2 и F3	Визуальный	Нет	25 суток жизни особей F2 и F3
13	Плодовитость в поколениях F2 и F3	Визуальный	Нет	25 суток жизни особей F2 и F3
14	Доля абортивных яиц от общего числа молоди в поколениях F2 и F3	Визуальный	Нет	25 суток жизни особей F2 и F3

Примечание: * - Измеритель плотности суспензии.

Ниже приведена схема биотестирования по набору тест-функций *D. magna* (рис. 1).

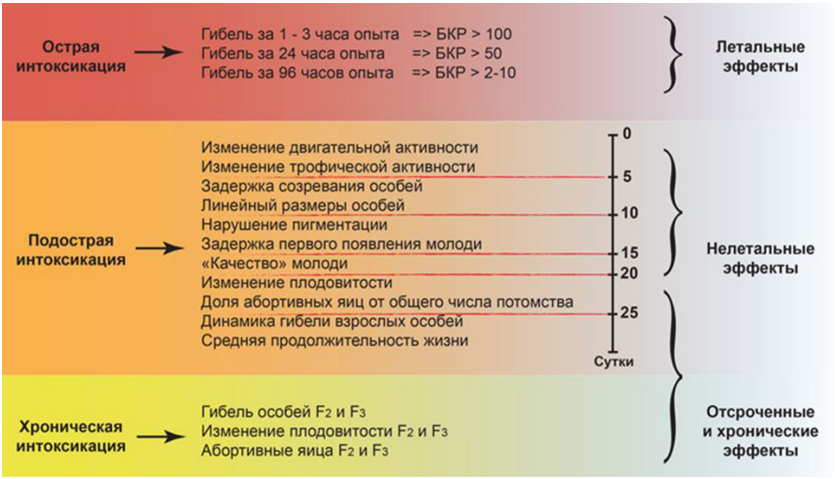


Рис. 1. Схема системного биотестирования по спектру тест-функций *D. magna* (БКР – безвредная кратность разбавления) [2]

Экспериментальная схема рассчитана на наиболее подробное наблюдение за первым поколением подопытных особей *D. magna*, которое происходит в течение всех их жизни. Вторым поколением считается молодь, полученная в эксперименте с условным первым поколением, которое также помещается в тестируемую среду. Аналогично формируется третье поколение. В результате отслеживаются:

1. Летальный эффект – итог острой интоксикации; у *D. magna* обычно проявляется в первые 4 дня опыта. При начале размножения рачков часто наблюдается высокая летальность новорожденных особей, поскольку они максимально чувствительны к химическим воздействиям;

2. Нелетальные эффекты – большинство наблюдаемых ответных реакций *D. magna*, которые часто связаны между собой статистически. Так, снижение линейных размеров особей в начале эксперимента затем приводит к снижению «качества молоди», мертворождению и другим патологиям. Отметим, что «продолжительность жизни», как и при наблюдении за здоровьем культуры, является одним из наиболее важных и информативных показателей влияния водной среды на организмы.

3. К хроническим эффектам можно отнести общее количество молоди, полученное в течение жизни всех наблюдаемых поколений. Отдельно можно рассматривать отсроченные эффекты, которые проявляются в результате оказанного воздействия в нескольких поколениях организмов. В том числе их можно выявить при снятии химического воздействия.

Комплекс нескольких тест-функций при тестировании действия веществ уже активно используется в фармакологии [5]. Его необходимо применять и для мониторинга окружающей среды. Такой подход позволит давать подробную характеристику исследуемых водных сред, новых веществ и материалов, прогнозировать их экотоксикологическое действие при попадании в окружающую среду.

Заключение

Оптимизация регулярно применяемых методов биотестирования будет заключаться в трех основных направлениях работы (рис. 2).

Все три блока взаимосвязаны между собой и предусматривают последовательное их осуществление на этапе планирования экологических исследований или экологического мониторинга с использованием методов биотестирования.

Предложенный алгоритм выбора биотестов позволяет сравнивать не разные тест-организмы, а пригодность конкретных методик биотестиро-

вания. Алгоритм применим, когда известны приоритетные загрязняющие вещества, регулярно поступающие в окружающую среду территории исследования.

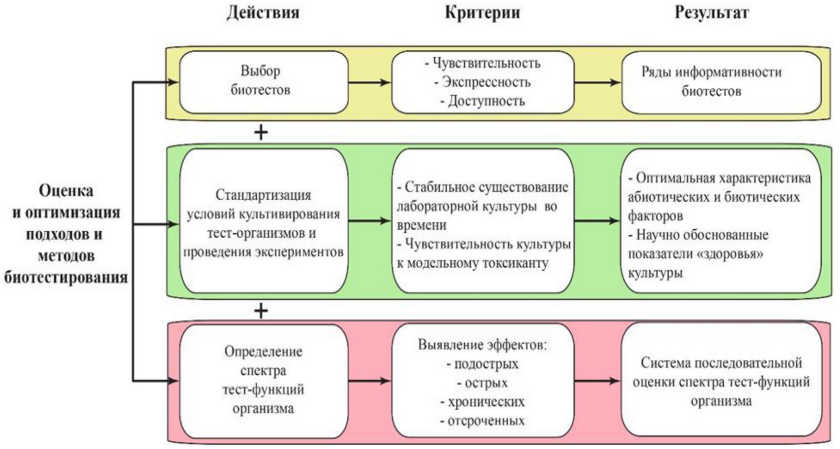


Рис. 2. Оптимизация методов биотестирования для мониторинга окружающей среды и техногенных объектов

Блок контроля качества культуры направлен на получение воспроизводимых результатов. На примере *D. magna* показаны параметры здоровья тест-культуры, применяемых дополнительно к калибровке чувствительности к модельному токсиканту. Эти признаки помогут отделить сезонные колебания состояния тест-организмов от систематического ухудшения их здоровья. Предложенный алгоритм стандартизации тест-культуры может быть адаптирован для других биологических видов.

Системное биотестирование призвано для подробного изучения токсикологических эффектов интересующего вещества или их комбинаций. При таком подходе оцениваются как тест-функции ранней диагностики, так и отсроченные во времени эффекты.

Методология биотестирования продолжает развиваться. Многие современные разработки приводят к усложнению алгоритмов действий для исполнителей. Это не всегда обосновано, кроме того, не позволяет проводить массовое внедрение новых разработок. Предложенная схема оптимизации биотестирования направлена на выбор наиболее информативных методов, сокращение времени работы исполнителя, получение достоверных результатов.

Список литературы

1. Олькова, А. С. (2018). Актуальные направления развития методологии биотестирования водных сред. *Вода и экология: проблемы и решения*, *2*(74), 40-50. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2018.20.2.40-50 EDN: https://elibrary.ru/XUAMAP
2. Олькова, А. С. (2020). *Разработка стратегии биотестирования водных сред с учетом многофакторности ответных реакций тест-организмов*: Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. Владимир: Владимирский государственный университет, 359 с. EDN: https://elibrary.ru/IRBGXV
3. Capela, R., Garric, J., Castro, L. F. C., & Santos, M. M. (2020). Embryo bioassays with aquatic animals for toxicity testing and hazard assessment of emerging pollutants: A review. *Science of The Total Environment*, *705*, 135740. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135740 EDN: https://elibrary.ru/VKMEUG
4. Finlayson, K. A., van de Merwe, J. P., & Leusch, F. D. L. (2022). Review of ecologically relevant in vitro bioassays to supplement current in vivo tests for whole effluent toxicity testing - Part 2: Non-apical endpoints. *Science of The Total Environment*, *851*(1), 158094. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158094 EDN: https://elibrary.ru/HAVIHT
5. Frydrych, A., & Jurowski, K. (2024). Toxicity of minoxidil - Comprehensive in silico prediction of main toxicity endpoints: Acute toxicity, irritation of skin and eye, genetic toxicity, health effect, cardiotoxicity and endocrine system disruption. *Chemico-Biological Interactions*, *393*, 110951. https://doi.org/10.1016/j.cbi.2024.110951 EDN: https://elibrary.ru/QSHBMY
6. Ji, X., Challis, J. K., & Brinkmann, M. (2022). A critical review of diffusive gradients in thin films technique for measuring organic pollutants: Potential limitations, application to solid phases, and combination with bioassays. *Chemosphere*, *287*(3), 132352. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132352 EDN: https://elibrary.ru/HMGVHW
7. Johnson, M., Finlayson, K., van de Merwe, J. P., & Leusch, F. D. L. (2024). Adaption and application of cell-based bioassays to whole-water samples. *Chemosphere*, *361*, 142572. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142572 EDN: https://elibrary.ru/MNOIBS
8. Olkova, A. S., Kantor, G. Y., Kutyavina, T. I., & Ashikhmina, T. Y. (2018). The importance of maintenance conditions of Daphnia magna Straus as a test organism for ecotoxicological analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *37*(2), 376-384. https://doi.org/10.1002/etc.3956 EDN: https://elibrary.ru/XXDRQD

9. Pronk, T. E., Hoondert, R. P. J., Kools, S. A. E., Kumar, V., & de Baat, M. L. (2024). Bioassay predictive values for chemical health risks in drinking water. *Environment International*, *188*, 108733. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108733 EDN: https://elibrary.ru/LYZOUG
10. Rakaj, A., Morroni, L., Grosso, L., Fianchini, A., Pensa, D., Pellegrini, D., & Regoli, F. (2021). Towards sea cucumbers as a new model in embryo-larval bioassays: Holothuria tubulosa as test species for the assessment of marine pollution. *Science of The Total Environment*, *787*, 147593. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147593 EDN: https://elibrary.ru/XISBXM
11. Rider, C. V. (2024). Toxicology and Risk Assessment of Combined Chemicals and Nonchemical Stressors. *Reference Module in Biomedical Sciences*, Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95488-4.00072-3
12. Sabotič, J., Bayram, E., Ezra, D., Gaudêncio, S. P., Haznedaroğlu, B. Z., Janež, N., Ktari, L., Luganini, A., Mandalakis, M., Safari, I., Simes, D., Strode, E., Toruńska-Sitarz, A., Varamogianni-Mamatsi, D., Varese, G. C., & Vasquez, M. I. (2024). A guide to the use of bioassays in exploration of natural resources. *Biotechnology Advances*, *71*, 108307. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108307 EDN: https://elibrary.ru/AHXUML
13. Sysolyatina, M. A., & Olkova, A. S. (2023). Potentization of the Toxic Effect of Copper in the Presence of Lanthanum in Bioassays for Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea). *Biology Bulletin*, *50*(10), 2677-2680. https://doi.org/10.1134/S1062359023100163 EDN: https://elibrary.ru/CJUPJD

References

1. Olkova, A. S. (2018). Current trends in the development of the methodology of aquatic media biotesting. *Water and Ecology: Problems and Solutions*, *2(74)*, 40-50. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2018.20.2.40-50 EDN: https://elibrary.ru/XUAMAP
2. Olkova, A. S. (2020). Development of a biotesting strategy for aquatic environments taking into account the multifactorial nature of test organism responses (Doctoral dissertation). Vladimir: Vladimir State University. 359 p. EDN: https://elibrary.ru/IRBGXV
3. Capela, R., Garric, J., Castro, L. F. C., & Santos, M. M. (2020). Embryo bioassays with aquatic animals for toxicity testing and hazard assessment of emerging pollutants: A review. *Science of The Total Environment*, *705*, 135740. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135740 EDN: https://elibrary.ru/VKMEUG
4. Finlayson, K. A., van de Merwe, J. P., & Leusch, F. D. L. (2022). Review of ecologically relevant in vitro bioassays to supplement current in vivo tests for whole

effluent toxicity testing - Part 2: Non-apical endpoints. *Science of The Total Environment*, *851*(1), 158094. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158094 EDN: https://elibrary.ru/HAVIHT

5. Frydrych, A., & Jurowski, K. (2024). Toxicity of minoxidil - Comprehensive in silico prediction of main toxicity endpoints: Acute toxicity, irritation of skin and eye, genetic toxicity, health effect, cardiotoxicity and endocrine system disruption. *Chemico-Biological Interactions*, *393*, 110951. https://doi.org/10.1016/j.cbi.2024.110951 EDN: https://elibrary.ru/QSHBMY
6. Ji, X., Challis, J. K., & Brinkmann, M. (2022). A critical review of diffusive gradients in thin films technique for measuring organic pollutants: Potential limitations, application to solid phases, and combination with bioassays. *Chemosphere*, *287*(3), 132352. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132352 EDN: https://elibrary.ru/HMGVHW
7. Johnson, M., Finlayson, K., van de Merwe, J. P., & Leusch, F. D. L. (2024). Adaption and application of cell-based bioassays to whole-water samples. *Chemosphere*, *361*, 142572. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142572 EDN: https://elibrary.ru/MNOIBS
8. Olkova, A. S., Kantor, G. Y., Kutyavina, T. I., & Ashikhmina, T. Y. (2018). The importance of maintenance conditions of Daphnia magna Straus as a test organism for ecotoxicological analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *37*(2), 376-384. https://doi.org/10.1002/etc.3956 EDN: https://elibrary.ru/XXDRQD
9. Pronk, T. E., Hoondert, R. P. J., Kools, S. A. E., Kumar, V., & de Baat, M. L. (2024). Bioassay predictive values for chemical health risks in drinking water. *Environment International*, *188*, 108733. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108733 EDN: https://elibrary.ru/LYZOUG
10. Rakaj, A., Morroni, L., Grosso, L., Fianchini, A., Pensa, D., Pellegrini, D., & Regoli, F. (2021). Towards sea cucumbers as a new model in embryo-larval bioassays: Holothuria tubulosa as test species for the assessment of marine pollution. *Science of The Total Environment*, *787*, 147593. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147593 EDN: https://elibrary.ru/XISBXM
11. Rider, C. V. (2024). Toxicology and Risk Assessment of Combined Chemicals and Nonchemical Stressors. *Reference Module in Biomedical Sciences*, Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95488-4.00072-3
12. Sabotič, J., Bayram, E., Ezra, D., Gaudêncio, S. P., Haznedaroğlu, B. Z., Janež, N., Ktari, L., Luganini, A., Mandalakis, M., Safari, I., Simes, D., Strode, E., Toruńska-Sitarz, A., Varamogianni-Mamatsi, D., Varese, G. C., & Vasquez, M. I. (2024). A guide to the use of bioassays in exploration of natural re-

sources. *Biotechnology Advances*, *71*, 108307. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108307 EDN: https://elibrary.ru/AHXUML

13. Sysolyatina, M. A., & Olkova, A. S. (2023). Potentization of the Toxic Effect of Copper in the Presence of Lanthanum in Bioassays for Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea). *Biology Bulletin*, *50*(10), 2677-2680. https://doi.org/10.1134/S1062359023100163 EDN: https://elibrary.ru/CJUPJD

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Олькова Анна Сергеевна, д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры экологии и природопользования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет»
ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Российская Федерация
usr08617@vyatsu.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Anna S. Olkova, Doctor of Biological Sciences, Docent, Professor of the Department of Ecology and Environmental Management
Vyatka State University
36, Moskovskaya Str., 610000, Kirov, Russian Federation
usr08617@vyatsu.ru
SPIN-code: 4874-9240
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5798-8211
ResearcherID: E-8963-2018
Scopus Author ID: 57195523346

Поступила 14.08.2024 Received 14.08.2024
После рецензирования 20.09.2024 Revised 20.09.2024
Принята 23.10.2024 Accepted 23.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1147 **EDN: UTINNW**
UDC 642.7:633.61

Original article

VERMITRANSFORMATION OF BIODEGRADABLE DISPOSABLE TABLEWARE

E.V. Antonova, I.V. Pashkova, A.B. Kupchinsky, S.L. Maximova, D.I. Stom

Аннотация

Background. The recycling efficiency of disposable tableware can be increased with the help of vermiculture. The optimization of the substrate composition on the basis of the potential toxicity of biodegradable tableware and the use of earthworm prefererence reaction is necessary.

Purpose. The aim of this study was to test the potential toxicity of water extracts from biodegradable tableware sold on the Irkutsk market and find the optimal feed mixtures for tableware vermiculture.

Materials and methods. Disposable sugar cane and corn starch tableware were used in the study (Green Mystery, Eco Friendly, etc.). The level of toxicity of the water extracts of the biodegradable samples was measured using the test-objects: small duckweed (Lemna minor L.), the seeds of Lepidium sativum and terrestrial oligochaetes (Eisenia foetida andrei Bouche). Mature worms were put into the substrate to assess the ability of E. foetida to process biodegradable disposable sugar cane tableware.

Results. Biodegradable disposable sugar cane tableware accounts for 23.5 % of the Irkutsk market. Biotesting conducted on the test plants has revealed the safety of sugar cane tableware. The growth rate of duckweed fronds has increased by 5.7-6.3%, there has been an increase by 1.8% in the aqueous corn starch extract. The experiment on oligochaete survival has proved the safety of sugar cane tableware (100 % survival). Corn starch tableware has shown a little toxicity. The length of the sprouts of L. sativum has decreased and made up 20±1.2%, 33±3.5% of earthworms of E. foetida used in biotesting on earthworms were unviable. After earthworm incubation in the substrate with sugar cane tableware the number of young earthworms has gone up by 69.2±3.0%, the cocoons – 154.5±4.5%.

Conclusion. Biodegradable disposable sugar cane tableware can be used for vermitransformation.

Keywords: biodegradable tableware; environmental safety; vermitransformation; biotesting; Lemna minor; Lepidium sativum; Eisenia foetida andrei Bouche

For citation. Antonova, E. V., Pashkova, I. V., Kupchinsky, A. B., Maximova, S. L., & Stom, D. I. (2025). Vermitransformation of biodegradable disposable tableware. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 140-153. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1147

Научная статья

ВЕРМИТРАНСФОРМАЦИЯ ОДНОРАЗОВОЙ БИОРАЗЛАГАЕМОЙ ПОСУДЫ

Е.В. Антонова, И.В. Пашкова, А.Б. Купчинский, С.Л. Максимова, Д.И. Стом

Abstract

Обоснование. Повысить эффективность утилизации одноразовой биоразлагаемой посуды возможно с помощью вермикультуры. Необходима оптимизация состава субстрата на основе учета возможной токсичности биоразлагаемой посуды и использования реакции преференции дождевых червей.

Цель. Проверка возможной токсичности водных вытяжек из биоразлагаемой посуды, реализуемой на Иркутском рынке, и подбор оптимальных кормовых смесей для вермикультивирования с включением био-посуды.

Материалы и методы. Использовали одноразовую посуду из сахарного тростника и кукурузного крахмала («Green Mystery», «Eco Friendly», др.). Оценивали токсичность водных вытяжек из посуды путем биотестирования на трех объектах: ряска малая (Lemna minor L.), семена кресс-салата (Lepidium sativum), почвенные олигохеты (Eisenia foetida andrei Bouche). Для оценки способности E. foetida перерабатывать посуду из сахарного тростника в субстраты запускали половозрелых червей. По истечении экспозиции (42 дня) подсчитывали количество особей на разных этапах развития.

Результаты. Биоразлагаемая посуда из сахарного тростника занимает 23,5% иркутского рынка. Биотестирование показало практически полную безопасность посуды из сахарного тростника. Скорость прироста листецов ряски превысила контроль в 5,7-6,3 раза (из кукурузного крахмала – примерно в 1,8 раза), выживаемость почвенных олигохет составила 100±0%. Выявлена незначительная токсичность посуды из кукурузного крахмала. Уменьшение длины проростков L. sativum составило 20±1,2%, при этом 33±3,5% особей E. foetida

при биотестировании на дождевых червях оказались нежизнеспособными. После инкубации червей в субстрате с посудой из сахарного тростника обнаружено увеличение численности молодых червей на 69,2±3,0%, коконов – на 154,5±4,5%.

Заключение. Выявили безопасность и возможность вермитрансформации биоразлагаемой одноразовой посуды из сахарного тростника.

Ключевые слова: биоразлагаемая посуда; экологическая безопасность; вермитрансформация; биотестирование; Lemna minor; Lepidium sativum; Eisenia foetida andrei Bouche

Для цитирования. Антонова, Е. В., Пашкова, И. В., Купчинский, А. Б., Максимова, С. Л., & Стом, Д. И. (2025). Вермитрансформация одноразовой биоразлагаемой посуды. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 140-153. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1147

Introduction

The principles of sustainable production and responsible consumption are a key issue in shaping the *sustainable development* agenda until 2030. Most states now implement various programmes aimed at a closed-loop economy, natural resource management, environmental and biodiversity conservation, sustainable methods of production and consumer goods. 127 countries have implemented the measures restricting the use of disposable plastic goods. 12 countries have imposed a ban on the production, use and import of disposable tableware [14].

Russia held IX Nevsky International Ecological Congress in May 2021, devoted the projects associated with ecology and environmental protection. One of the vital problems discussed was plastic pollution, the reduction of its use, disposable plastic goods in particular.

There has been a rise in a new market segment for the last 5-6 years. It is the production of disposable tableware from biodegradable polymers, including corn starch and sugar cane. For instance, the share of eco-ware exceeds 40 % in Europe [11]. A number of patents for producing completely biodegradable disposable tableware in the food industry has been registered in Russia (D.A. Koloskov, N.M. Efremov, A.I. Tokunova) [3; 4]. Biodegradable disposable tableware consists of tree bark, moss, cellulose in the form of purified cotton, straw or cake of sunflower seeds, starch of oyster plant or potato starch or oat grain. Zoogloea of tea fungus grown by way of incubation under aerobic conditions on a nutrient medium at room temperature can be used as biodegradable mass. Wheat bran and oilseed meals can also be used to produce biodegradable disposable tableware [9].

The use of *biodegradable polymers* for the production of disposable tableware simplifies its disposal along with organic waste [8]. The use of vermiculture contributes to the efficiency of its disposal, it also increases its speed and makes it possible to get vermicompost (valuable organic fertilizer) [5] и biomass of earthworms [17]. The optimization of the substrate composition on the basis of the potential toxicity of biodegradable tableware and the use of earthworm prefererence reaction is necessary in this case.

Purpose

The objective of the research was to test the potential toxicity of water extracts from biodegradable tableware sold on the Irkutsk market and find the optimal feed mixtures for tableware vermiculture including bio tableware.

Materials and methods

Disposable sugar cane (*Green Mystery*; Russia-China, *Eco Friendly*, the Netherlands); corn starch (trademark is not specified, China) tableware were used in the study.

Water extracts were prepared from the test samples of biodegradable tableware (sugar cane, corn starch). 50 grams of the tableware were grinded, put into the conical flask 750 ml. and 250 ml. of distilled water was added (tableware and water in the ratio of 1:5). The contents of the flask was stirred with a shaker (temperature – 30 °C, the speed of the shaker is 180 rpm.) and filtered through a paper filter. Distilled water was used as the control. The toxicity of the water extracts was evaluated with three methods of biotesting (the optimal temperature – 20-25 °C):

1) increase in the number of *Lemna minor L.* The time exposure was 7 days [6];
2) change in the length of sprouting seeds of *Lepidium sativum;*
3) survival rate of *Eisenia foetida andrei Bouche* [13]. The incubation period of earthworms was 24 hours. Earthworms survival and reactions to external irritation was assessed.

The level of toxicity of tableware water extracts was determined according to the survival index of *Eisenia foetida andrei Bouche*. There was 20 ml. of water extracts being surveyed in Petri dishes (20 replications per a sample). 5 mature worms of the same size were put in the dishes. Water extract was considered safe if the specimen wriggled being exposed to external irritation.

To assess of the ability of oligochaetes to process biodegradable disposable tableware 200 gr. of soil moistened by 100 ml. of distilled water was to put in the polymer container. 50 gr. of shredded tableware sample was mixed with 50 gr. of mashed vegetable waste (beetroot, potato, cabbage, apples) to soften the

tableware. Then the mixture of vegetable waste and tableware was put in the container with moistened soil and 20 mature worms. The state of the worms was monitored throughout the experiment (42 days), the optimal conditions were created for them (humidity – 80-85%, temperature 20-25 °C, mashed vegetable fertilizer (50 gr.) – once every two weeks) [1]. The readings were taken after the exposure time by counting the number of mature, immature, newly hatched species and cocoons. The substrates with the addition of cellulose and sewage disposals were used for the comparison. The control was the soil with mashed vegetables.

Each series of experiments was conducted at least 20 times. Microsoft Excel software package was used *for statistical processing of the obtained data*. The arithmetic value was calculated since this setting is the most likely measured value in the case of normally distributed features. Student's criterion was used to evaluate critical *reliability of differences* compared averages. The conclusion has been made with a high probability of accuracy (P≥0,95).

Materials and methods

There is no mass production of biodegradable tableware on the Irkutsk market. There are only three sellers: *Without plastic* (it accounts for 63% of biodegradable tableware), *Eco-city Irkutsk* (21%) and *Alleya hypermarket* (16%). The assortment of biodegradable tableware can be divided into three commodity groups according to the main types of raw materials: paper, cardboard, wood – 38.8%, corn starch – 36.5%, sugar cane – 23.5%, bamboo – 1.2%. The retail price of sugar cane and tableware is 18 times and corn starch tableware – 10 times more the than the price of plastic tableware (table 1).

Table 1.

Price of disposable tableware from different natural ingredients, Irkutsk City

Type of business	Average price of disposable tableware, roubles				
	Plastic	Sugar cane	Corn starch	Wood	Bamboo
Retail business	1.16	21.24	11.65	14.53	-
Wholesale business	0.87	4.58	2.80	5.47	0.30

Biodegradable disposable sugar cane tableware has the following composition: cellulose (bagasse) – 55%, hemicelluloses – 25%, lignin – 19%, waxes – 1%. Bagasse is dry pulpy fibrous material that remains after crushing sugarcane or sorghum stalks to extract their juice. Waxes increase moisture and fat resistance of tableware. Tableware is milky white, it has soft edges and a velvet-soft surface. The production technology of tableware includes 7 stages:

bagasse grinding and pressing, compressed bagasse cleaning, bagasse boiling, adding components, shaking, drying the mass, molding sheets, forming and stamping products, *disinfection* in an *ultraviolet radiation.*

The advantages of disposable biodegradable sugar cane tableware are environmental friendliness; ease disposal; the lack of carcinogenic risks; high density; thermal resistance; air, moisture and fat resistance; strength and high resistance to deformation.

In its appearance and density corn starch tableware can be taken for tableware from food grade plastic (low density, elasticity). However, there are some differences. Corn starch disposable tableware has pleasant tactile sensations and a light-cream colour. Corn starch disposable tableware has the same advantages as sugar cane but its safety and ecological character have not been proved.

The level of toxicity of the water extracts of the biodegradable samples was measured using test-objects.

The speed growth of duckweed small fronds in the aqueous extract of sugarcane increased on average by 7 times (by 5.7-6.3.34%) compared by the controls. There was an increase by 1.8% in the aqueous corn starch extract. Water extract of corn starch tableware decreased the sum of the stem and root length of *Lepidium sativum* sprouts compared to the control. There was no inhibition in the experiment on sugar cane water extract.

The results of biotesting with the use of the seeding of lepidium sativum were the following. The germinating ability was 100% for sugar crane and 95% for corn starch of control. The aqueous extract of corn starch tableware showed the worst results of the length of the sprout that was the sum of the length of the stem and the root; sugar crane – 89.3-101.2%.

The level of toxicity of water tableware extracts of red Californian earthworm survival from sugar cane was 100±0% (all species maintained their viability, reacted to external irritation as well as the ones in the control cups with water); the survival of the worms in water extracts from corn starch was 67±3.5% (the appearance of the survived species got worse, the surface of the body was irregular, rough; the earthworms were inhibited to external irritation).

The following stage was aimed at researching the ability of vermiculture to process disposable tableware from sugar cane. Different substrates according to the number of alive species and cocoons were compared to analyze the level of survival of *Eisenia foetida* in soil containing tableware from sugar cane.

We collected the data of 6 different substrates including:

1. Vegetable waste (50 gr.);
2. Vegetable waste (50 gr.) and cellulose (2 gr.);

3. Vegetable waste (25 gr.) and cellulose (2.5 gr.);
4. Vegetable waste (50 gr.) and tableware from sugar crane (10 gr.);
5. Vegetable waste (25 gr.) and the sources of waste water overrotten more than 5 years ago (MUP Vodokanal, Irkutsk City) (50 gr.);
6. Sources of waste water overrotten more than 5 years ago (MUP Vodokanal, Irkutsk City) (50 gr.).

There were 20 mature earthworms in each substrate at the beginning of the experiments. The exposure time was 42 days.

On the *basis of the data received* we have come to the conclusion that substrate 2 consisting of 50 grams of vegetable waste and 2 grams of cellulose has shown the best results. Immature earthworms have been found only in this substrate and the number of the cocoons has increased the control 3.6 times. The worst result has substrate 6 including waste water. Earthworms did not breed in this substrate.

Sugar cane tableware in the combination with vegetable waste has high rates of vermiculture breeding and viability that significantly exceeds the control rates. The number of cocoons amounted to 254.5±4.5% of the control, the number of the hatched ones was 169.2±3.0%.

The best substrates for vermiculture are those containing cellulose including bagasse [10]. Cellulose contains nitrogen that is necessary for producing cocoons. Therefore, disposable sugar cane tableware is biodegradable and can be used for vermicomposting since earthworm reproduction rate is really high in such substrate. *The increased mass of coprolites was visually recorded.*

There is currently a growing potential of innovative biotechnology, vermicomposting in particular. [15] Vermicompost are organic materials, produced by the activity of earthworms (*Eisenia fetida,* as a rule) is considered as effective organic fertilizers improving soil fertility and increasing crop yield. Such vermicomposts have high and various microbiological and enzymatic activity, a good physical structure and *high water-holding* capacity. They contain macro and micronutrients, phytohormones and humic substances acting as plant growth regulators. Furthermore, such composts contain antimicrobial compounds and repellents that allow to control the number of phytopathogens and insect-pest.

There is a degree of earthworm intensity in relation to the quantity of material processed in the vermitransformation process, i.e. the capacity of processing organic material per a unit of earthworm biomass [5; 7]. The general empirical rule that is fully consistent with available scientific data: one kilo of earthworms can process about 1 kilo of organic material per day with the moisture of 75-85%. The optimal population of earthworms has been identified as

the following: 9-18 kilos of adult specimen biomass of earthworms per 1 m2 of the working area of a vermicultivator. These data can be used for vermitransformation of substrates including the wastes of bio tableware from sugar cane.

Conclusion

Biotesting conducted on the test plants has revealed the safety of sugar cane tableware: the growth rate of duckweed fronds has increased by 5.7-6.3%, there is an increase by 1.8% in the aqueous corn starch extract. There has been a slight toxicity of corn starch tableware. The decrease in *L. sativum* sprout length by 20±1.2% compared to the control has proved it. 33±3.5% of *E. foetida* turned out to be inviable under the influence of the water extract from corn starch tableware. The experiment has shown the ability of *E. foetida* to process biodegradable disposable sugar cane tableware. There have been 69.2±3.0% of young earthworms and the cocoons (154.5±4.5%) more compared with the control in the substrate containing vegetable waste and the sample of the test tableware (the weight ratio 5:1). Therefore, the safety and possibility of biodegradable disposable tableware of the trademarks of *Green Mystery* and *Eco Friendly* for vermitransformation has been revealed.

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

Sponsorship information. The study was conducted within the framework of the budget project № 121032900077-4 «Ecological diagnostics of changes in some elements of biogeocenoses in the territory of East Siberia».

References

1. Khabarova, T. V., Karyakina, S. D., Titov, I. N., Levin, V. I., & Cherkasov, O. V. (2022). *Bioconversion of organic waste*. Saint Petersburg: Lan'. 144 p. ISBN: 978-5-8114-8940-4 EDN: https://elibrary.ru/XYTJAQ
2. Ovsiannikova, I. V. (2016). New biotesting methods using cress (Lepidium sativum) for environmental monitoring. *Environmental Monitoring Systems*, *108*. EDN: https://elibrary.ru/XSEAKJ
3. Koloskov, D. A., & Efremov, N. M. (2020). Patent No. 2725974 C1 RF, IPC A47G 19/03. Composition and method for producing biodegradable disposable tableware. No. 2020101920: 08.07.2020
4. Tokunova, A. I. (2020). Patent No. 2728206 C1 RF, IPC A47G 19/03, B65D 65/46. Method for manufacturing biodegradable disposable tableware. No. 2019131802: 28.07.2020

5. Titov, I. N., & Boguspaev, K. K. (2019). *Vermiculture: scientific foundations, achievements and prospects*. Almaty: Research Institute of Ecological Problems, Al-Farabi Kazakh National University. 366 p.
6. Tsatsenko, L. V. (2018). Duckweed as a model object in biotesting of aquatic and soil environments. *Oilseed Crops. Scientific and Technical Bulletin of the VNIIMK*, *4*, 3-18. https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-146-151 EDN: https://elibrary.ru/XLIHKA
7. Ratnasari, A., Syafiuddin, A., Mehmood, M. A., & Boopathy, R. (2023). A review of the vermicomposting process of organic and inorganic waste in soils: Additives effects, bioconversion process, and recommendations. *Bioresource Technology Reports*, *21*, 101332. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101332 EDN: https://elibrary.ru/AVGJXU
8. Vikhareva, I. N., Buylova, E. A., Yarmuhametova, G. U., Aminova, G. K., & Mazitova, A. K. (2021). An Overview of the Main Trends in the Creation of Biodegradable Polymer Materials. *Journal of Chemistry*, *2021*, 5099705. https://doi.org/10.1155/2021/5099705 EDN: https://elibrary.ru/IKSSFP
9. Mo, A. (2023). Environmental fate and impacts of biodegradable plastics in agricultural soil ecosystems. *Applied Soil Ecology*, *181*, 104667. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104667 EDN: https://elibrary.ru/GDMMBB
10. Bhat, S. A., Singh, J., & Vig, A. P. (2015). Potential utilization of bagasse as feed material for earthworm Eisenia fetida and production of vermicompost. *Springerplus*, 4:11. https://doi.org/10.1186/s40064-014-0780-y EDN: https://elibrary.ru/SMRPXY
11. Dybka-Stępień, K., Antolak, H., Kmiotek, M., Piechota, D., & Koziróg, A. (2021). Disposable Food Packaging and Serving Materials - Trends and Biodegradability. *Polymers*, *13*(20), 3606. https://doi.org/10.3390/polym13203606 EDN: https://elibrary.ru/IPBFTZ
12. Wang, L., Peng, Y., Xu, Y., Zhang, J., Liu, C., Tang, X., Lu, Y., & Sun, H. (2022). Earthworms' Degradable Bioplastic Diet of Polylactic Acid: Easy to Break Down and Slow to Excrete. *Environmental Science & Technology*, *56*(8), 5020-5028. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08066
13. Stom, D. I., Gelman, M. M., Antonova, E. V., Lozovaya, T. S., & Stom, A. D. (2022). Methodological approaches to assessing the toxicity of compounds by changing the behavioral response of soil oligochaetes. *APEC-IV-2021 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, *990*, 012073. https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012073 EDN: https://elibrary.ru/LBKTUZ
14. Hira, A., Pacini, H., Attafuah-Wadee, K., Vivas-Eugui, D., Saltzberg, M., & Yeoh, T. N. (2022). Plastic Waste Mitigation Strategies: A Review of Lessons

from Developing Countries. *Journal of Developing Societies*, *38*(3), 336-359. https://doi.org/10.1177/0169796X221104855 EDN: https://elibrary.ru/GRCRFF
15. Poornima, S., Dadi, M., Subash, S., Manikandan, S., Karthik, V., Deena, S. R., Balachandar, R., Kumaran, S. K. N., & Subbaiya, R. (2024). Review on advances in toxic pollutants remediation by solid waste composting and vermicomposting. *Scientific African*, *23*, e02100. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02100 EDN: https://elibrary.ru/ZMARJY
16. Juikar, S. K. (2023). Biopolymers for packaging applications: An overview. *Packaging Technology and Science*, *36*(4), 229. https://doi.org/10.1002/pts.2707
17. Antonova, E. V., Titov, I. N., Pashkova, I. V., & Stom, D. I. (2021). Vermiculture as a source of animal protein. *E3S Web of Conferences*, *254*, 08006. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125408006 EDN: https://elibrary.ru/LMDFNO

Список литературы

1. Биоконверсия органических отходов / Хабарова Т.В., Карякина С.Д., Титов И.Н., Левин В.И., Черкасов О.В. (2022). СПб.: Лань, 144 с. ISBN: 978-5-8114-8940-4 EDN: https://elibrary.ru/XYTJAQ
2. Овсянникова, И. В. (2016). Новые методики биотестирования с использованием растений кресс-салата (Lepidium sativum) для экологического контроля окружающей среды. *Системы контроля окружающей среды*, 108. EDN: https://elibrary.ru/XSEAKJ
3. Колосков, Д. А., Ефремов, Н. М. (2020). Патент № 2725974 C1 РФ, МПК A47G 19/03. Состав и способ получения биоразлагаемой одноразовой посуды. № 2020101920: 08.07.2020
4. Токунова, А. И. (2020). Патент № 2728206 C1 РФ, МПК A47G 19/03, B65D 65/46. Способ изготовления биоразлагаемой одноразовой посуды. № 2019131802: 28.07.2020
5. Титов, И. Н., Богуспаев, К. К. (2019). *Вермикультура: научные основы, достижения и перспективы*. Алматы: НИИ проблем экологии КазНУ им. Аль-Фараби, 366 с.
6. Цаценко, Л. В. (2018). Рясковые как модельный объект в биотестировании водной и почвенной среды. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*, *4*, 3-18. https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-146-151 EDN: https://elibrary.ru/XLIHKA
7. Ratnasari, A., Syafiuddin, A., Mehmood, M. A., & Boopathy, R. (2023). A review of the vermicomposting process of organic and inorganic waste in soils: Additives effects, bioconversion process, and recommendations. *Bioresource Technology Reports*, *21*, 101332. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101332 EDN: https://elibrary.ru/AVGJXU

8. Vikhareva, I. N., Buylova, E. A., Yarmuhametova, G. U., Aminova, G. K., & Mazitova, A. K. (2021). An Overview of the Main Trends in the Creation of Biodegradable Polymer Materials. *Journal of Chemistry*, *2021*, 5099705. https://doi.org/10.1155/2021/5099705 EDN: https://elibrary.ru/IKSSFP
9. Mo, A. (2023). Environmental fate and impacts of biodegradable plastics in agricultural soil ecosystems. *Applied Soil Ecology*, *181*, 104667. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104667 EDN: https://elibrary.ru/GDMMBB
10. Bhat, S. A., Singh, J., & Vig, A. P. (2015). Potential utilization of bagasse as feed material for earthworm Eisenia fetida and production of vermicompost. *Springerplus*, 4:11. https://doi.org/10.1186/s40064-014-0780-y EDN: https://elibrary.ru/SMRPXY
11. Dybka-Stępień, K., Antolak, H., Kmiotek, M., Piechota, D., & Koziróg, A. (2021). Disposable Food Packaging and Serving Materials - Trends and Biodegradability. *Polymers*, *13*(20), 3606. https://doi.org/10.3390/polym13203606 EDN: https://elibrary.ru/IPBFTZ
12. Wang, L., Peng, Y., Xu, Y., Zhang, J., Liu, C., Tang, X., Lu, Y., & Sun, H. (2022). Earthworms' Degradable Bioplastic Diet of Polylactic Acid: Easy to Break Down and Slow to Excrete. *Environmental Science & Technology*, *56*(8), 5020-5028. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08066
13. Stom, D. I., Gelman, M. M., Antonova, E. V., Lozovaya, T. S., & Stom, A. D. (2022). Methodological approaches to assessing the toxicity of compounds by changing the behavioral response of soil oligochaetes. *APEC-IV-2021 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, *990*, 012073. https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012073 EDN: https://elibrary.ru/LBKTUZ
14. Hira, A., Pacini, H., Attafuah-Wadee, K., Vivas-Eugui, D., Saltzberg, M., & Yeoh, T. N. (2022). Plastic Waste Mitigation Strategies: A Review of Lessons from Developing Countries. *Journal of Developing Societies*, *38*(3), 336-359. https://doi.org/10.1177/0169796X221104855 EDN: https://elibrary.ru/GRCRFF
15. Poornima, S., Dadi, M., Subash, S., Manikandan, S., Karthik, V., Deena, S. R., Balachandar, R., Kumaran, S. K. N., & Subbaiya, R. (2024). Review on advances in toxic pollutants remediation by solid waste composting and vermicomposting. *Scientific African*, *23*, e02100. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02100 EDN: https://elibrary.ru/ZMARJY
16. Juikar, S. K. (2023). Biopolymers for packaging applications: An overview. *Packaging Technology and Science*, *36*(4), 229. https://doi.org/10.1002/pts.2707
17. Antonova, E. V., Titov, I. N., Pashkova, I. V., & Stom, D. I. (2021). Vermiculture as a source of animal protein. *E3S Web of Conferences*, *254*, 08006. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125408006 EDN: https://elibrary.ru/LMDFNO

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Antonova, Associate Professor of the Department of Socio-Economic and Mathematical Disciplines of the International Institute of Economics and Linguistics, PhD (Biological Sciences), Associate Professor
Irkutsk State University
1, Karl Marks Str., Irkutsk, 664003, Russian Federation
antoshki05@rambler.ru
SPIN-code: 1118-8543
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5681-288X
Scopus Author ID: 57205656202

Irina V. Pashkova, Associate Professor of the Department of European Languages of the International Institute of Economics and Linguistics, PhD (Philological Sciences), Associate Professor
Irkutsk State University
1, Karl Marks Str., Irkutsk, 664003, Russian Federation
ipashkovairk@yandex.ru
SPIN-code: 1558-9752
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4365-2009
Scopus Author ID: 57223678217

Alexander B. Kupchinsky, PhD (Biological Sciences), Director
Baikal Museum of the SB RAS
1, Akademicheskaya Str., 1, Listvyanka village, Irkutsk region, 664520, Russian Federation
albor67@mail.ru
SPIN-code: 5423-3406
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8884-8636
ResearcherID: ABA-4085-2020
Scopus Author ID: 56073214300

Svetlana L. Maximova, PhD (Biological Sciences), Head of Vermitechnology Sector
State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources"
27, Akademicheskaya Str., Minsk, 220072, Republic of Belarus
soilzool@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3118-1321
Scopus Author ID: 24281726700

Devard I. Stom, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of Laboratory; Chief Researcher; Professor
Irkutsk State University; Baikal Museum of the SB RAS; Irkutsk National Research Technical University
1, Karl Marks Str., Irkutsk, 664003, Russian Federation; 1, Akademicheskaya Str., 1, Listvyanka village, Irkutsk region, 664520, Russian Federation; 83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation
stomd@mail.ru
SPIN-code: 7762-9733
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9496-2961
ResearcherID: A-4144-2017
Scopus Author ID: 7003745242

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Антонова Елена Владимировна, доцент кафедры социально-экономических и математических дисциплин Международного института экономики и лингвистики, кандидат биологических наук, доцент
Иркутский государственный университет
ул. Карла Маркса, 1, г. Иркутск, 664003, Российская Федерация
antoshki05@rambler.ru

Пашкова Ирина Владимировна, доцент кафедры европейских языков Международного института экономики и лингвистики, кандидат филологических наук, доцент
Иркутский государственный университет
ул. Карла Маркса, 1, г. Иркутск, 664003, Российская Федерация
ipashkovairk@mail.ru

Купчинский Александр Борисович, кандидат биологических наук, директор

Байкальский музей СО РАН
ул. Академическая, 1, п. Листвянка, 664520, Российская Федерация
albor67@mail.ru

Максимова Светлана Леонидовна, кандидат биологических наук, заведующая сектором вермитехнологий
Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам»
ул. Академическая, 27, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
soilzool@mail.ru

Стом Дэвард Иосифович, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией; главный научный сотрудник; профессор
Иркутский государственный университет; Байкальский музей СО РАН; Иркутский национальный исследовательский технический университет
ул. Карла Маркса, 1, г. Иркутск, 664003, Российская Федерация; ул. Академическая, 1, п. Листвянка, Иркутская область, 664520, Российская Федерация; ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация
stomd@mail.ru

Поступила 24.09.2024 Received 24.09.2024
После рецензирования 01.10.2024 Revised 01.10.2024
Принята 10.10.2024 Accepted 10.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1128 **EDN: UWOZGV**
УДК 528.88: 504.064.37

CC BY NC ND

Научные обзоры

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДЕКСА ICE ДЛЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ИРРИГАЦИОННЫХ МАССИВОВ И СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ

И.Ю. Савин, А.Г. Терехов, Р.И. Мухамедиев

Аннотация

Обоснование. В мире около половины сельскохозяйственных культур возделывается при орошении, которое оказывает влияние на климат полей, а также может повышать комфортность окружающей среды для человека. Развитие спутниковых технологий открыло возможности оперативного и низкозатратного мониторинга охлаждающего эффекта орошения Irrigation Cooling Effect (ICE). Это направление исследований проходит стадию становления, что предопределяет актуальность выявления текущего тренда его развития.

Цель. Провести анализ научной литературы в области использования спутникового индекса ICE для мониторинга орошаемых земель, выявить основные направления развития и научные центры.

Материалы и методы. В качестве основного источника информации использовались сведения наукометрических баз данных Scopus и РИНЦ. На конкретном примере показана связь ICE с NDVI для орошаемого массива СУАР в КНР.

Результаты. Анализ первоисточников показал, что в настоящее время ICE используется в основном для оценки охлаждающего эффекта орошения посевов и их водопотребления, охлаждающего эффекта растительности городов, для оценки влияния смены наземного покрова на локальный и региональный климат. Основными центрами исследований являются научные организации Китая и США, что подтверждается количеством научных публикаций и их цитируемостью. Перспективным направлением является использование ICE для оперативного спутникового мониторинга посевов (в том числе и неорошаемых).

Заключение. Таким образом, ICE может рассматриваться как полезное дополнение к обычно используемому при спутниковом мониторинге посевов

индексу NDVI, что обуславливает все более широкое использование данного индекса в мире, особенно для мониторинга орошаемых земель.

Ключевые слова: охлаждающий эффект ирригации; MODIS; NDVI; LST; орошение посевов; спутниковый мониторинг посевов

Для цитирования. Савин, И. Ю., Терехов, А. Г., & Мухамедиев, Р. И. (2025). Использование индекса ICE для спутникового мониторинга ирригационных массивов и состояния земель. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 154-175. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1128

Scientific Reviews

USE OF ICE INDEX FOR SATELLITE MONITORING OF IRRIGATION MASSIFS AND LAND CONDITIONS

I.Yu. Savin, A.G. Terekhov, R.I. Mukhamediev

Abstract

Background. Globally, about half of the world's crops are cultivated under irrigation, which affects the climate of the fields and can also increase the comfort of the environment for humans. The development of satellite technologies has opened up opportunities for rapid and low-cost monitoring of the Irrigation Cooling Effect (ICE). This area of research is in its infancy, which predetermines the relevance of identifying the current trend of its development.

Purpose. To analyze scientific literature in the field of ICE satellite index use for irrigated lands monitoring, to identify main directions of development and research centers.

Materials and methods. Information from the Scopus and RSCI databases was used as the main source of information. The case study demonstrates the relationship between ICE and NDVI for the XUAR irrigated area in the PRC.

Results. Analysis of primary literature sources has shown that at present ICE is used mainly to assess the cooling effect of irrigated crop and its water consumption, the cooling effect of urban vegetation, and to assess the impact of land cover change on local and regional climate. The main research centers are scientific organizations of China and the USA, which is confirmed by the number of scientific publications and amount of their citations. A promising direction is the use of ICE for operational satellite monitoring of crops (including rain-fed crops).

Conclusion. Thus, ICE can be regarded as a useful complement to the NDVI index commonly used in satellite crop monitoring, which causes the increasing use of this index in the world, especially for irrigated land monitoring.

Keywords: cooling irrigation effect; MODIS; NDVI; LST; crop irrigation; satellite-based crop monitoring

For citation. Savin, I. Yu., Terekhov, A. G., & Mukhamediev, R. I. (2025). Use of ICE index for satellite monitoring of irrigation massifs and land condition. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 154-175. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1128

Введение

Урожайность сельскохозяйственных культур предопределяется такими факторами как приходом солнечной радиации, температурными и влажностными условиями, а также доступностью для роста растений питательных элементов [38]. Неоптимальность этих условий ведет к падению урожайности или полной непригодности земель для возделывания сельскохозяйственных культур. Путем дополнительных вложений человек может регулировать условия роста растений (от внесения удобрений до строительства теплиц с полным регулированием внешних условий), но это ведет к повышению себестоимости растениеводства и снижает его экономическую эффективность [2]. Оптимальным является размещение растениеводства в регионах с наиболее благоприятными внешними условиями. Но количество таких земель в мире сильно ограничено [15]. В результате поиска человечеством баланса оптимальности внешних условий и вложений на преодоление неоптимальности сложилась ситуация, когда большая часть пахотных земель в мире расположена в условиях недостатка влаги, где присутствуют оптимальные температуры воздуха и большое количество приходящей солнечной радиации, а регулируется лишь водный (орошением) и питательный (внесением удобрений) режимы возделывания сельскохозяйственных культур.

В настоящее время в мире около половины сельскохозяйственных культур возделывается при орошении [35] и на него приходится около 70% от всего потребления пресной воды в мире [13; 33; 34]. В условиях значительного превышения испаряемости над выпадающими осадками, обводнение территорий является необходимым условием для формирования сельскохозяйственной растительности. Ирригация сопровождается изменениями температурного режима подстилающей поверхности. Увлажнение корнеобитаемого слоя почвы за счет ирригационной инфраструктуры приводит к росту и развитию растительности. А испарение воды через листовое покрытие и с поверхности почвы сопровождается поглощением тепла и охлаждением подстилающей поверхности. Этот эффект известен под на-

званием Irrigation Cooling Effect (ICE). Практически, ICE представляет собой разницу температур между природным фоном и расположенным в нем ирригационным массивом (рис.1). Масштаб снижения температуры подстилающей поверхности зависит от температуры воздуха, его влажности, скорости ветра и прочих факторов и может быть довольно велик, до 20 градусов цельсия. Существующие спутниковые данные дистанционного зондирования в ИК-диапазоне позволяют с высокой точностью регистрировать температурные эффекты такого масштаба.

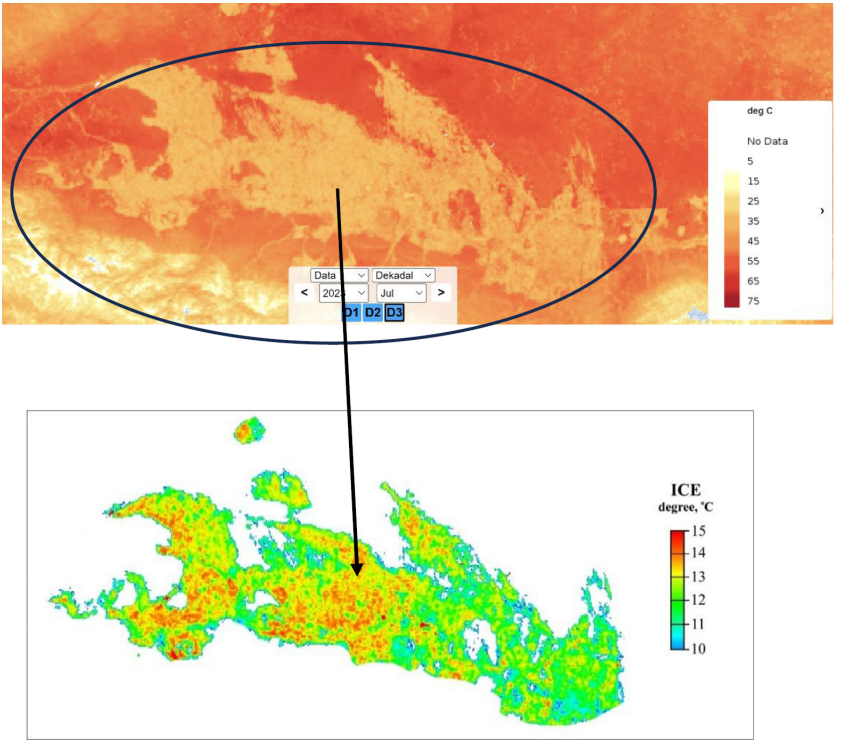


Рис. 1. Примеры температурного поля (LST eVIRS) (вверху) и рассчитанных по ним значений ICE для ирригационных массивов пашни северо-восточных предгорий Восточного Тянь-Шаня на 3-ю декаду 2023 года по данным LST_eVIIRS_Data_Dekadal (внизу)

Использование воды на орошение сельскохозяйственных культур оказывает влияние и на локальные изменения климата, на понижение тем-

пературы окружающей среды [7], что в свою очередь во многом может повышать комфортность окружающей среды для человека [23], а также улучшать температурные условия для роста сельскохозяйственных культур [46]. Рядом работ показано, что охлаждающий эффект от орошения может даже компенсировать потепление, обусловленное антропогенным выбросом в атмосферу парниковых газов [16; 20; 22; 29].

В связи с этим, мониторинг потребления воды на орошение сельскохозяйственных культур и связанный с этим охлаждающий эффект на подстилающей поверхности, имеет большое практическое значение. Традиционно, учет количества используемой для орошения воды ведется с помощью статистической обработки данных с наземных водомерных пунктов [10]. Этим методам, как и всем статистическим, присущи такие недостатки как неоперативность, трудоемкость и, часто, субъективность, пропуски данных и присутствие ошибок в данных. Изменение температуры воздуха близ орошаемых массивов может фиксироваться метеостанциями, но их количество (особенно в развивающихся странах) до сих пор очень мало для получения точной информации.

В аридном и жарком климате сельскохозяйственное землепользование требует для ирригации посевов большое количество пресной воды. Очень часто единственным её источником являются поверхностные воды в виде крупных рек, аккумулирующих сток в высокогорных зонах. Эти крупные и протяженные реки, как правило, являются трансграничными. Внутриконтинентальные крупные реки снежно-ледового питания имеют значительные межгодовые колебания в объемах стока, вызванные вариативностью погодных условий. Это создает проблемы вододеления и обуславливает конкуренцию за воду между странами верхних и нижних частей трансграничных речных бассейнов особенно в маловодные годы. Использование спутниковой информации открыло новые возможности для создания более точных, оперативных и объективных методов мониторинга сельскохозяйственного водопотребления, основанного на изменениях параметров окружающей среды, в том числе и ICE.

Основными направлениями исследований, связанных с ICE, являются разработка методов спутниковой оценки влажности почв [30], температуры их поверхности [25], оценки запасов воды в водохранилищах и естественных водоемах и их оперативного мониторинга [26], мониторинга открытой водной поверхности на сельскохозяйственных полях [1]. Одним из перспективных направлений развития в данной области науки является спутниковый анализ охлаждающего эффекта орошения (ICE) [4,40,41].

Цель исследования

Целью данной статьи являлся обзор научной литературы в области использования ICE в различных прикладных задачах, включая спутниковый мониторинг орошаемых сельскохозяйственных земель.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта анализа выступили публикации в научной литературе, проиндексированной в наукометрических базах данных РИНЦ (https://elibrary.ru/defaultx.asp) и Scopus (https://www.scopus.com/). Поиск в базах данных был осуществлен на 15 июня 2024 года по ключевым словам «ICE, remote sensing, irrigation cooling» (Scopus) и «ICE, спутниковый мониторинг, охлаждающий эффект орошения» (РИНЦ) в названиях, резюме и ключевых словах статей, книг и сборниках материалов конференций без ограничений по времени выхода публикации. Всего, после исключения повторений, было найдено 25 публикаций, из них 2 – на русском языке и 23 – на английском.

Перечень найденных публикаций приведен в Таблице 1.

Таблица 1.

Проанализированные публикации и их направленность

научная направленность публикации	ссылки на статьи
Оценка охлаждающего эффекта при орошении	[5,7,14,21,24,27,32,39,40,44-47]
Оценка охлаждающего эффекта растительности на температуру воздуха в городах	[8,12,19,36]
Оценка изменений температуры воздуха при изменении типа землепользования	[6,31,43]
Спутниковый контроль над водопотреблением посевов	[4,37,42]
Усовершенствование метода расчета ICE	[18]
Оценка охлаждающего эффекта ветряных электростанций	[28]

Был проведен анализ времени выхода публикаций в свет, их направленности, цитируемости, первоисточника (журнала и т.п.), страны и аффилиации авторов.

Демонстрация отдельных аспектов использования индекса ICE проведено на примере орошаемого массива СУАР КНР, расположенного на северной предгорной равнине Восточного Тянь-Шаня (хребты Боро-Хоро и Укэн-Хабырга) с экстрааридным климатом (рис.2). Использованы продукты MOD13Q1 (16-days) и LST [Terra] (8 days).

Результаты и обсуждение

Охлаждающий эффект от орошения (ICE) известен в метеорологии достаточно давно [3], но широкие возможности для его площадного анализа стали доступны лишь после появления рядов детальных спутниковых данных о наземной температуре (LST). Поэтому первые публикации по возможности оценки ICE на основе спутниковых данных появились в 2011-2012 годах [36; 47]. Но основное их количество было опубликовано за последние 5 лет (рис. 3).

Две третьи всех публикаций базируется на анализе данных LST MODIS, остальные – на анализе данных LST Landsat. Это предопределяет то, что большая часть публикаций носит региональный или глобальный характер, и лишь некоторые из них посвящены исследованиям на локальном уровне.



Рис. 2. Расположение орошаемого массива предгорий хребтов Восточного Тянь-Шаня (хребет Боро-Хоро и Укэн-Хабырга) в бассейнах озер Манас и Эби-Нур для демонстрации отдельных аспектов использования ICE [4]

Основные научные центры исследований в данном направлении сосредоточены в США и КНР. Вместе специалисты из этих стран издали около 2/3 всех публикаций по теме дистанционной оценки ICE. Больше всего публикаций (около 60%) издано авторами с аффилиацией Китайской академии наук и Пекинского нормального университета.

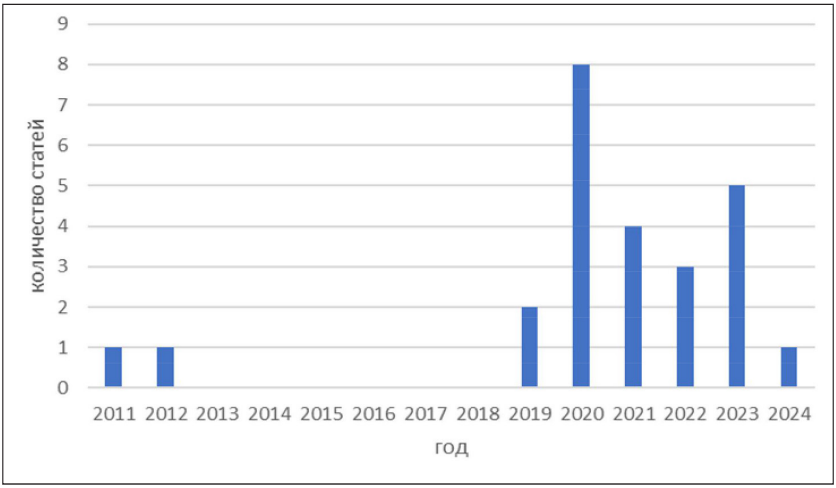


Рис. 3. Количество статей по теме оценки ICE на основе спутниковых данных

Больше всего статей по данному научному направлению опубликовано в журналах Science Of The Total Environment (4 статьи), Agricultural And Forest Meteorology (3), Urban Climate (2), Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (2), Remote Sensing (2), Journal Of Geophysical Research Atmospheres (2).

Самыми цитируемыми на середину июня 2024 года являются статьи [24] (65 ссылок), [40] (60 ссылок) и [32] (55 ссылок).

Тематическая научная направленность публикаций представлена в Таблице 1. Ожидаемо наибольшее количество публикаций было посвящено оценке эффекта охлаждения при орошении посевов сельскохозяйственных культур (13 публикаций). Практически все авторы ограничивались количественной оценкой эффекта охлаждения. Теоретически, охлаждающий эффект может быть обусловлен как влиянием более низкой температуры самой воды, используемой для орошения, так и транспирацией листьев растений [17]. Но, возможности разделение влияния этих факторов до сих пор остаются неисследованными, несмотря на потенциально большую практическую значимость оперативного получения подобной информации.

Вторым по количеству публикаций направлением является использование индекса ICE для оценки охлаждающего эффекта растительности на температуру воздуха в городах (4 публикации). Это направление не имеет отношения к орошению посевов, но в данных публикациях показано, что

этот индекс может служить надежным индикатором охлаждения городов, в большей степени связанного именно с транспирацией растительности.

Публикации рассмотренных двух направлений и наличие многолетних рядов спутниковых данных о LST предопределили возможность использования индекса ICE для оценки изменений температурного режима территории в результате изменения наземного покрова и типа землепользования. Три публикации демонстрируют возможности индекса в этом научном направлении.

Также три статьи посвящены анализу возможностей использования ICE для мониторинга водопотребления орошаемых посевов.

В одной статье [18] рассмотрен сам метод вычисления ICE и предложены подходы к их усовершенствованию. И еще одна статья посвящена достаточно экзотическому анализу на основе ICE охлаждающего эффекта от действия ветряных электростанций [28].

Проведенный анализ показал, что данное научное направление находится только в начале своего развития. Но потенциал расширения направлений его использования в ближайшем будущем не вызывает сомнений. Одним из наиболее перспективных, по-видимому, является использование индекса ICE (как индикатора водного режима растений) для мониторинга состояния посевов и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.

Проведенный нами анализ для орошаемого массива СУАР (КНР) показал, что значение ICE хорошо коррелирует со значениями NDVI (рис. 4).

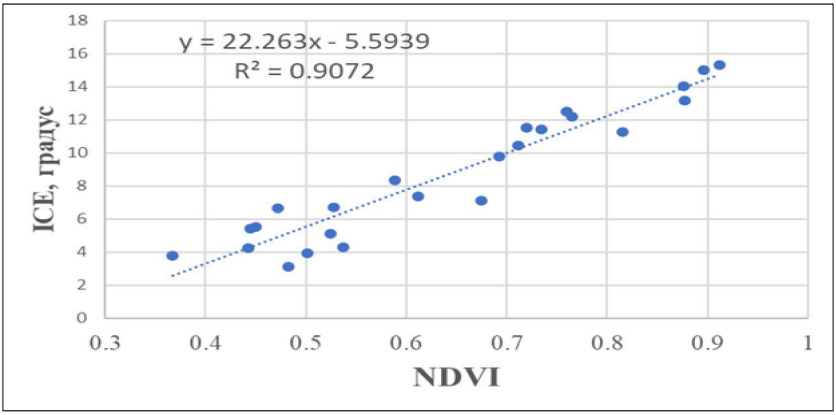


Рис. 4. Взаимосвязь осредненных многолетних значений NDVI (Terra MODIS) с ICE для орошаемого массива СУАР

В отличии от известных вегетационных индексов (NDVI и др.), опирающихся на спутниковые каналы в оптическом диапазоне (Red, NIR и др.), ICE полностью базируется тепловой съемке. Таким образом, ICE характеризует интенсивность эвапотранспирации с листовой поверхности/почвы и формально, на прямую, не связан с содержанием хлорофилла в листьях. В случаях, когда объектом исследования является обзорный многолетний мониторинг массивов поливной пашни и высокое пространственное разрешение спутниковых данных не является необходимым условием, ICE имеет информационную насыщенность схожую с NDVI (ICE\NDVI R^2= (0.88 – 0,91) по временной шкале, и R^2=0,9 по пространственной согласованности). Однако принципиальное различие физических основ анализируемых параметров (тепловая съемка против съемки в оптических каналах) обеспечивает получение независимой от оптических данных картины многолетних изменений в состоянии поливной пашни, с упором на оценку интенсивности эвапотранспирации, а следовательно, и водообеспеченности посевов. Для сравнения на рисунке 5 приведены примеры временного профиля NDVI и ICE для двух временных периодов.

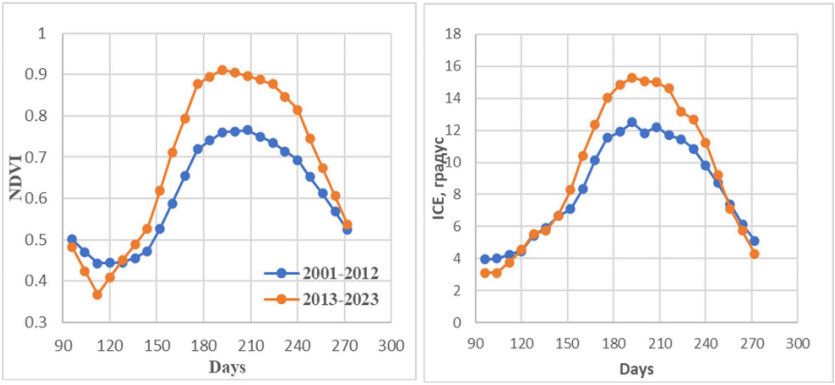


Рис. 5. Временные профили осредненных многолетних значений NDVI (Terra MODIS) с ICE для орошаемого массива СУАР

Дополнительным преимуществом ICE должно являться, по-видимому, и отсутствие насыщения индекса, которое характерно для NDVI [9; 11].

Выводы

Использование индекса ICE для спутникового мониторинга растительности, ее водопотребления и орошения находится в начале своего раз-

вития. В большинстве случаев в настоящее время ICE используется для оценки охлаждающего эффекта орошения посевов и их водопотребления, охлаждающего эффекта растительности городов, для оценки влияния смены наземного покрова на локальный и региональный климат. Основными центрами исследований в данном направлении являются научные организации Китая (научные организации Академии наук Китая) и США, что подтверждается и количеством научных публикаций и их цитируемостью.

Перспективным направлением является использование ICE для оперативного спутникового мониторинга посевов (в том числе и неорошаемых). Этот индекс имеет потенциал получения дополнительной информации к традиционно используемому в таких случаях вегетационному индексу NDVI.

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

Информация о спонсорстве. Исследования были поддержаны комитетом науки, министерство науки и высшего образования Республики Казахстан, гранты № BR21881908; BR24992908.

Список литературы

1. Абаев, Н. Н., Сагатдинова, Г. Н., Маглинец, Ю. А., Амиргалиев, Е. Н., Савин, И. Ю., & Терехов, А. Г. (2023). Спутниковый мониторинг зимней промывки пашни от вторичного засоления на примере ирригационного массива «Голодная степь» (Казахстан). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, *20*(3), 152-163. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163 EDN: https://elibrary.ru/GWEJTE
2. Савин, И. Ю. (2020). Пространственные аспекты прикладного почвоведения. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*, *101*, 5-18. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18 EDN: https://elibrary.ru/XOVGZT
3. Скворцов, А. А. (1964). *Орошение сельскохозяйственных полей и микроклимат*. Л.: ГИМИЗ, 277 с.
4. Терехов, А. Г. (2020). Спутниковая диагностика изменений сельскохозяйственного водообеспечения Синьцзян-Уйгурского автономного района КНР на основе эффекта охлаждения поверхности пашни при ирригации по данным 2002-2019 гг. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, *17*(7), 131-141. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141 EDN: https://elibrary.ru/MTQRDA

5. Терехов, А. Г., Абаев, Н. Н., Маглинец, Ю. А. (2021). Спутниковый мониторинг состояния оазисов реки Амударьи в период 2003-2020 гг. на основе анализа эффекта охлаждения территорий в результате их ирригации. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, *18*(5), 123-132. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132 EDN: https://elibrary.ru/VVWEGH
6. Akinyemi, F. O., Ikanyeng, M., & Muro, J. (2019). Land cover change effects on land surface temperature trends in an African urbanizing dryland region. *City and Environment Interactions*, *4*, 100029. https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100029 EDN: https://elibrary.ru/QDKYQU
7. Albaladejo-García, J. A., Alcon, F., & Martínez-Paz, J. M. (2020). The Irrigation Cooling Effect as a Climate Regulation Service of Agroecosystems. *Water*, *12*, 1553. https://doi.org/10.3390/w12061553 EDN: https://elibrary.ru/DZTZTW
8. Allen, M. A., Roberts, D. A., & McFadden, J. P. (2021). Reduced urban green cover and daytime cooling capacity during the 2012-2016 California drought. *Urban Climate*, *36*, 100768. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100768 EDN: https://elibrary.ru/RRXUZZ
9. Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., & Hatfield, J. L. (1984). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. *Agron. J.*, *76*, 300-306. https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x
10. Batchelor, C., Hoogeveen, J., Faurès, J. M., & Peiser, L. (2016). *Water accounting and auditing - A sourcebook*. FAO WATER REPORTS 43. Rome: FAO, 232 p.
11. Chen, P. Y., Fedosejevs, G., Tiscareño-LóPez, M., & Arnold, J. G. (2006). Assessment of MODIS-EVI, MODIS-NDVI and VEGETATION-NDVI Composite Data Using Agricultural Measurements: An Example at Corn Fields in Western Mexico. *Environ Monit Assess*, *119*, 69-82. https://doi.org/10.1007/s10661-005-9006-7 EDN: https://elibrary.ru/ITUORM
12. Coleman, R. W., Stavros, N., Hulley, G., & Parazoo, N. (2020). Comparison of thermal infrared-derived maps of irrigated and non-irrigated vegetation in urban and non-urban areas of southern California. *Remote Sensing*, *12*(24), 4102. https://doi.org/10.3390/rs12244102 EDN: https://elibrary.ru/VGPQQE
13. Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: A global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.*, *4*, 035006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006 EDN: https://elibrary.ru/OMQJVH
14. Dong, J., Pang, Z., Lin, S., Zhang, X., Xie, Z., Ren, P., Zhang, X., & Yuan, W. (2024). Cotton lands induced cooling effect on land surface temperature in Xin-

jiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *351*, 110004. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110004 EDN: https://elibrary.ru/BAUECQ

15. Fischer, G., van Velthuizen, H. T., Shah, M. M., & Nachtergaele, F. O. (2002). *Global Agroecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria: RR-02-02, 155 p.
16. Gao, K., Santamouris, M., & Feng, J. (2020). On the cooling potential of irrigation to mitigate urban heat island. *Sci. Total Environ.*, *740*, 139754. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139754 EDN: https://elibrary.ru/IYNCII
17. Hou, M., Tian, F., Zhang, T., & Huang, M. (2019). Evaluation of canopy temperature depression, transpiration, and canopy greenness in relation to yield of soybean at reproductive stage based on remote sensing imagery. *Agric. Water Manag.*, *222*, 182-192. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.005
18. Hou, M., Zhao, L., & Lin, A. (2023). Irrigation Cooling Effect on Local Temperatures in the North China Plain Based on an Improved Detection Method. *Remote Sens.*, *15*, 4571. https://doi.org/10.3390/rs15184571 EDN: https://elibrary.ru/NYVFOZ
19. Kucera, D., & Jenerette, G. D. (2023). Urban greenness and its cooling effects are influenced by changes in drought, physiography, and socio-demographics in Los Angeles, CA. *Urban Climate*, *52*, 101743. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101743 EDN: https://elibrary.ru/PKGLZP
20. Kueppers, L. M., Snyder, M. A., & Sloan, L. C. (2007). Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophys. Res. Lett.*, *34*, L03703. https://doi.org/10.1029/2006GL028679
21. Lawston, P. M., Santanello, J. A., Jr., Hanson, B., & Arsensault, K. (2020). Impacts of irrigation on summertime temperatures in the pacific northwest. *Earth Interactions*, *24*(1), 1. https://doi.org/10.1175/ei-d-19-0015.1 EDN: https://elibrary.ru/BQTKUO
22. Li, D., Chen, Y., Hu, T., Cui, Y., Luo, Y., Luo, H., & Meng, Q. (2020). Climate changes in the Lhasa River basin, Tibetan Plateau: Irrigation induced cooling along with a warming trend. *Theor. Appl. Climatol.*, *140*, 1043-1054. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03146-y EDN: https://elibrary.ru/MLEQAS
23. Li, M. (2024). Research on the effects of extreme heat exposure on human health. *Theoretical and Natural Science*, *29*, 194-199. https://doi.org/10.54254/2753-8818/29/20240777 EDN: https://elibrary.ru/BQKVKA
24. Li, Y., Guan, K., Peng, B., Franz, T. E., Wardlow, B., & Pan, M. (2020). Quantifying irrigation cooling benefits to maize yield in the US Midwest. *Global Change Biology*, *26*(5), 3065-3078. https://doi.org/10.1111/gcb.15002 EDN: https://elibrary.ru/UQBZXM

25. Li, Z.-L., Wu, H., Duan, S.-B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., Leng, P., Tang, R., Ye, X., Zhu, J., Sun, Y., Si, S., Liu, M., Li, J., Zhang, X., Shang, G., Tang, B.-H., Yan, G., & Zhou, C. (2022). Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics.*, *61*, e2022RG000777. https://doi.org/10.1029/2022RG000777 EDN: https://elibrary.ru/YASDOG
26. Lin, Y., Li, X., Zhang, T., Chao, N., Yu, J., Cai, J., & Sneeuw, N. (2020). Water Volume Variations Estimation and Analysis Using Multisource Satellite Data: A Case Study of Lake Victoria. *Remote Sensing*, *12*(18), 3052. https://doi.org/10.3390/rs12183052 EDN: https://elibrary.ru/OYXBLN
27. Liu, J., Jin, J., & Niu, G.-Y. (2021). Effects of Irrigation on Seasonal and Annual Temperature and Precipitation over China Simulated by the WRF Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(10), e2020JD034222. https://doi.org/10.1029/2020jd034222 EDN: https://elibrary.ru/CKHLTN
28. Liu, N., Zhao, X., Zhang, X., Zhao, J., Wang, H., & Wu, D. (2023). Remotely sensed evidence of the divergent climate impacts of wind farms on croplands and grasslands. *Science of the Total Environment*, *905*, 167203. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167203 EDN: https://elibrary.ru/WMEXBO
29. Lobell, D. B., Bonfils, C. J., Kueppers, L. M., & Snyder, M. A. (2008). Irrigation cooling effect on temperature and heat index extremes. *Geophys. Res. Lett.*, *35*, L09705. https://doi.org/10.1029/2008GL034145 EDN: https://elibrary.ru/MEZNKF
30. Mu, T., Liu, G., Yang, X., & Yu, Y. (2023). Soil-Moisture Estimation Based on Multiple-Source Remote-Sensing Images. *Remote Sensing*, *15*(1), 139. https://doi.org/10.3390/rs15010139 EDN: https://elibrary.ru/TSTQEM
31. Pan, T., Zhang, C., Kuang, W., Luo, G., Du, G., & Yin, Z. (2020). Large-scale rain-fed to paddy farmland conversion modified land-surface thermal properties in Cold China. *Science of the Total Environment*, *722*, 137917. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137917 EDN: https://elibrary.ru/VPQTHT
32. Shah, H. L., Zhou, T., Huang, M., & Mishra (2019). Strong Influence of Irrigation on Water Budget and Land Surface Temperature in Indian Subcontinental River Basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(3), 1449-1462. https://doi.org/10.1029/2018JD029132
33. Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water Int.*, *25*, 11-32. https://doi.org/10.1080/02508060008686794 EDN: https://elibrary.ru/LGHWKX
34. Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation-A global inventory. *Hydrol.*

Earth Syst. Sci., *14*, 1863-1880. https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010 EDN: https://elibrary.ru/OLGCBP

35. Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J. M., Frenken, K., & Feick, S. (2005). Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *9*, 535-547. https://doi.org/10.5194/hess-9-535-2005 EDN: https://elibrary.ru/LZZIDH
36. Tan, C.-H., Chu, T.-W., & Jao, C.-C. (2011). Cooling effect range assessment of paddy fields in urban neighborhood by Landsat thermal imagery. In *32nd Asian Conference on Remote Sensing 2011, ACRS 2011* (Vol. 3, pp. 1857-1862).
37. Terekhov, A., & Abayev, N. (2020). Irrigation cooling effect: Opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin, Central Asia. *E3S Web of Conferences*, *223*, 02009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022302009 EDN: https://elibrary.ru/EFLHOB
38. van Keulen, H., & Wolf, J. (1986). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, pp. 235-247.
39. Wang, Z., Vivoni, E. R., Bohn, T. J., & Wang, Z.-H. (2021). A Multiyear Assessment of Irrigation Cooling Capacity in Agricultural and Urban Settings of Central Arizona. *Journal of the American Water Resources Association*, *57*(5), 771-788. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12920
40. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations. *Science of the Total Environment*, *705*, 135984. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135984 EDN: https://elibrary.ru/DDZSII
41. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Global assessment of the impact of irrigation on land surface temperature. *Science Bulletin*, *65*(17), 1440-1443. https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.04.005 EDN: https://elibrary.ru/MRLEHK
42. Zhang, C., Dong, J., Leng, G., Doughty, R., Zhang, K., Han, S., Zhang, G., Zhang, X., & Ge, Q. (2023). Attenuated cooling effects with increasing water-saving irrigation: Satellite evidence from Xinjiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *333*, 109397. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109397 EDN: https://elibrary.ru/SZUKJF
43. Zhang, C., Ge, Q., Dong, J., Zhang, X., Li, Y., & Han, S. (2023). Characterizing spatial, diurnal, and seasonal patterns of agricultural irrigation expansion-induced cooling in Northwest China from 2000 to 2020. *Agricultural and Forest Meteorology*, *330*, 109304. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109304 EDN: https://elibrary.ru/DUVCKR
44. Zhang, F., Peng, K., & Zhang, F. (2022). Spatial distribution characteristics of land surface temperature and its “source-sink” effect in Yanqi Basin, Xinji-

ang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *38*(16), 153-161.

45. Zhang, Z., Lin, A., Zhao, L., & Zhao, B. (2022). Attribution of local land surface temperature variations response to irrigation over the North China Plain. *Science of the Total Environment*, *826*, 154104. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154104 EDN: https://elibrary.ru/VVPALD
46. Zhu, P., & Burney, J. (2022). Untangling irrigation effects on maize water and heat stress alleviation using satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, *26*(3), 827-840. https://doi.org/10.5194/hess-26-827-2022 EDN: https://elibrary.ru/ZVSAOD
47. Zhu, X., Liang, S., & Pan, Y. (2012). Observational evidence of the cooling effect of agricultural irrigation in Jilin, China. *Climatic Change*, *114*(3-4), 799-811. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0435-3 EDN: https://elibrary.ru/HZMVUW

References

1. Abaev, N. N., Sagatdinova, G. N., Maglinets, Yu. A., Amirgaliiev, E. N., Savin, I. Yu., & Terekhov, A. G. (2023). Satellite monitoring of winter leaching of arable land from secondary salinization on the example of the "Golodnaya Steppe" irrigation area (Kazakhstan). *Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, *20(3)*, 152-163. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163 EDN: https://elibrary.ru/GWEJTE
2. Savin, I. Yu. (2020). Spatial aspects of applied soil science. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*, *101*, 5-18. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18 EDN: https://elibrary.ru/XOVGZT
3. Skvortsov, A. A. (1964). *Irrigation of agricultural fields and microclimate*. Leningrad: GIMIZ. 277 p.
4. Terekhov, A. G. (2020). Satellite diagnostics of changes in agricultural water supply of the Xinjiang Uygur Autonomous Region of the PRC based on the surface cooling effect of irrigated farmland based on data from 2002 to 2019. *Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, *17(7)*, 131-141. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141 EDN: https://elibrary.ru/MTQRDA
5. Terekhov, A. G., Abaev, N. N., & Maglinets, Yu. A. (2021). Satellite monitoring of the state of the Amu Darya oases during the period from 2003 to 2020 based on the analysis of the cooling effect of the territories as a result of their irrigation. *Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, *18(5)*, 123-132. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132 EDN: https://elibrary.ru/VVWEGH

6. Akinyemi, F. O., Ikanyeng, M., & Muro, J. (2019). Land cover change effects on land surface temperature trends in an African urbanizing dryland region. *City and Environment Interactions*, *4*, 100029. https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100029 EDN: https://elibrary.ru/QDKYQU
7. Albaladejo-García, J. A., Alcon, F., & Martínez-Paz, J. M. (2020). The Irrigation Cooling Effect as a Climate Regulation Service of Agroecosystems. *Water*, *12*, 1553. https://doi.org/10.3390/w12061553 EDN: https://elibrary.ru/DZTZTW
8. Allen, M. A., Roberts, D. A., & McFadden, J. P. (2021). Reduced urban green cover and daytime cooling capacity during the 2012-2016 California drought. *Urban Climate*, *36*, 100768. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100768 EDN: https://elibrary.ru/RRXUZZ
9. Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., & Hatfield, J. L. (1984). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. *Agron. J.*, *76*, 300-306. https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x
10. Batchelor, C., Hoogeveen, J., Faurès, J. M., & Peiser, L. (2016). *Water accounting and auditing - A sourcebook*. FAO WATER REPORTS 43. Rome: FAO, 232 p.
11. Chen, P. Y., Fedosejevs, G., Tiscareño-LóPez, M., & Arnold, J. G. (2006). Assessment of MODIS-EVI, MODIS-NDVI and VEGETATION-NDVI Composite Data Using Agricultural Measurements: An Example at Corn Fields in Western Mexico. *Environ Monit Assess*, *119*, 69-82. https://doi.org/10.1007/s10661-005-9006-7 EDN: https://elibrary.ru/ITUORM
12. Coleman, R. W., Stavros, N., Hulley, G., & Parazoo, N. (2020). Comparison of thermal infrared-derived maps of irrigated and non-irrigated vegetation in urban and non-urban areas of southern California. *Remote Sensing*, *12*(24), 4102. https://doi.org/10.3390/rs12244102 EDN: https://elibrary.ru/VGPQQE
13. Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: A global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.*, *4*, 035006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006 EDN: https://elibrary.ru/OMQJVH
14. Dong, J., Pang, Z., Lin, S., Zhang, X., Xie, Z., Ren, P., Zhang, X., & Yuan, W. (2024). Cotton lands induced cooling effect on land surface temperature in Xinjiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *351*, 110004. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110004 EDN: https://elibrary.ru/BAUECQ
15. Fischer, G., van Velthuizen, H. T., Shah, M. M., & Nachtergaele, F. O. (2002). *Global Agroecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria: RR-02-02, 155 p.

16. Gao, K., Santamouris, M., & Feng, J. (2020). On the cooling potential of irrigation to mitigate urban heat island. *Sci. Total Environ.*, *740*, 139754. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139754 EDN: https://elibrary.ru/IYNCII
17. Hou, M., Tian, F., Zhang, T., & Huang, M. (2019). Evaluation of canopy temperature depression, transpiration, and canopy greenness in relation to yield of soybean at reproductive stage based on remote sensing imagery. *Agric. Water Manag.*, *222*, 182-192. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.005
18. Hou, M., Zhao, L., & Lin, A. (2023). Irrigation Cooling Effect on Local Temperatures in the North China Plain Based on an Improved Detection Method. *Remote Sens.*, *15*, 4571. https://doi.org/10.3390/rs15184571 EDN: https://elibrary.ru/NYVFOZ
19. Kucera, D., & Jenerette, G. D. (2023). Urban greenness and its cooling effects are influenced by changes in drought, physiography, and socio-demographics in Los Angeles, CA. *Urban Climate*, *52*, 101743. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101743 EDN: https://elibrary.ru/PKGLZP
20. Kueppers, L. M., Snyder, M. A., & Sloan, L. C. (2007). Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophys. Res. Lett.*, *34*, L03703. https://doi.org/10.1029/2006GL028679
21. Lawston, P. M., Santanello, J. A., Jr., Hanson, B., & Arsensault, K. (2020). Impacts of irrigation on summertime temperatures in the pacific northwest. *Earth Interactions*, *24*(1), 1. https://doi.org/10.1175/ei-d-19-0015.1 EDN: https://elibrary.ru/BQTKUO
22. Li, D., Chen, Y., Hu, T., Cui, Y., Luo, Y., Luo, H., & Meng, Q. (2020). Climate changes in the Lhasa River basin, Tibetan Plateau: Irrigation induced cooling along with a warming trend. *Theor. Appl. Climatol.*, *140*, 1043-1054. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03146-y EDN: https://elibrary.ru/MLEQAS
23. Li, M. (2024). Research on the effects of extreme heat exposure on human health. *Theoretical and Natural Science*, *29*, 194-199. https://doi.org/10.54254/2753-8818/29/20240777 EDN: https://elibrary.ru/BQKVKA
24. Li, Y., Guan, K., Peng, B., Franz, T. E., Wardlow, B., & Pan, M. (2020). Quantifying irrigation cooling benefits to maize yield in the US Midwest. *Global Change Biology*, *26*(5), 3065-3078. https://doi.org/10.1111/gcb.15002 EDN: https://elibrary.ru/UQBZXM
25. Li, Z.-L., Wu, H., Duan, S.-B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., Leng, P., Tang, R., Ye, X., Zhu, J., Sun, Y., Si, S., Liu, M., Li, J., Zhang, X., Shang, G., Tang, B.-H., Yan, G., & Zhou, C. (2022). Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics.*, *61*, e2022RG000777. https://doi.org/10.1029/2022RG000777 EDN: https://elibrary.ru/YASDOG

26. Lin, Y., Li, X., Zhang, T., Chao, N., Yu, J., Cai, J., & Sneeuw, N. (2020). Water Volume Variations Estimation and Analysis Using Multisource Satellite Data: A Case Study of Lake Victoria. *Remote Sensing*, *12*(18), 3052. https://doi.org/10.3390/rs12183052 EDN: https://elibrary.ru/OYXBLN
27. Liu, J., Jin, J., & Niu, G.-Y. (2021). Effects of Irrigation on Seasonal and Annual Temperature and Precipitation over China Simulated by the WRF Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(10), e2020JD034222. https://doi.org/10.1029/2020jd034222 EDN: https://elibrary.ru/CKHLTN
28. Liu, N., Zhao, X., Zhang, X., Zhao, J., Wang, H., & Wu, D. (2023). Remotely sensed evidence of the divergent climate impacts of wind farms on croplands and grasslands. *Science of the Total Environment*, *905*, 167203. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167203 EDN: https://elibrary.ru/WMEXBO
29. Lobell, D. B., Bonfils, C. J., Kueppers, L. M., & Snyder, M. A. (2008). Irrigation cooling effect on temperature and heat index extremes. *Geophys. Res. Lett.*, *35*, L09705. https://doi.org/10.1029/2008GL034145 EDN: https://elibrary.ru/MEZNKF
30. Mu, T., Liu, G., Yang, X., & Yu, Y. (2023). Soil-Moisture Estimation Based on Multiple-Source Remote-Sensing Images. *Remote Sensing*, *15*(1), 139. https://doi.org/10.3390/rs15010139 EDN: https://elibrary.ru/TSTQEM
31. Pan, T., Zhang, C., Kuang, W., Luo, G., Du, G., & Yin, Z. (2020). Large-scale rain-fed to paddy farmland conversion modified land-surface thermal properties in Cold China. *Science of the Total Environment*, *722*, 137917. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137917 EDN: https://elibrary.ru/VPQTHT
32. Shah, H. L., Zhou, T., Huang, M., & Mishra (2019). Strong Influence of Irrigation on Water Budget and Land Surface Temperature in Indian Subcontinental River Basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(3), 1449-1462. https://doi.org/10.1029/2018JD029132
33. Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water Int.*, *25*, 11-32. https://doi.org/10.1080/02508060008686794 EDN: https://elibrary.ru/LGHWKX
34. Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation-A global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *14*, 1863-1880. https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010 EDN: https://elibrary.ru/OLGCBP
35. Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J. M., Frenken, K., & Feick, S. (2005). Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *9*, 535-547. https://doi.org/10.5194/hess-9-535-2005 EDN: https://elibrary.ru/LZZIDH

36. Tan, C.-H., Chu, T.-W., & Jao, C.-C. (2011). Cooling effect range assessment of paddy fields in urban neighborhood by Landsat thermal imagery. In *32nd Asian Conference on Remote Sensing 2011, ACRS 2011* (Vol. 3, pp. 1857-1862).
37. Terekhov, A., & Abayev, N. (2020). Irrigation cooling effect: Opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin, Central Asia. *E3S Web of Conferences*, *223*, 02009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022302009 EDN: https://elibrary.ru/EFLHOB
38. van Keulen, H., & Wolf, J. (1986). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, pp. 235-247.
39. Wang, Z., Vivoni, E. R., Bohn, T. J., & Wang, Z.-H. (2021). A Multiyear Assessment of Irrigation Cooling Capacity in Agricultural and Urban Settings of Central Arizona. *Journal of the American Water Resources Association*, *57*(5), 771-788. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12920
40. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations. *Science of the Total Environment*, *705*, 135984. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135984 EDN: https://elibrary.ru/DDZSII
41. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Global assessment of the impact of irrigation on land surface temperature. *Science Bulletin*, *65*(17), 1440-1443. https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.04.005 EDN: https://elibrary.ru/MRLEHK
42. Zhang, C., Dong, J., Leng, G., Doughty, R., Zhang, K., Han, S., Zhang, G., Zhang, X., & Ge, Q. (2023). Attenuated cooling effects with increasing water-saving irrigation: Satellite evidence from Xinjiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *333*, 109397. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109397 EDN: https://elibrary.ru/SZUKJF
43. Zhang, C., Ge, Q., Dong, J., Zhang, X., Li, Y., & Han, S. (2023). Characterizing spatial, diurnal, and seasonal patterns of agricultural irrigation expansion-induced cooling in Northwest China from 2000 to 2020. *Agricultural and Forest Meteorology*, *330*, 109304. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109304 EDN: https://elibrary.ru/DUVCKR
44. Zhang, F., Peng, K., & Zhang, F. (2022). Spatial distribution characteristics of land surface temperature and its "source-sink" effect in Yanqi Basin, Xinjiang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *38*(16), 153-161.
45. Zhang, Z., Lin, A., Zhao, L., & Zhao, B. (2022). Attribution of local land surface temperature variations response to irrigation over the North China Plain. *Science of the Total Environment*, *826*, 154104. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154104 EDN: https://elibrary.ru/VVPALD

46. Zhu, P., & Burney, J. (2022). Untangling irrigation effects on maize water and heat stress alleviation using satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, *26*(3), 827-840. https://doi.org/10.5194/hess-26-827-2022 EDN: https://elibrary.ru/ZVSAOD
47. Zhu, X., Liang, S., & Pan, Y. (2012). Observational evidence of the cooling effect of agricultural irrigation in Jilin, China. *Climatic Change*, *114*(3-4), 799-811. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0435-3 EDN: https://elibrary.ru/HZMVUW

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Савин Игорь Юрьевич, академик РАН, д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»
Пыжевский пер., 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Российская Федерация
savin_iyu@esoil.ru

Терехов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт информационных и вычислительных технологий МОН
ул. Пушкина, 125, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан
info@ipic.kz

Мухамедиев Равиль Иргизович, доктор технических наук, профессор
Казахский Научно-Исследовательский Технический Университет им. К.И. Сатпаева
ул. Сатпаева, 22, г. Алматы, 050043, Республика Казахстан
r.mukhamediev@satbayev.university

DATA ABOUT THE AUTHORS

Igor Yu. Savin, Academician of RAS, Dr. Sc. (Agriculture), Chief Researcher
Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute"

7, bld.2, Pyzhevsry per., Moscow, 119017, Russian Federation
savin_iyu@esoil.ru
SPIN-code: 5132-0631
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8739-5441
ResearcherID: H-8117-2013
Scopus Author ID: 7003650252

Alexey G. Terekhov, Dr. Sc. (Technical), Chief Researcher
Institute of Information and Computing Technologies, Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan
125, Pushkin Str., Almaty, 050010, Kazakhstan
info@ipic.kz
SPIN-code: 7929-1104
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3209-1333
ResearcherID: V-4393-2017
Scopus Author ID: 7005885252

Ravil I. Mukhamediev, Dr. Sc. (Technical), Professor
K.I. Satpayev Kazakh Research Technical University
Almaty, 050000, Kazakhstan
22, Satpayev Str., 22, Almaty, 050043, Kazakhstan
r.mukhamediev@satbayev.university
SPIN-code: 9847-9470
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3727-043X
ResearcherID: X-1461-2019
Scopus Author ID: 7005885252

Поступила 26.07.2024 Received 26.07.2024
После рецензирования 15.09.2024 Revised 15.09.2024
Принята 29.10.2024 Accepted 29.10.2024

БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1141 **EDN: VOJPIM**
УДК 637.144:613.22:542.98-044.3

CC BY NC ND

Научная статья

ОЦЕНКА УРОВНЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ БЕЛКОВ АДАПТИРОВАННЫХ МОЛОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Ю.Г. Розенфельд, В.Е. Высокогорский, Ю.А. Подольникова, Н.В. Стрельчик, Н.Л. Чернопольская

Аннотация

Обоснование. В последнее время используется определение уровня карбонильных производных в изучении продуктов питания. Однако для повышения чувствительности и специфичности необходимо сравнение различных критериев окислительных повреждений молочных белков.

Цель исследования – сравнение информативной значимости показателей интенсивности окислительной деструкции белков различных адаптированных молочных смесей.

Материалы и методы. В качестве материала использовали различные адаптированные молочные смеси, изготовленные на основе коровьего и козьего молока.

Для оценки показателей уровня карбонильных производных белков использовали метод Reznick A.Z. & Parker L. и способ комплексной оценки содержания карбонильных производных, с вычислением резервного потенциала (Фомина М.А. с соавт.2014).

Результаты. Расчёт резервного потенциала (РП), проведенный после определения спонтанного и железо-индуцированного окисления, позволил установить его повышение (на 5-10%) во всех молочных смесях на основе коровьего

молока в сравнении с ультрапастеризованным молоком. Повышение общего уровня резервного потенциала проявляется за счёт альдегид-динитрофенилгидразонов. Аналогичное повышение общего уровня резервного потенциала наблюдается и в адаптированных молочных смесях, изготовленных на основе козьего молока в сравнении с показателем ультрапастеризованного молока.

Установлены различия в соотношении альдегидных и кетонных производных в адаптированных молочных смесях 1 и 2 на основе коровьего молока и в смесях из козьего молока.

Заключение. Определение резервного потенциала позволило выявить адаптированные молочные смеси с наибольшим и меньшим уровнем этого показателя, характеризующего устойчивость белков к воздействиям обычного уровня окислителей, для дополнительной характеристики биологической ценности продукта.

Ключевые слова: окислительная модификация; карбонильные соединения; адаптированные молочные смеси; коровье молоко; козье молоко; динитрофенилгидразоны

Для цитирования. Розенфельд, Ю. Г., Высокогорский, В. Е., Подольникова, Ю. А., Стрельчик, Н. В., & Чернопольская, Н. Л. (2025). Оценка уровня окислительной модификации белков адаптированных молочных смесей. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 176-194. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1141

Original article

ASSESSMENT OF THE LEVEL OF OXIDATIVE MODIFICATION OF PROTEINS ADAPTED MILK MIXTURES

Yu.G. Rosenfeld, V.E. Vysokogorskiy, Yu.A. Podolnikova, N.V. Strelchik, N.L. Chernopolskaya

Abstract

Background. Recently, the determination of the level of carbonyl derivatives has been used in the study of food products. However, to increase sensitivity and specificity, it is necessary to compare different criteria for oxidative damage to milk proteins.

The **purpose** of the study is to compare the informative significance of indicators of the intensity of oxidative destruction of proteins of various adapted milk mixtures.

Materials and methods. Various adapted milk mixtures based on cow's and goat's milk were used as the material.

To assess the level of protein carbonyl derivatives, the Reznick A.Z. & Parker L. method and the method of complex assessment of the content of carbonyl derivatives, with the calculation of the reserve potential were used (Fomina M.A. et al. 2014).

Results. The calculation of the reserve potential (RP), carried out after the determination of spontaneous and iron-induced oxidation, made it possible to establish its increase (by 5-10%) in all dairy mixtures based on cow's milk in comparison with ultrapasteurized milk. An increase in the overall level of reserve potential is manifested by aldehyde-dinitrophenylhydrazones. A similar increase in the overall level of reserve potential is observed in adapted milk mixtures made on the basis of goat's milk in comparison with the indicator of ultra-pasteurized milk.

Differences in the ratio of aldehyde and ketone derivatives in adapted milk mixtures 1 and 2 based on cow's milk and in goat's milk mixtures have been established.

Conclusion. The determination of the reserve potential made it possible to identify adapted milk mixtures with the highest and lowest levels of this indicator, characterizing the resistance of proteins to the effects of the usual level of oxidants, for additional characteristics of the biological value of the product.

Keywords: oxidative modification; carbonyl compounds; adapted milk mixtures; cow's milk; goat's milk; dinitrophenylhydrazones

For citation. Rosenfeld, Yu. G., Vysokogorskiy, V. E., Podolnikova, Yu. A., Strelchik, N. V., & Chernopolskaya, N. L. (2025). Assessment of the level of oxidative modification of proteins adapted milk mixtures. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 176-194. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1141

Введение

Важными критериями биологической ценности молока и молочных продуктов в последнее время, наряду с другими показателями, рассматриваются окислительные повреждения и антиоксидантная активность [4; 17]. Для оценки интенсивности окислительных процессов часто использовалось определение уровня продуктов перекисного окисления липидов, особенно в продуктах питания, так как непредельные жирные кислоты легко подвергаются окислению, что приводит к изменению вкуса [23]. Известно, что малоновый диальдегид (МДА) и 4-гидрокси-2-ноненаль (ГНЕ) являются наиболее распространёнными продуктами взаимодействия липидов с активными формами кислорода. Однако широко используемый маркёр

перекисного окисления липидов – тест с тиобарбитуровой кислотой не относится к специфическим, а МДА вступает в тканях во взаимодействие с аминокислотами, нуклеотидами, фосфолипидами или окисляется до диоксида углерода.

Для выявления уровня антиокислительной активности и интенсивности образования свободных радикалов в биологических материалах достаточно широко использовался хемилюминесцентный анализ, применение которого позволило охарактеризовать воздействие технологических режимов и способов производства молочных продуктов [3], получить оценку интенсивности свободно-радикального окисления молока коров разных природных зон, кисломолочных продуктов [5; 9], провести сравнение антиоксидантных свойств козьего и коровьего молока [1], а также йодобогащенных молочных продуктов [10].

Хотя до сих пор, по данным международных поисковых систем, публикаций по проблеме «перекисное окисление липидов» в 10 раз больше, чем по вопросу «окисление белков», накопилось много сведений о том, что не липиды, а белки являются главными субстратами окисления в живых системах [16]. Продукты окислительной модификации белков (ОМБ) более стабильны, сохраняются в течение нескольких часов и даже дней, что даёт основание считать их более информативным маркёром активации свободно-радикальных процессов [6]. Именно важнейшая роль в метаболических процессах белков, их высокая чувствительность к свободным радикалам, позволяет рассматривать белки как главные мишени в действии активных форм кислорода [16]. Несмотря на то, что некоторые продукты окисления аминокислот не относятся к карбонильным соединениям, тем не менее определение их уровня широко распространено в пищевых и биологических системах для оценки интенсивности окислительной деструкции белка [20-22]. При сравнительном анализе в мышечном белке курицы, свинины, говядины установлен более высокий уровень карбонильных соединений, чем в белках плазмы крови [23]. В образцах ультрапастеризованного коровьего молока в 2 и в 2,6 раза повышено содержание альдегид-динитрофенилгидразонов и кетонных производных в сравнении с их содержанием в грудном молоке при металл-катализируемом окислении [8]. Особенно существенно повышение (в 2 раза) карбонильных соединений в порошковой детской молочной смеси и цельным сухом молоке [18].

При производстве порошковых адаптированных молочных смесей молоко подвергается технологическому воздействию не только с целью

микробиологической безопасности, но и для удаления воды при концентрировании испарением и распылительной сушкой, что способствует повышению интенсивности окислительной модификации белков [18; 19].

В зависимости от процесса производства детские молочные смеси подвергаются нескольким термическим обработкам, которые оказывают глубокое влияние на структуру нативных белков и способствуют образованию продуктов окисления и метаболитов реакции взаимодействия аминогрупп белков и аминокислот с карбонильными группами углеводов (реакция Майяра) [24]. В адаптированные молочные смеси добавляются липиды с большим содержанием полиненасыщенных жирных кислот, железо и аскорбиновая кислота, которые способствуют образованию свободных радикалов [19].

Активация окислительных реакций может привести к нежелательным явлениям, нарушению усвояемости белка, его биодоступности и питательной ценности, с потенциальными неблагоприятными последствиями для роста и развития детей первого года жизни.

Важность биологической и пищевой ценности молочных смесей для детского питания подтверждает актуальность повышения информативной значимости определения уровня карбонильных производных белков для характеристики интенсивности свободнорадикальных процессов.

Выяснение степени таких окислительных повреждений белков требует разработки методических подходов, тем более что это необходимо и для характеристики восстановления антиокислительных свойств продукта. В то же время, для оценки уровня карбонильных соединений необходим расчет на концентрацию белка, определение которой в молочных продуктах требует дополнительных лабораторных исследований. Учитывая изложенное, представляется актуальным широкий поиск достаточно чувствительных и специфичных маркеров окислительных повреждений молочных белков.

В качестве дополнительного критерия остроты окислительных повреждений белков тканей при патологических состояниях широко используется определение процентного соотношения количества карбонильных производных при спонтанном и металл-катализируемом окислении. Увеличение этого показателя в динамике развития окислительного стресса рассматривается как резервно-адаптационный потенциал (РАП), отражающий напряжение резервно-адаптационных возможностей организма [11;16]. В случае характеристики окислительной модификации белков продуктов питания речь не может идти об адаптационных процессах и поэтому в нашей ра-

боте при подсчёте процентного соотношения карбонильных производных при спонтанном и металл-катализируемом окислении использовали термин резервный потенциал (РП).

Цель исследования – сравнить информационную значимость показателей интенсивности окислительной деструкции белков адаптированных молочных смесей.

Материалы и методы

В качестве материала использовали адаптированные смеси на коровьем молоке: NAN (Нестле Дойчланд АГ) - смесь-1, «Малютка» (АО «ДП «Истра-Нутриция») - смесь-2, Nutrilon Premium (Нутриция) - смесь-3, Беллакт (Волковысское ОАО «Беллакт») - смесь-4, а также образцы ультрапастеризованного коровьего молока «Тёма» (ОАО «Юнимилк», Россия, ТУ 10.86.10-076-13605199). Другая группа адаптированных смесей на основе козьего молока: NAN goat milk (Нестле Дойчланд АГ) – смесь 5, «Kabrita-2 (Нидерланды «AusnutriaHyproca») – смесь-6. Для сравнения использовали ультрапастеризованное козье молоко «Село Зеленое» (ОАО «Милком», Россия).

В работе для оценки показателей уровня карбонильных производных белков использовали метод Reznick A.Z. & Parker L. в модификации Дубининой Е.Е. [12]. При спонтанном и металл-катализированном (после инкубации исследуемого материала с 10 мМ раствором $FeSO_4$ и 0,3 мМ H_2O_2 по реакции Фентона) окислении фиксировали на спектрофотометре UNICO 2800 (США) показатели альдегид-динитрофенилгидразонов (АДНФГн) нейтрального характера, кетон-динитрофенилгидразонов (КДНФГн) нейтрального характера, альдегид-динитрофенилгидразонов (АДНФГо) основного характера, кетон-динитрофенилгидразонов (КДНФГо) основного характера.

Для определения степени выраженности окислительной деструкции белков использовали способ комплексной оценки содержания карбонильных производных (Фомина М.А. с соавт.2014) [13; 14], в соответствии с которым по полученным значениям экстинкций рассчитывали площадь под кривой. Значения, полученные при измерении карбонильных производных, образовавшихся при спонтанном и металл-индуцированном окислении, использовали для вычисления показателя резервного потенциала (РП), принимая значения уровня карбонильных соединений при металл-индуцированном окислении за 100%, как максимально возможное в данном молочном продукте.

Для статистической обработки полученных результатов использовали стандартные методы вариационной статистики с применением критерия Стьюдента. При проверке статистических гипотез принимали критический уровень значимости равным 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчёт резервного потенциала (РП) всех динитрофенилгидразонов ($РП_{общ}$), проведенный после определения спонтанного и железо-индуцированного окисления, позволил установить его повышение (на 5-10%) во всех молочных смесях на основе коровьего молока в сравнении с ультрапастеризованным молоком «Тёма» (Табл.1). В меньшей степени увеличен резервный потенциал в смеси 1, а в трёх других статистически выше, чем в данной смеси. Повышение общего уровня резервного потенциала проявляется, в основном, за счёт альдегид-динитрофенилгидразонов ($РП_{АДНФГ}$) как нейтрального, так и основного характера. Так же, как и общий потенциал, в сравнении с данными молока в меньшей степени повышен $РП_{АДНФГ}$ в смеси 1- на 6,6%, в трёх других (смеси 2.3.4) на 8.9; 11,9 и 13,7%, соответственно.

Таблица 1.

Резервный потенциал белков молочных смесей на основе коровьего молока (M±m, %)

Продукт / Показатель	Тема	Смесь 1	Смесь 2	Смесь 3	Смесь 4
ОБЩ	76,9±0,83	82,3±0,64 p<0,0001	85,4±0,78 p<0,0001 p_1=0,01	86,9±0,73 p<0,0001 p_1=0,001	86,5±0,85 p<0,0001 p_1=0,003
АДНФГ	73,8±0,75	80,4±0,72 p<0,0001	82,7±0,66 p<0,0001 p_1=0,04	85,8±0,86 p<0,0001 p_1=0,001	87,6±0,93 p<0,0001 p_1<0,0001
АДНФГн	72,7±0,63	79,3±0,77 p<0,0001	79,6±0,78 p<0,0001 p_1=0,79	84,2±0,76 p<0,0001 p_1 <0,0001	84,0±0,59 p<0,0001 p_1<0,0001
АДНФГо	76,8±0,91	84,7±0,93 p<0,0001	90,9±0,86 p<0,0001 p_1 <0,0001	87,7±0,76 p<0,0001 p_1=0,03	91,7±0,77 p<0,0001 p_1 <0,0001
КДНФГ	88,0±0,50	91,8±0,94 p=0,01	94,4±0,60 p<0,0001 p_1=0.04	93,2±0,94 p<0,0001 p_1=0,32	91,9±0,67 p=0,001 p_1=0,93

КДНФГн	88,3±0,53	92,7±0,76 p=0,001	92,3±0,91 p=0,004 p_1=0,71	93,9±0,55 p<0,0001 p_1=0,25	92,4±0,63 p=0,001 p_1=0,73
КДНФГо	81,8±0,43	84,6±0,90 p=0,02	84,0±0,91 p=0,05 p_1=0,65	88,2±0,75 p<0,0001 p_1=0,01	86,1±0,90 p=0,002 p_1=0,2

Примечание: p – при сравнении с ультрапастеризованным молоком «Тема», p_1 – при сравнении со смесью 1; АДНФГн – альдегид-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; АДНФГо– альдегид-динитрофенилгидразоны основного характера; КДНФГн - кетон-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; КДНФГо - кетон-динитрофенилгидразоны основного характера.

Резервный потенциал, определяемый по уровню кетон-динитрофенилгидразонов ($РП_{КДНФГ}$) в молочных смесях также повышен в сравнении с показателями молока, но в меньшей степени и во всех смесях практически одинаково (от 3,7 до 6,3%).

Таким образом, полученные результаты однозначно свидетельствуют, что резервный потенциал во всех адаптированных молочных смесях существенно выше, чем в ультрапастеризованном коровьем молоке, что может быть обусловлено изменением белкового состава при создании рецептов (формул) смесей [18]. Следует отметить, что в большей степени резервный потенциал увеличен за счет альдегидных карбонильных производных.

Аналогичное повышение общего уровня резервного потенциала ($РП_{ОБЩ}$) в сравнении с показателем козьего молока «Село Зеленое» наблюдается и в молочных смесях (смеси 5 и 6), изготовленных на основе козьего молока (Табл.2). Это повышение обусловлено увеличением $РП_{АДНФГ}$ на 18,2% смеси 5 и на 21,6% смеси 6, причём только за счёт $РП_{АДНФГн}$ на 20,5% смеси 5 и на 27,0% смеси 6 в сравнении с молоком.

Таблица 2.

Резервный потенциал белков молочных смесей на основе козьего молока (M±m, %)

Показатель \ Продукт	Село Зеленое	Смесь-5	Смесь-6
ОБЩ	72,6±0,52	84,9±0,85 p<0,0001	88,69±0,81 p<0.0001 p1=0,01
АДНФГ	65,6±0,72	83,8±0,90 p<0,0001	87,2±0,60 p<0,0001 p_1=0,01

АДНФГн	60,3±0,78	80,8±0,79 p<0,0001	87,3±0,40 p<0,0001 p_1<0,0001
АДНФГо	86,8±0,70	88,2±0,82 p=0,22	87,0±0,69 p=0,88 p_1=0,26
КДНФГ	91,4±0,72	93,4±0,92 p=0,11	92,1±0,87 p=0,57
КДНФГн	91,5±0,80	93,2±0,86 p=0,2	92,5±0,69 p=0,4
КДНФГо	92,5±0,82	90,9±0,80 p=0,2	90,5±0,93 p=0,14

Примечание: p – при сравнении с ультрапастеризованным молоком «Село Зелёное»,

p_1 – при сравнении со смесью 5; АДНФГн – альдегид-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; АДНФГо– альдегид-динитрофенилгидразоны основного характера; КДНФГн - кетон-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; КДНФГо - кетон-динитрофенилгидразоны основного характера

Резервный потенциал АДНФГ основного характера и КДНФГ как нейтрального, так и основного характера существенно не отличаются от показателя козьего молока.

Несмотря на то, что белковый состав козьего молока существенно отличается от коровьего, адаптация белкового состава при изготовлении смесей приводит к повышению $АДНФГ_{общ}$ и особенно $АДНФГ_{н}$.

В качестве ранних (первичных) и поздних (вторичных) маркеров развития патологических процессов в медицинских исследованиях используется определение соотношений альдегидных (АДНФГ) и кетонных (КДНФГ) карбонильных производных. Так как при производстве и хранении молочных продуктов изменяется уровень карбонильных производных [7], мы сочли необходимым сравнить соотношение АДНФГ и КДНФГ. Анализ полученных данных свидетельствует о различиях в уровне соотношений альдегидных и кетонных производных, если в молочных смесях №1 и №2 процентное соотношение АДНФГ повышено, а КДНФГ снижено, то в смесях №3 и №4 не отличалось от данных коровьего молока «Тема» (Табл.3).

При сравнении данных фракционного состава карбонильных производных выявлено некоторое увеличение (на 3-4%) $АДНФГ_{н}$ при снижении КДНФГн в смесях1,2 и 4. Наибольшие различия установлены между карбонильными производными основного характера – снижение $АДНФГ_{о}$ и увеличение $КДНФГ_{о}$ на 4,7-9,7% во всех молочных смесях.

Таблица 3.

Соотношение карбонильных производных белков молочных смесей на основе коровьего молока (M±m, %)

Продукт / Показатель	Тема	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №3	Смесь №4
АДНФГ	88,7±0,64	91,7±0,82 p=0,02	91,4±0,78 p=0,03	87,6±0,59 p=0,22	90,7±0,91 p=0,11
КДНФГ	11,2±0,73	8,3±0,70 p=0,01	8,6±0,65 p=0,01	12,4±0,87 p=0,32	9,3±0,68 p=0,1
$АДНФГ_{н}$	88,0±0,95	92,4±0,45 p=0,002	91,8±0,79 p=0,01	88,2±0,54 p=0,85	91,4±0,6 p=0,01
$КДНФГ_{н}$	12,0±0,76	7,6±0,81 p=0,003	8,2±0,93 p=0,01	11,8±0,79 p=0,85	8,6±0,86 p=0,02
$АДНФГ_{о}$	89,8±0,56	83,7±0,94 p<0,0001	80,1±0,88 p<0,0001	83,9±0,66 p<0,0001	85,1±0,72 p<0,0001
$КДНФГ_{о}$	10,2±0,55	16,3±0,68 p<0,0001	19,9±0,9 p<0,0001	16,1±0,74 p<0,0001	14,9±0,85 p<0,0001

Примечание: p – при сравнении с ультрапастеризованным молоком «Тема». АДНФГн – альдегид-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; АДНФГо – альдегид-динитрофенилгидразоны основного характера; КДНФГн - кетон-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; КДНФГо - кетон-динитрофенилгидразоны основного характера

Молочные смеси из козьего молока №5 и №6 отличаются от ультрапастеризованного более низким содержанием альдегид-динитрофенилгидразонов и высоким кетонных производных, на 4,6 и 8,6%, соответственно. Эти изменения обусловлены, в основном, нарушением соотношения карбонильных соединений нейтрального характера (смесь №5 на 5.2 и смесь №6 на 10,3%).

Таблица 4.

Соотношение карбонильных производных белков молочных смесей на основе козьего молока (M±m, %)

Продукт / Показатель	Село Зеленое	Смесь №5	Смесь №6
АДНФГ	92,0±0,62	87,4±0,85 p<0,0001	83,4±0,89 p<0,0001
КДНФГ	8,0±0,76	12,6±0,92 p<0,0001	16,6±0,80 p<0,0001
$АДНФГ_{н}$	92,1±0,54	86,9±0,70 p<0,0001	81,8±0,64 p<0,0001

КДНФГн	7,9±0,85	13,1±0,90 p<0,0001	18,2±0,81 p<0,0001
АДНФГо	91,2±0,73	90,2±0,79 p=0,36	90,4±0,96 p=0,52
КДНФГо	8,8±0,59	9,8±0,74 p=0,3	9,6±0,82 p=0,45

Примечание: p – при сравнении с ультрапастеризованным молоком «Тема». АДНФГн – альдегид-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; АДНФГо– альдегид-динитрофенилгидразоны основного характера; КДНФГн - кетон-динитрофенилгидразоны нейтрального характера; КДНФГо - кетон-динитрофенилгидразоны основного характера

Существенное преобладание альдегид-динитрофенилгидразонов может отражать увеличение процессов фрагментации белковых молекул в молочных смесях на основе коровьего молока. Некоторый сдвиг уровня карбонильных соединений в сторону кетонных производных в молочных смесях на основе козьего молока, возможно, следствие агрегации белковых молекул, так как АДНФГ являются маркерами фрагментации белков, а КДНФГ- маркеры их агрегации [13; 16].

Заключение

Использование способа комплексной оценки содержания продуктов окислительной модификации белков в тканях и биологических жидкостях М.А. Фоминой с соавторами (2014), позволяет определить не только уровень карбонильных соединений в молоке и молочных продуктах, но и произвести расчёт других показателей окислительной деструкции, в том числе резервный потенциал, соотношение карбонильных производных – АДНФГ и КДНФГ. Определение РП, характеризующего устойчивость белков к воздействиям обычного уровня окислителей, позволило выявить адаптированные молочные смеси с наибольшим и меньшим уровнем этого показателя, что даёт основание для использования резервного потенциала в качестве критерия для характеристики биологической ценности продукта. Как дополнительный критерий биологической ценности продукта возможно использование соотношения карбонильных производных.

Выводы:

1. Адаптированные молочные смеси как на основе коровьего, так и козьего молока, характеризуются повышенным резервным потенциалом.

2. Молочные смеси на основе коровьего молока отличаются преобладанием альдегидных производных, а в детских смесях на основе козьего молока преобладают кетонные производные.

3. Одновременное определение карбонильных производных белков при спонтанном и железо-катализируемого окислении, позволяет оценить

снижение доступности белков к окислительным воздействиям и косвенно охарактеризовать возможности антиоксидантной защиты адаптированных молочных смесей.

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

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

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

Sponsorship information. The study had no sponsorship.

Список литературы

1. Веселов, П. В., & Высокогорский, В. Е. (2009). Антиоксидантная активность коровьего и козьего молока. *Молочная промышленность*, (7), 86. EDN: https://elibrary.ru/RHIUUH
2. Балакирева, Ю. В., Зайцев, С. Ю., Каримова, Ф. Г., Акулов, А. Н., & Ахмадуллина, Ф. Ю. (2012). Влияние режима пастеризации на полипептидный состав молока. *Фундаментальные исследования*, (2), 170-173. EDN: https://elibrary.ru/PAYZEV
3. Высокогорский, В. Е., & Игнатьева, Г. В. (2012). Хемилюминесцентный анализ пастеризованного молока. *Пищевая промышленность*, (10), 34-36. EDN: https://elibrary.ru/RZPSBN
4. Высокогорский, В. Е., Розенфельд, Ю. Г., & Соколова, М. А. (2022). Антиоксидантная активность молочных продуктов для детского питания. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(3), 143-153. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-143-153 EDN: https://elibrary.ru/ILPDJJ
5. Высокогорский, В. Е., Воронова, Т. Д., & Веселов, П. В. (2009). Антиокислительные свойства молока в разных зонах Омской области. *Молочная промышленность*, (10), 73-74. EDN: https://elibrary.ru/KZQJLN
6. Дубинина, Е. Е. (2006). *Продукты метаболизма кислорода в функциональной активности клеток: (жизнь и смерть, созидание и разрушение): физиологические и клинико-биохимические аспекты*. Санкт-Петербург: Мед. пресса. 397 с. ISBN: 5-85474-072-9 EDN: https://elibrary.ru/QKPXRX
7. Крышкина, Г. Г., Высокогорский, В. Е., Соколова, М. А., & Стрельчик, Н. В. (2021). Интенсивность индуцированного карбонилирования белков молока как идентификатор их сохранности. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 24(11), 9-14. https://doi.org/10.29296/25877313-2021-11-02 EDN: https://elibrary.ru/YJUIJG

8. Соколова, М. А., Высокогорский, В. Е., Розенфельд, Ю. Г., Антонов, О. В., Комарова, А. А., & Подольникова, Ю. А. (2022). Интенсивность процессов окислительной модификации белков женского и коровьего молока. *Вопросы питания*, 91(4), 83-89. https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-4-83-89 EDN: https://elibrary.ru/HLSBFI
9. Лазарева, О. Н., Высокогорский, В. Е., & Воронова, Т. Д. (2006). Хемилюминесцентный анализ кисломолочных продуктов. В *Интеграция науки и образования - решающий фактор устойчивого развития государства* (с. 386-390). Семипалатинск.
10. Мамцев, А. Н. (2005). Хемилюминесценция - способ оценки антиоксидантных свойств йодобогащенных продуктов. *Молочная промышленность*, (5), 76. EDN: https://elibrary.ru/PVWODJ
11. Никитина, Ю. В., & Мухина, И. В. (2009). Изменения окислительных процессов в ткани головного мозга и крови крыс в раннем онтогенезе. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, (6-1), 124-131. EDN: https://elibrary.ru/KYWUCB
12. Дубинина, Е. Е., Бурмистров, С. О., Ходов, Д. А., & Поротов, Г. Е. (1995). Окислительная модификация белков сыворотки крови человека, метод ее определения. *Вопросы медицинской химии*, 41(1), 24-26. EDN: https://elibrary.ru/YVAEFD
13. Абаленихина, Ю. В., Фомина, М. А., Чурилов, Г. И., & Иванычева, Ю. Н. (2012). Окислительная модификация белков тимуса крыс под влиянием меди в ультрадисперсной форме. *Фундаментальные исследования*, (11), 1315-1319. EDN: https://elibrary.ru/PUKPTZ
14. Фомина, М. А., Абаленихина, Ю. В., Фомина, Н. В., & Терентьев, А. А. (2014). *Способ комплексной оценки содержания продуктов окислительной модификации белков в тканях и биологических жидкостях*. Патент РФ № 2524667 C1. EDN: https://elibrary.ru/FKTUL
15. Высокогорский, В. Е., Розенфельд, Ю. Г., Стрельчик, Н. В., & Подольникова, Ю. А. (2023). Сравнительная характеристика интенсивности окислительной модификации белков молочных смесей, предназначенных для детского питания. *Вопросы питания*, 92(5), 103-109. https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5-103-109 EDN: https://elibrary.ru/GPLJWM
16. Фомина, М. А., & Абаленихина, Ю. В. (2018). *Окислительная модификация белков тканей при изменении синтеза оксида азота*. Москва: ГЭОТАР-Медиа. 192 с. ISBN: 978-5-9704-4372-9 EDN: https://elibrary.ru/YORTWL
17. Шидловская, В. П., & Юрова, Е. А. (2005). Антиоксиданты молока и их роль в оценке его качества. *Молочная промышленность*, (5), 76. EDN: https://elibrary.ru/PVWODJ

18. Chen, Z., Leinisch, F., Greco, I., Zhang, W., Shu, N., Chuang, C. Y., Lund, M. N., & Davis, M. J. (2019). Characterization and quantification of oxidative modifications of protein and racemization of amino acids in infant formula powders. *Free Radical Research*, 53(1), 68-81. https://doi.org/10.1080/10715762.2018.1554250
19. Christides, T., Ganis, J. C., & Sharp, P. A. (2018). In vitro assessment of iron availability from commercial Young Child Formulae supplemented with prebiotics. *European Journal of Nutrition*, 57, 669-678. https://doi.org/10.1007/s00394-016-1353-3 EDN: https://elibrary.ru/ZLZKYM
20. Estévez, M., Díaz-Velasco, S., & Martínez, R. (2022). Protein carbonylation in food and nutrition: a concise update. *Amino Acids*, 54, 559-573. https://doi.org/10.1007/s00726-021-03085-6 EDN: https://elibrary.ru/NDMWGU
21. Estevez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: a review. *Meat Science*, 89(3), 259-279. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.025
22. Hellwig, M. (2020). Analysis of protein oxidation in food and feed products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 12870-12885. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00711 EDN: https://elibrary.ru/RRMRGL
23. Hellwig, M. (2019). The chemistry of protein oxidation in food. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(47), 16742-16763. https://doi.org/10.1002/anie.201814144
24. Roux, S., Courel, M., Ait-Ameur, L., Birlouez-Aragon, I., & Pain, J.-P. (2009). Kinetics of Maillard reactions in model infant formula during UHT treatment using a static batch ohmic heater. *Dairy Science and Technology*, 89, 349-362. https://doi.org/10.1051/dst/2009015 EDN: https://elibrary.ru/LNOEXE

References

1. Veselov, P. V., & Vysokogorsky, V. E. (2009). Antioxidant activity of cow and goat milk. *Milk Industry*, *(7)*, 86. EDN: https://elibrary.ru/RHIUUH
2. Balakireva, Yu. V., Zaytsev, S. Yu., Karimov, F. G., Akulov, A. N., & Akhmadullina, F. Yu. (2012). Effect of pasteurization mode on the polypeptide composition of milk. *Fundamental Research*, *(2)*, 170-173. EDN: https://elibrary.ru/PAYZEV
3. Vysokogorsky, V. E., & Ignatye, G. V. (2012). Chemiluminescence analysis of pasteurized milk. *Food Industry*, *(10)*, 34-36. EDN: https://elibrary.ru/RZPSBN
4. Vysokogorsky, V. E., Rozenfeld, Yu. G., & Sokolova, M. A. (2022). Antioxidant activity of dairy products for infant nutrition. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14(3)*, 143-153. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-143-153 EDN: https://elibrary.ru/ILPDJJ

5. Vysokogorsky, V. E., Voronova, T. D., & Veselov, P. V. (2009). Antioxidant properties of milk in different zones of the Omsk region. *Milk Industry*, *(10)*, 73-74. EDN: https://elibrary.ru/KZQJLN
6. Dubinina, E. E. (2006). *Products of oxygen metabolism in the functional activity of cells: (life and death, creation and destruction): physiological and clinical-biochemical aspects*. Saint Petersburg: Med. pressa. 397 p. ISBN: 5-85474-072-9 EDN: https://elibrary.ru/QKPXRX
7. Kryshkina, G. G., Vysokogorsky, V. E., Sokolova, M. A., & Strelchik, N. V. (2021). Intensity of induced protein carbonylation as an identifier of their preservation. *Issues of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, *24(11)*, 9-14. https://doi.org/10.29296/25877313-2021-11-02 EDN: https://elibrary.ru/YJUIJG
8. Sokolova, M. A., Vysokogorsky, V. E., Rozenfeld, Yu. G., Antonov, O. V., Komarova, A. A., & Podolnikova, Yu. A. (2022). Intensity of oxidative modification processes of proteins of human and cow milk. *Nutrition Issues*, *91(4)*, 83-89. https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-4-83-89 EDN: https://elibrary.ru/HLSBFI
9. Lazareva, O. N., Vysokogorsky, V. E., & Voronova, T. D. (2006). Chemiluminescence analysis of fermented milk products. In *Integration of science and education - a decisive factor in the sustainable development of the state* (pp. 386-390). Semipalatinsk.
10. Mamtsev, A. N. (2005). Chemiluminescence - a method for assessing the antioxidant properties of iodine-enriched products. *Milk Industry*, *(5)*, 76. EDN: https://elibrary.ru/PVWODJ
11. Никитина, Ю. В., & Мухина, И. В. (2009). Изменения окислительных процессов в ткани головного мозга и крови крыс в раннем онтогенезе. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, (6-1), 124-131. EDN: https://elibrary.ru/KYWUCB
12. Дубинина, Е. Е., Бурмистров, С. О., Ходов, Д. А., & Поротов, Г. Е. (1995). Окислительная модификация белков сыворотки крови человека, метод ее определения. *Вопросы медицинской химии*, 41(1), 24-26. EDN: https://elibrary.ru/YVAEFD
13. Абаленихина, Ю. В., Фомина, М. А., Чурилов, Г. И., & Иванычева, Ю. Н. (2012). Окислительная модификация белков тимуса крыс под влиянием меди в ультрадисперсной форме. *Фундаментальные исследования*, (11), 1315-1319. EDN: https://elibrary.ru/PUKPTZ
14. Фомина, М. А., Абаленихина, Ю. В., Фомина, Н. В., & Терентьев, А. А. (2014). *Способ комплексной оценки содержания продуктов окислительной*

модификации белков в тканях и биологических жидкостях. Патент РФ № 2524667 C1. EDN: https://elibrary.ru/FKTUL

15. Высокогорский, В. Е., Розенфельд, Ю. Г., Стрельчик, Н. В., & Подольникова, Ю. А. (2023). Сравнительная характеристика интенсивности окислительной модификации белков молочных смесей, предназначенных для детского питания. *Вопросы питания*, 92(5), 103-109. https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5-103-109 EDN: https://elibrary.ru/GPLJWM
16. Фомина, М. А., & Абаленихина, Ю. В. (2018). *Окислительная модификация белков тканей при изменении синтеза оксида азота*. Москва: ГЭОТАР-Медиа. 192 с. ISBN: 978-5-9704-4372-9 EDN: https://elibrary.ru/YORTWL
17. Шидловская, В. П., & Юрова, Е. А. (2005). Антиоксиданты молока и их роль в оценке его качества. *Молочная промышленность*, (5), 76. EDN: https://elibrary.ru/PVWODJ
18. Chen, Z., Leinisch, F., Greco, I., Zhang, W., Shu, N., Chuang, C. Y., Lund, M. N., & Davis, M. J. (2019). Characterization and quantification of oxidative modifications of protein and racemization of amino acids in infant formula powders. *Free Radical Research*, 53(1), 68-81. https://doi.org/10.1080/10715762.2018.1554250
19. Christides, T., Ganis, J. C., & Sharp, P. A. (2018). In vitro assessment of iron availability from commercial Young Child Formulae supplemented with prebiotics. *European Journal of Nutrition*, 57, 669-678. https://doi.org/10.1007/s00394-016-1353-3 EDN: https://elibrary.ru/ZLZKYM
20. Estévez, M., Díaz-Velasco, S., & Martínez, R. (2022). Protein carbonylation in food and nutrition: a concise update. *Amino Acids*, 54, 559-573. https://doi.org/10.1007/s00726-021-03085-6 EDN: https://elibrary.ru/NDMWGU
21. Estevez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: a review. *Meat Science*, 89(3), 259-279. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.025
22. Hellwig, M. (2020). Analysis of protein oxidation in food and feed products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 12870-12885. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00711 EDN: https://elibrary.ru/RRMRGL
23. Hellwig, M. (2019). The chemistry of protein oxidation in food. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(47), 16742-16763. https://doi.org/10.1002/anie.201814144
24. Roux, S., Courel, M., Ait-Ameur, L., Birlouez-Aragon, I., & Pain, J.-P. (2009). Kinetics of Maillard reactions in model infant formula during UHT treatment using a static batch ohmic heater. *Dairy Science and Technology*, 89, 349-362. https://doi.org/10.1051/dst/2009015 EDN: https://elibrary.ru/LNOEXE

ВКЛАД АВТОРОВ

Розенфельд Ю. Г.: сбор и анализ данных, составление черновика рукописи, статистическая обработка данных.

Высокогорский В.Е.: разработка концепции научной работы, редактирование черновика рукописи, написание рукописи.

Подольникова Ю.А.: статистическая обработка данных, редактирование черновика рукописи

Стрельчик Н.В.: обсуждение концепции научной работы и редактирование черновика рукописи.

Чернопольская Н.Л.: обсуждение концепции научной работы и редактирование черновика рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yulia G. Rosenfeld: data collection and analysis, drafting of the manuscript, statistical processing of data.

Valeriy E. Vysokogorskiy: development of the concept of scientific work, editing of the draft manuscript, writing of the manuscript.

Yuliya A. Podolnikova: statistical data processing, editing the draft manuscript.

Natalia V. Strelchik: discussion of the concept of scientific work and editing the draft manuscript.

Natalia L. Chernopolskaya: discussion of the concept of scientific work and editing the draft manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Розенфельд Юлия Геннадьевна, аспирант

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А.
Столыпина»
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
yug.rozenfeld06.06.01@omgau.org

Высокогорский Валерий Евгеньевич, профессор, доктор медицинских наук, профессор кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А.
Столыпина»
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ve.vysokogorskiy@omgau.org

Подольникова Юлия Александровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А.
Столыпина»
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
yua.podolnikova@omgau.org

Стрельчик Наталья Валерьевна, доцент, кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А.
Столыпина»
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
nv.strelchik@omgau.org

Чернопольская Наталья Леонидовна, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А.
Столыпина»
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
nl.chernopolskaya@omgau.org

DATA ABOUT THE AUTHORS

Yulia G. Rosenfeld, graduate student
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0066-0749
yug.rozenfeld06.06.01@omgau.org

Valeriy E. Vysokogorskiy, Professor, Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Food and Food Biotechnology
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
ve.vysokogorskiy@omgau.org
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7498-2148

Yuliya A. Podolnikova, Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
yua.podolnikova@omgau.org
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4132-6045

Natalia V. Strelchik, Docent, Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Food Biotechnology
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
nv.strelchik@omgau.org
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4441-8746

Natalia L. Chernopolskaya, Docent, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food and Food Biotechnology
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
nl.chernopolskaya@omgau.org
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1359-9190

Поступила 05.09.2024 Received 05.09.2024
После рецензирования 17.10.2024 Revised 17.10.2024
Принята 07.11.2024 Accepted 07.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1294 **EDN: RHIAYC**
UDC 547.78:577.16:615.4:615.9

CC BY NC ND

Original article

ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF GREEN SYNTHESIZED SILVER NANOPARTICLES USING AQUEOUS EXTRACT OF AELUROPUS LITTORALIS AND THEIR ANTICANCER AND ANTIOXIDANT PROPERTIES

A.M. Alrudainy, A.A. Shareef

Abstract

Background. The biosynthesis of nanoparticles using plant extracts offers an eco-friendly and cost-effective method for producing stable nanoparticles with various applications in medicine, agriculture, and environmental science.

Purpose. To investigate the ability of *Aeluropus littoralis* aqueous extract to biosynthesize silver nanoparticles (AgNPs) and of antibacterial activity, anticancer and antioxidant properties.

Materials and methods. *A. littoralis* aerial parts were washed, dried, and ground. Extract was prepared by boiling 7 g in 100 mL water, filtered, and dried. Aelu-AgNPs were biosynthesized by mixing extract with $AgNO_3$, incubating until color change, then centrifuging and washing. Nanoparticles were characterized by UV-Vis, FTIR, XRD, SEM, EDX, and zeta potential. Antibacterial activity was tested against MDR bacteria using agar diffusion, MIC, and MBC assays. Cytotoxicity was evaluated with MTT on cancer and normal cells. Antioxidant activity was measured by DPPH assay. Data analysis used SPSS and GraphPad Prism.

Results. The aqueous extract of *A. littoralis* operated as a reducing agent for $AgNO_3$, resulting in the formation of AgNPs (Aelu-AgNPs), which was confirmed by spectroscopy at the greatest peak of 410 nm. Based on FESEM analysis, the Aelu-AgNPs were around 41.43 nm in size. The XRD study demonstrated a face-centered cubic structure, whereas zeta potential assessment suggested significant stability at -40.4 mV. *Pseudomonas aeruginosa*, *Citrobacter freundii*, *Proteus mirabilis*, *Enterobacter cloacae*, *Escherichia coli*, *Providencia rettgeri*, *Klebsiella pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *S. haemolyticus*, *S. epidermidis*, *S. hominis*, and *Enterococcus faecium* were all proven to be susceptible to the Aelu-AgNPs. Among the bacteria tested, *P. mirabilis* showed the most sensitivity, with a 19.5 mm

inhibition zone. The MIC ranged from 62.5 to 7.8 μg/ml and the MBC from 62.5 to 15.6 μg/ml for all the bacterial isolates that were examined. The results showed that the Aelu-AgNPs had a potential antioxidant activity higher than ascorbic acid at a concentration of 12.5 μg/ml. The MTT assay validated superior efficacy in inhibiting the A375 cancer cell line with an IC_{50} of 71.04 μg/ml, in contrast to 148.6 μg/ml of the normal cell line (HdFn).

Conclusion: The biosynthesized silver nanoparticles obtained from *A. littoralis* extract exhibit potential as antibacterial, antioxidant, and anticancer agents.

Keywords: silver nanoparticles; anticancer activity; antioxidant activity; antibacterial activity; *Aeluropus littoralis*

For citation. Alrudainy, A. M., & Shareef, A. A. (2025). Antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles using aqueous extract of *Aeluropus litoralis* and their anticancer and antioxidant properties. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 195-216. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1294

Introduction

Antibiotic resistance has become an important issue the past few years, primarily due to the widespread and incorrect use of antibiotics. Consequently, bacteria have evolved various resistance mechanisms to various antibiotics, rendering them inefficient against pathogenic bacteria. As a result, the prevention and treatment of diseases and injuries induced by these bacteria has become increasingly complex and difficult, the risk of infection and the degree of severity of wounds have grown greater, and in certain cases, therapy has become impossible, leading to a substantial rise in death rates attributable to these infections [1; 2].

This situation requires finding innovative therapeutic agents that can limit the spread of these resistant strains with high efficiency. Among these agents, silver nanoparticles (AgNPs) have become known as a powerful alternative since to their antibacterial activity and their ability to enhance the effectiveness of antibiotics when combined with these particles [3]. AgNPs have antibacterial activities via multiple mechanisms including leakage of cell contents by disrupting the bilayer of phospholipid in the plasma cell, it also damaging the cell wall and releasing reactive oxygen species. Furthermore, silver nanoparticles inhibit bacterial growth by forming complexes with DNA and modifying gene expression by interference with RNA transcription [4; 5].

The biological application of AgNPs extends more to their function as antibacterial agents since they additionally play an important role in cancer therapy

by specifically targeting cancer cells without damaging healthy cells. The ability to select a target arises from the distinctive surface features of the AgNPs, enabling them to associate with particular receptors on cells that are cancerous. Once these particles bind to tumor cells, they initiate multiple mechanisms that inhibit the spread of cells with cancer, and subsequently result in cell apoptosis [6; 7]. Biosynthesized AgNPs exhibit notable antioxidant activity which can be applied in biomedical and pharmaceutical fields to prevent various disorders related to oxidative stress [8].

Hazardous materials are used in the production of AgNPs in traditional synthesis methods such as chemical reduction, which results in environmentally harmful by-products that require careful management and disposal. There is a recent trend towards adopting green synthesis methods to produce silver nanoparticles, which are considered safe for health and the environment, it also provides cost-effectiveness and the ability to synthesize nanoparticles with precise size and shape [9; 10]. A wide range of biological sources can be utilized to synthesize silver nanoparticles using environmentally friendly methods including fungi, yeast, bacteria, algae, lichens and plant extracts. There are various techniques that use plant extracts to synthesize AgNPs, the most common of which is the reduction of Ag^+ using phytochemicals including terpenoids, phenols and flavonoids [11; 12]. The halophytic plant *Aeluropus littoralis*, a member of the Poaceae family, is very important to ecosystems due to its unique ways of surviving in salty conditions. The secondary metabolites produced by *A. littoralis* are known for their beneficial health properties and positive impact on the environment, and may have potential medicinal uses [13].

In our present study, we reported a novel synthesis of AgNPs utilizing extraction of *A. littoralis* aerial part with characterization of these particles as well as evaluated the biomedical applications such as antimicrobial activity against MDR-bacteria, cytotoxicity toward the cell lines HdFn and A375, and finally antioxidant activity.

Materials and methods

Collection plant parts and preparation for extraction

Aeluropus littoralis (Echrich, Iraq) fresh aerial parts were obtained from University of Southern Technical in Basra Governorate and rinsed extensively with tap water, thereafter washed multiple times with distilled water. The dried, cleaned component was ground into a fine powder after being left at room temperature in shade. Subsequently, 7 grams of the powder was added to 100 ml of deionized water (100°C) with shaking for 30 minutes at environment tem-

perature. The mixture was filtered using filter paper type Whatman No. 1 in an oven at 40 °C the filtered mixture evaporated. At 4°C, the dried extract was stored in an airtight bottle for subsequent examinations. For future testing, the dehydrated extract was sealed in a container and kept at 4°C.

Biosynthesis of Aelu-AgNPs

According to [14], Aelu-AgNPs were biosynthesized with certain modifications. In a satirized bottle, 7% aerial part aqueous extract was applied to 1 mM $AgNO_3$ solution (1:9 v/v) and stirred at 35 °C for 30 minute, the bottle incubated in darkness at room temperature until observing color change from light to dark color, the Aelu-AgNPs were collected by centrifuging the entire combination at 4000 rpm for 15 min, discarded the supernatant to remove unreacted compound, while the pellet was purified by washing with deionized water 3-5 times, the pellet was dried and then kept at 4°C until use in subsequent tests and examinations.

Characterization of Aelu-AgNPs

The synthesized Aelu-AgNPs were characterized by carrying out the UV-Vis spectrophotometer (Thermo, Biomate5) with the spectrum of 200–800 nm. To check the possible functional groups accountable for the reduction of Ag^+, the technique of fourier transmission infrared (FTIR) spectroscopy (IRAffinity-1, SHIMADZU) was performed at a spectrum frequency of 4000-400 cm^{-1} for each plant extract and AgNPs to compare between them. The X-ray diffraction (XRD) type Philips PW1730 was employed to examine the crystallization characteristics of the green produced Aelu-AgNPs in the range of 2 theta from 10°C to 80°C. The morphology of Aelu-AgNPs were analyzed using the FESEM (field-emission scanning electron microscopy) model TESCAN, MIRA3, the size of nanoparticles (NPs) was estimate via the software ImageJ. The type and proportion of elements present in the AgNPs were determined by EDX (energy dispersive X-rays). Zeta potential analyzer (HORIBA SZ-100) was examined the stability of the NPs.

Antibacterial activity of Aelu-AgNPs

We used [15], agar well diffusion method with some modifications to investigate AgNPs efficacy against MDR bacteria. Twelve pathogenic bacteria were collected from patients at the Al-Fayhaa Burn Centre at Al-Fayhaa teaching hospital in Basra, Iraq: *Pseudomonas aerugenosa*, *Staphylococcus aureus*, *Proteus mirabilis*, *Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae*, *S. haemolyticus, Enterococcus faecium*, *S. epidermidis*, *Klebsiella pneumoniae*, *S. hominis*, *Citrobacter freundii*, and *Providencia rettgeri* (Table 1). Bacterial inoculum with 0.5 McFarland were applied on Mueller-Hinton agar (MHA) plates utilizing a ster-

ilized cotton swab. A 6-mm sterile cork borer drilled six wells into each plate after 30 minutes of room temperature incubation. A stock solution was prepared by dissolving 15 mg of Aelu-AgNPs powder in 15 ml of dimethyl sulfoxide (DMSO), then added 100 µl of two folded serial concentrations (1000 – 62.5 µg/ml) to the wells. Furthermore, a negative control treatment was applied by adding the same amount of DMSO to the well. Finally, the plates were incubated for 24 h at 37°C. The hollow zone formed around a well was denoted as inhibitory activity of AgNPs.

Table 1.

Antibiogram of selected pathogenic bacteria against antibiotics

Bacterial isolates	Antibiotics
P. aeruginosa	TC, TCC, PRL, TZP, CAZ, FEP, ATM, IMI, MRP, AK, CN, TOB, CIP
E. coli	TC, TCC, PRL, TZP, CAZ, FEP, ATM, IMI, MRP, CN, TOB, CIP, MN, SXT
K. pneumoniae	TC, TCC, PRL, TZP, CAZ, FEP, ATM, IMI, MRP, AK, CN, TOB, CIP, SXT
P. mirabilis	TC, CAZ, FEP, ATM, TOB, MN
P. rettgeri	TC, TCC, PRL, TZP, CAZ, FEP, ATM, IMI, MRP, TOB, CIP, MN, SXT
C. freundii	TC, TCC, PRL, TZP, CAZ, FEP, IMI, MRP, MN
E. cloacae	TC, TCC, PRL, TZP, CAZ, CAV, CTX, TZC, FEP, ATM, IMI, MRP, CN, TOB, CIP, SXT
S. aureus	CX, BNZ, OX, CN, TOB, LV, MXF, E, TEC, VA, TE, FOS, FC, SXT
S. epidermidis	CX, BNZ, OX, CN, TOB, LV, MXF, E, CD, VA, TE, FOS, FC, RD, SXT
S. hominis	CX, BNZ, OX, E, FC, SXT
S. haemolyticus	CX, BNZ, OX, CN, TOB, LV, MXF, E, CD, TE, FC, RD, SXT
E. faecium	P, E, LNZ, TE, FOS

TC Ticarcillin, PRL Piperacillin, TCC CAZ Ceftazidime, Ticarcillin/Clavulanic Acid, TZP Piperacillin/Tazobactam, CAV Ceftazidime/Avibactam, CTX Cefotaxime, TZC Ceftolozane/Tazobactam, ATM Aztreonam, FEP Cefepime, MRP IMI Imipenem, Meropenem, CIP Ciprofloxacin, AK Amikacin, TOB Tobramycin, CN Gentamicin, MN Minocycline, SXT Trimethoprim/Sulfamethoxazole, CX

Cefoxitin, P Pencillin, BNZ Benzylpenicillin, OX Oxacillin, LV Levofloxacin, E Erythromycin, MXF Moxifloxacin, CD Clindamycin, TEC Teicoplanin, TE Tetracycline, VA Vancomycin, FOS Fosfomycin, FC Fusidic Acid, RD Rifampicin.

MIC and MBC procedure

The MIC (minimum inhibitory concentrations) of *Al*-silver nanoparticles was estimated utilizing the micro-dilution in 96-well microtiter plates. The bacterial suspension of each tested isolate was prepared according to (CLSI, 2024) protocol [16]. To prepare a stock solution with 1000 µg/ml AgNPs, dissolving 10 mg of powder in DMSO, mixing 17.5 ml of Mueller-Hinton broth (MHB) with 2.5 ml of stock solution to obtain a 125 µg/ml concentration, serial dilutions of Aelu-AgNPs were prepared from 125 to 3.9 µg/ml. 100 µl of each concentration was applied to the wells in the rows from A to F. The wells in the rows from A to G, 20 µl of each bacterial suspension was added to it (every single column was represented a distinct bacterial species). 100 µl of MHB added to rows of G and H, which represented the positive and negative controls, respectively (Fig. 1). After incubation for 24 h at 37°C, 20 µl of 0.016% resazurin dye solution (color blue) was applied to the entire wells and incubated at the same conditions for two hours to observe the color change, color blue indicating no bacterial growth, while color pink or purple referring to bacterial growth. The last well in a column with no color change was scored as the MIC value. Calculating MBC (Minimum bactericidal concentrations) involved direct culturing the contents of the MIC well and the higher concentration well on MHA plates. MBC/MIC was discovered.

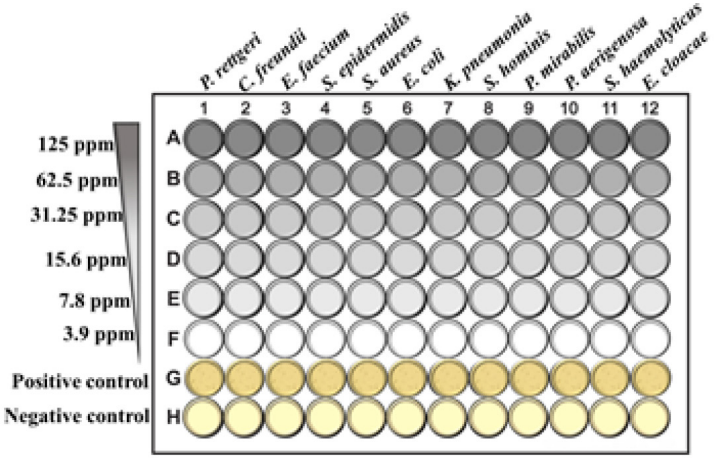


Fig. 1. A MIC procedure

Anticancer activity of Aelu-AgNPs

The cytotoxicity effect of Aelu-AgNPs synthesized by aqueous extract of *A. littoralis* were estimated according to [17] by a 3-(4, 5-dimethylthiazol-2-yl)-2, 5-diphenyl-tetrazolium bromide (MTT) assay using A375 (Human malignant melanoma) as cancer cell line compared with HdFn (Human dermal fibroblasts, neonatal) as a normal cell line. Concentrations 400, 200, 100, 50, and 25 µg/mL were applied for 48 hours to both A375 and HdFn cell lines, the viability percentage and the IC_{50} were calculated after 4 hours of adding the MTT solution.

Antioxidant activity of Aelu-AgNPs

A stable DPPH 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging experiment was utilized to test antioxidant activity according to [18]. To modify concentrations, 0.3 mL of DPPH solution (0.1 mg/mL) and 3 mL of methanol-DMSO (9:1 v/v) were added to separate reaction tubes with 0.5 mL of AgNPs (200, 100, 50, 25, and 12.5 µg/mL). After a quick shaking, the tubes incubated at room temperature in the dark for one hour. An ELIZA reader assessed absorbance at 517 nm after incubation. DPPH and methanol-DMSO were the negative controls, while ascorbic acid was the reference standard.

Statistical analysis

All data in this study was expressed as mean plus or minus standard deviation. The data of antibacterial activity analyzed using one-way analysis with SPSS version 22 software. Statistical significance was considered when *p*-value equal or greater than 0.05. To analyze the antioxidant and anticancer effects, we used Graph Pad Prism 10.4.0, and to display the FTIR and XRD findings, we used Origin Pro 10.15.

Results and discussion

Biosynthesis of Aelu-AgNPs

As shown in Fig. 2, reducing silver ions into AgNPs using the aqueous extract of *A. littoralis* was observed by the change in the solution color after 7 days of incubation in the dark at room temperature from yellowish brown to deep brown due to stimulation of surface plasmon resonance (SPR) in Aelu-AgNPs. It typically takes several hours to complete the bioreduction process, which might explain why the color shift is happening so slowly at room temperature, when AgNPs develop and proliferate slowly [19]. The combination color changed because several secondary metabolites in the plant extract reduced Ag^{+} ions to Ag^{0}. Many prior studies, like [20] and [21], confirmed AgNPs by color change.

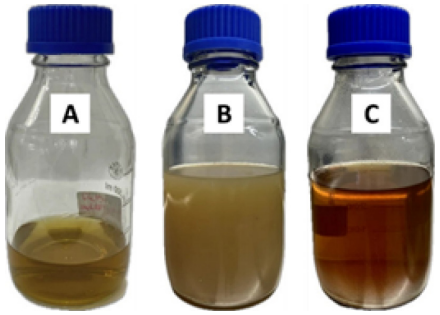


Fig. 2. *A. littoralis* aqueous extract (A), immediately after the addition of $AgNO_3$ (B), color shifting stability after 7 days of adding $AgNO_3$ (C)

Characterization of Aelu-AgNPs

The UV-Vis spectrophotometer analysis employs a simple, efficient and highly sensitive technique. Fig. 3 shows Aelu-AgNPs' UV-Vis absorption spectra, which mainly exhibit a singular narrow absorption peak at 410 nm. The SPR band originates from the closeness of the conduction and valence bands of silver nanoparticles, allowing collective electron oscillation in resonance when exposed to a light wave, thereby generating the SPR absorption band. Size and morphology affect nanoparticle absorption in dielectric medium [22]. According to [23], spherical AgNPs are generally indicated by the distinctive band at 400-420 nm. The present study concurs with several investigations that identified an absorption peak between 400-450 nm, including [24] study, which confirmed the SPR peak at 410 nm.

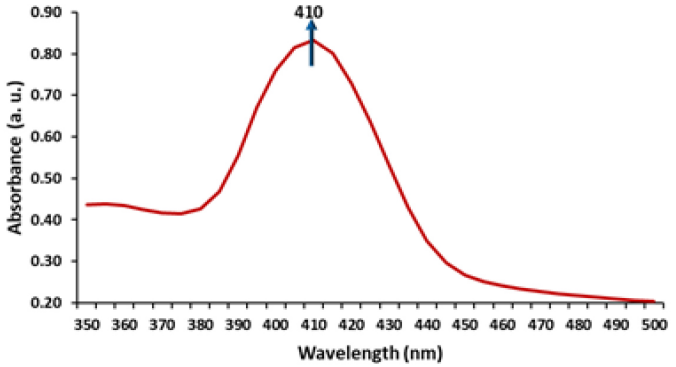


Fig. 3. Uv-Vis spectrum of the green synthesized Aelu-AgNPs utilizing *A. littoralis* aqueous extract

The FTIR spectroscopy was utilized to identify the biomolecules that may have reduced Ag^{+} to Ag^{0} nanoparticles. The spectra of the *A. littoralis* aerial parts extract and Aelu-AgNPs showed similarities, with minor shifts and alterations as seen in Fig. 4. The Aelu-AgNPs exhibited visible bands at 3324, 2316, 2110, 2024, 1957, 1637, 960, 597, and 514 cm^{-1}. The O-H stretching vibrations of the phenolic functional groups were responsible for the broad peak at 3324 cm^{-1}. The bands detected at 2110 cm^{-1} suggested the binding of Aelu-AgNPs with the carbon-carbon triple bonds stretching vibrations of alkyne functional groups. 2024 and 1957 cm^{-1} bands were suggested the binding of Aelu-AgNPs with the C-H bands of aromatic compound functional groups. The peak at 1637 cm^{-1} was a result of the alkene functional groups' C=C stretching. Findings from earlier research pointed the formation of AgNPs, capped with a variety of biomolecules, when observed bands in the spectra between 1700 and 1600 cm^{-1} [20; 25]. Thus, the extracted compound plays a role in biosynthesis, including its reducing, stabilizing, and capping functions.

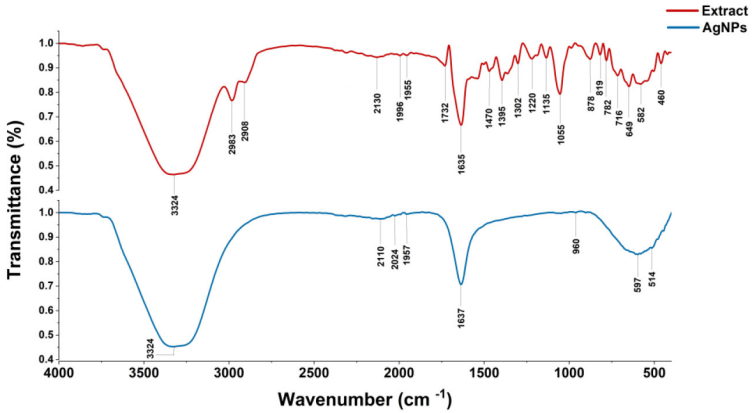


Fig. 4. The spectrum of FTIR for Aelu-AgNPs and *A. littoralis* aqueous extract

The synthesized Aelu-AgNPs were examined via XRD analysis to investigate their crystalline structure. The spectrum pattern in Fig. 5 shows that the main diffraction peaks at 2θ values of 28.14°, 32.52°, 46.64°, 55.22°, 57.82°, 67.79°, 74.95°, and 77.23° reflect 111, 200, 220, 311, 222, 400, 331, and 410 lattice planes of silver. These planes showed that the Aelu-AgNPs were crystalline in nature and had a face-centered cubic lattice (JCPDS file no 84-0713 and 04-0783). The current XRD findings consistent with those of earlier research [26; 27].

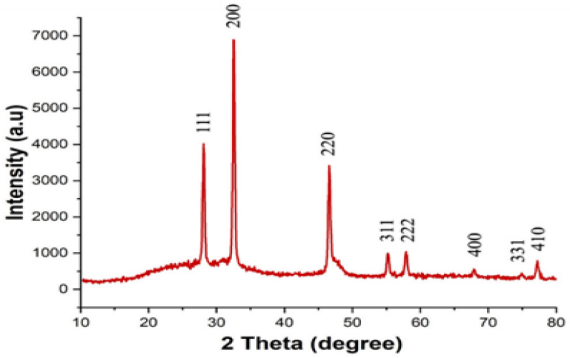


Fig. 5. The spectrum pattern of X-ray diffraction analysis of Aelu-AgNPs

The surface topography and morphology of synthesis Aelu-AgNPs were investigated by FESEM, which depicts that the shape of NPs was mostly spherical and semispherical. The sizes distribution of the synthesized Aelu-AgNPs were estimated under FESEM visualization using ImageJ software, the particle diameters ranging from 20 to 78 nm, averaging 41.43 ± 10.16 nm (Fig. 6). The biosynthesis silver nanoparticles' elemental composition was studied using EDX analysis (Fig. 7), which revealed the existence of silver element at 3 kiloelectron volt (KeV) due to SPR, with high weight percentage (76.51%), indicating excellent purity. while the appearance of other element such as chlorine and oxygen at low weight percentage of 22.05% and 1.31%, respectively may be due to organic biomolecule that capped on silver nanoparticles surface [28]. The shape, size, and chemical composition of the Aelu-AgNPs correspond with the range described in previous investigations [29; 30].

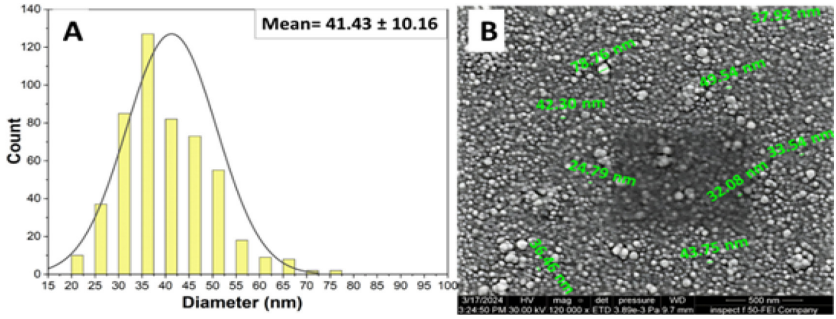


Fig. 6. The Aelu-AgNPs size distribution (A); FESEM image (B)

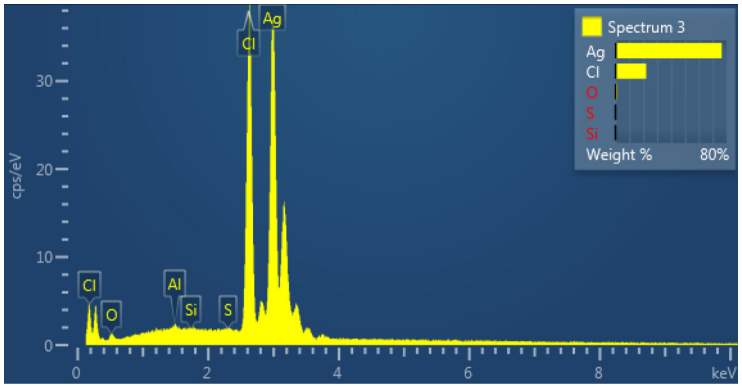


Fig. 7. The spectroscopy of EDX for Aelu-AgNPs

The zeta potential of the green synthesized Aelu-AgNPs was observed as a sharp peak at -40.4 mV (Fig. 8). The nanoparticles' surface seems to be negatively charged and distributed in the colloidal solution. Their strong stability is demonstrated by the negative value, which further supports the repulsion between the particles. Several studies have shown that silver nanoparticles are quite stable around -40 mV or below [31].

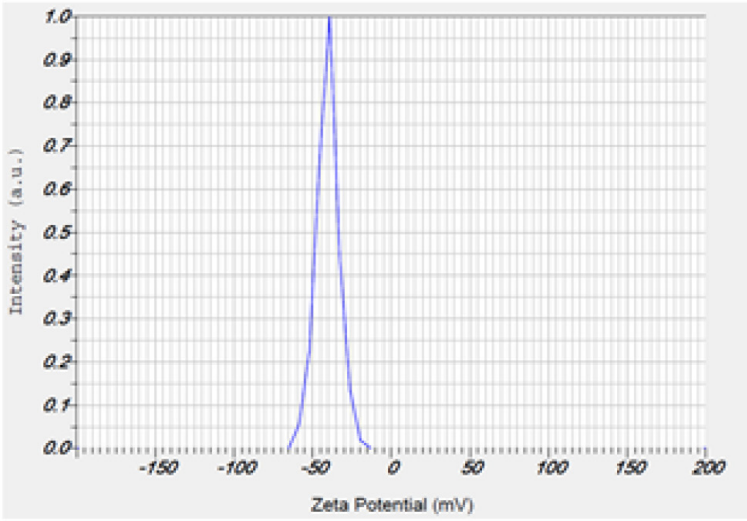


Fig. 8. The zeta potential of biosynthesized Aelu-AgNPs

Antibacterial activity of Aelu-AgNPs

The green synthesized Aelu-AgNPs were diluted in series through a 2-fold manner from 1000 to 62.5 µg/ml and investigated their effectiveness as antibacterial agents against twelve MDR pathogenic bacterial species, including *P. aerugenosa*, *S. aureus*, *P. mirabilis*, *E. coli*, *E. cloacae*, *S. haemolyticus, E. faecium*, *S. epidermidis*, *K. pneumoniae*, *S. hominis*, *C. freundii*, and *P. rettgeri*, utilizing the agar well diffusion method. *P. mirabilis* was most susceptible to the synthesized Aelu-AgNPs, with an inhibitory zone of 19.5 mm, followed by *S. hominis* at 18.9 mm, as illustrated in Table 2 and Fig. 9. In contrast, the least susceptible bacteria were *E. coli* and *E. cloacae*, with inhibitory zones of 15 mm and 15.2mm, respectively. The concentration of 250 µg/ml exhibited the most effective, with the 125 µg/ml concentration coming as a close second. Green synthesized Aelu-AgNPs showed remarkable antibacterial efficacy at various concentrations against all studied bacterial species [32] and [33] reported the efficient antibacterial properties of green synthesized AgNPs derived from the shoot extract of *Carthamus oxycantha* and the leaf extract of *Moringa oleifera*, respectively.

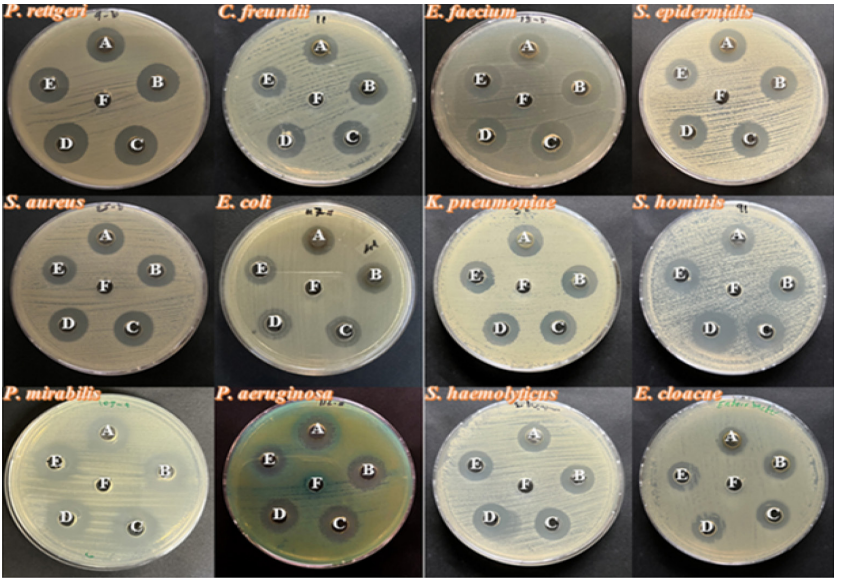


Fig. 9. The antibacterial effects of Aelu-AgNPs obtained from *A. littoralis* aqueous extract. The characters A, B, C, D, E, and F were represented by1000 µg/ml, 500 µg/ml, 250 µg/ml, 125 µg/ml, 62.5 µg/ml, and DMSO, respectively

Several bacterial strains were significantly inhibited by eco-friendly synthesized AgNPs. The unique effect of these nanoparticles may be due to their surface area is much larger than their size, which allows them to interact with bacterial cells more effectively, thus modifying plasma membrane permeability, leading to cell wall rupture, release of cellular contents, and subsequent cell death [34]. AgNPs with very tiny size and high kinetic energy facilitate their penetration into bacterial cells, causing internal alterations leading to the generation and accumulation of free radicals, consequently inducing intracellular oxidative stress and finally resulting in apoptosis. Furthermore, it restricts ATP generation and the functioning of respiratory chain enzymes by binding to their active sites, in addition to preventing mRNA transcription and DNA replication. The synthesis of protein molecules in cells can be impeded by their interaction with ribosomes [35; 36]. In contrast to the efficacy of antibiotics that target a single site within pathogenic bacteria, silver nanoparticles perform their effects on multiple sites at the same time, thereby preventing bacteria from developing resistance mechanisms to these nanoparticles.

Table 2.

Inhibition zone (mm) resulting from the antibacterial properties of Aelu-AgNPs synthesized by *A. littoralis* aqueous extract

Bacterial isolates	Concentrations of Aelu-AgNPs (µg/ml)					Average ($p \leq 0.05$)
P. aerigenosa	16.5 ± 0.98	16.9 ± 0.96	17.6 ± 0.35	17.3 ± 0.35	14.5 ± 0.40	$16.6 \pm 1.25^{a*}$
E. coli	14.9 ± 0.36	15.5 ± 1.12	15.2 ± 0.31	15.0 ± 0.71	14.7 ± 0.62	15.0 ± 0.29^{b}
K. pneumonia	17.4 ± 0.87	17.8 ± 0.32	17.8 ± 1.45	17.0 ± 0.79	15.3 ± 0.25	17.0 ± 1.04^{ac}
P. mirabilis	18.5 ± 0.70	20.4 ± 0.70	19.7 ± 0.89	19.9 ± 1.69	19.0 ± 0.70	19.5 ± 0.75^{d}
P. rettgeri	17.4± 0.96	18.7 ± 0.57	19.1 ± 0.36	19.8 ± 0.42	17.5 ± 0.97	18.5 ± 1.06^{e}
C. freundii	16.3 ± 0.91	17.2 ± 0.47	16.9 ± 0.42	18.0 ± 0.76	15.4 ± 1.07	16.8 ± 1.00^{acf}
E. cloacae	14.0 ± 0.65	14.8 ± 1.15	15.3 ± 0.60	15.5 ± 0.96	16.2 ± 0.80	15.2 ± 0.84^{b}
S. aureus	17.2 ± 1.01	17.6 ± 0.35	18.5 ± 0.75	17.7± 1.29	15.4 ± 0.78	17.3 ± 1.14^{acfg}
S. epidermidis	18.6 ± 0.36	19.2 ± 1.05	19.7 ± 0.99	20.0 ± 0.21	15.9 ± 0.76	18.7 ± 1.62^{eh}
S. hominis	18.7 ± 0.30	19.3 ± 0.91	20.1 ± 0.26	20.4 ± 0.85	15.8± 0.57	18.9 ± 1.78^{dehi}
S. haemolyticus	15.8 ± 0.65	16.5 ± 0.65	17.3 ± 0.61	17.3 ± 0.06	16.1 ± 0.15	16.7 ± 0.87^{acfg}
E. faecium	17.4 ± 0.67	17.8 ± 0.25	20.6 ± 0.91	19.0 ± 0.81	17.8 ± 0.72	18.5 ± 1.30^{chi}
Average ($p \leq 0.05$)	$16.9 \pm 1.47^{a*}$	17.6 ± 1.62^{ab}	18.2 ± 1.79^{bc}	18.1 ± 1.77^{bc}	16.1 ± 1.33	

* Identical letters indicate no significant differences

MIC and MBC

Resazurin-based microtiter dilution assays were performed to determine the MIC and MBC. which depend on the colorimetric shift of resazurin dye

(blue) to resorufin (pink or purple), referring to the existence of cells with metabolic activity within the sample (Table 3 and Fig. 10). The findings indicated that the MIC for all examined bacterial isolates varied from 62.5 to 7.8 μg/ml. *E. faecium*, *S. aureus*, and *S. haemolyticus* exhibited the highest MIC value at 62.5 μg/ml, whereas *P. rettgeri* and *P. mirabilis* demonstrated the lowest MIC at 7.8 μg/ml. Thereafter, we studied the MBC, which is defined as the least concentration that entirely prevents the bacterial growth on agar upon subculturing after each MIC test. The highest MBC was recoeded toward *K. pneumoniae*, *S. epidermidis*, *S. haemolyticus*, *S. aureus*, *E. faecium*, and *E. coli* at 62.5 μg/ml. In contrast, 15.6 μg/ml exhibited the least MBC against *P. rettgeri* and *P. mirabilis*. The MBC/MIC ratio for Aelu-AgNPs ranged from 1 to 2. An AgNPs are deemed as bactericidal whenever the MBC to MIC ratio is below 4, and as bacteriostatic long as it is above 4 [37]. Previous investigations have indicated differing MIC values for green-synthesized AgNPs against different pathogenic bacteria [38] revealed the MIC of biosynthesized AgNPs from *Areca catechu* extract against *P. aeruginosa* and *E. faecalis* was 5.6 and 11.25 μg/ml, respectively, while the MBC was 11.25 μg/ml against each one. In a separate investigation, the MIC of green formed AgNPs reduced by *Moringa oleifera* was 250 μg/ml, with a MBC of 500 μg/ml against *E. coli*. On the other hand, the MIC and MBC against *S. aureus* were 250 and 2000 μg/ml, respectively [39].

Table 3.

The values of MIC and MBC with the MIC/MBC ratio of biosynthesized Aelu-AgNPs from *A. littoralis* against tested pathogenic bacteria

	MIC (μg/ml)	MBC (μg/ml)	MBC/MIC
K. pneumoniae	31.25	62.5	2
C. freundii	15.6	31.25	2
S. epidermidis	31.25	62.5	2
E. faecium	62.5	62.5	1
E. cloacae	15.6	31.25	2
P. rettgeri	7.8	15.6	2
E. coli	31.25	62.5	2
S. hominis	15.6	31.25	2
P. mirabilis	7.8	15.6	2
P. aeruginosa	15.6	31.25	2
S. haemolyticus	62.5	62.5	1
S. aureus	62.5	62.5	1

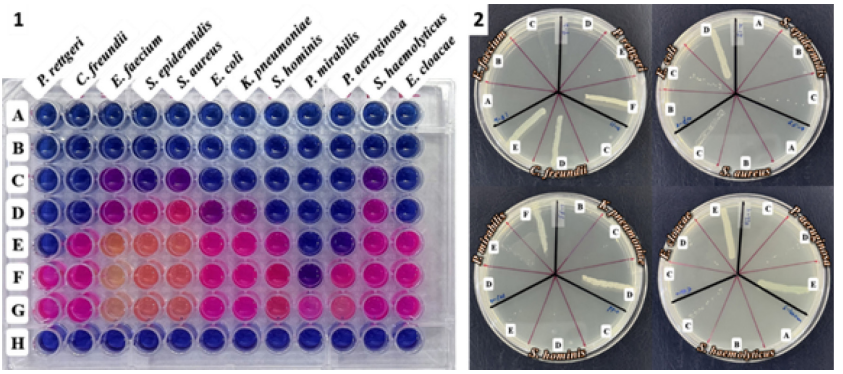


Fig. 10. The micro-titer plate of MIC test after incubation for 24 hours (1), The plates of MBC test after 24 hours of incubation (2), where A: (125 µg/ml), B: (62.5 µg/ml), C: (31.25 µg/ml), D: (15.6 µg/ml), E: (7.8 µg/ml), F: (3.9 µg/ml), G: (positive control), and H: (negative control)

Anticancer activity of Aelu-AgNPs

The MTT assay was used to evaluate the cytotoxic effect of silver nanoparticles at a various concentration (400, 200, 100, 50, 25 µg/ml) on the A375 as cancer cell line compared with HdFn as a normal cell line. After 24 hours of exposure to Aelu-AgNPs, a reduction in the viability of both cancer and normal cell lines was observed as the concentration of Aelu-AgNPs increased, with more cytotoxic effect against cancer cells compared to normal cells at all tested concentrations as shown in Fig. 11. The current study reported the IC_{50} of Aelu-AgNPs against A375 at 71.04 µg/ml, while in the normal cell line the IC_{50} was equal to 148.6 µg/ml, this variation in the IC_{50} value confirm the potential of anticancer activity of Aelu-AgNPs, it was observed that when the concentration was decreased, the most effective concentration of Aelu-AgNPs with lowest toxicity against normal cell was 50 µg/ml and 25 µg/ml with 6.8% and 5.2% inhibition respectively, while for cancer cell the inhibition for these concentration was 27.2% and 15.6% respectively.

The study found that IC_{50} value of AgNPs against A375 cell line was less than [40] result that recorded an IC_{50} of 121.7 µg/ml, while it was close to [41] study with 77.03 µg/ml. This variation between studies may be due to several factors, including the type of reduction agent, as well as nanoparticles characteristic including the stability, shape, and size, in addition to cell line used. The effect of AgNPs against A375 cell lines was reported by previous studies, including [42] that confirmed a decrease in cell membrane permeability and mi-

tochondrial membrane potential, which leads to an increase in cytochrome C in the cytosol, and thus activation of caspases which leads to cell death.

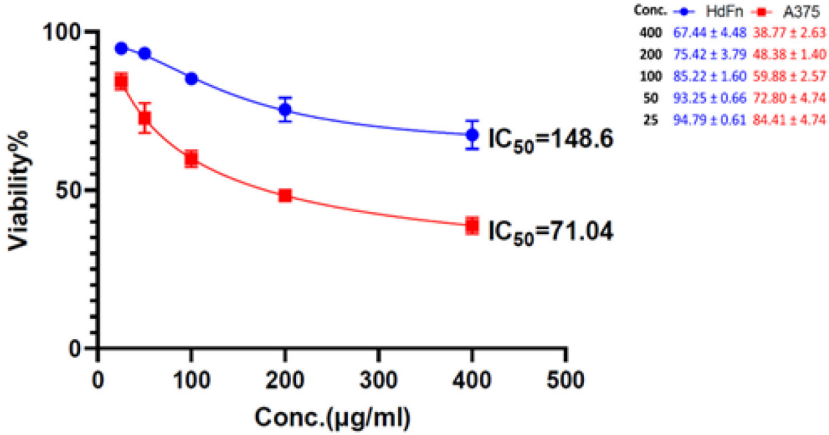


Fig. 11. The cytotoxicity of biosynthesized Aelu-AgNPs utilizing the MTT assay for HdFn and A375 cell lines with their IC_{50}

Antioxidant activity of Aelu-AgNPs

The activity of free radical scavenging of the green synthesized Aelu-AgNPs was evaluated by using DPPH assay, various concentration of Aelu-AgNPs (200, 100, 50, 25, 12.5 µg/ml) with ascorbic acid as a standard exhibited their ability for reduce a stable DPPH radical to DPPH-H as presented in Fig. 12.

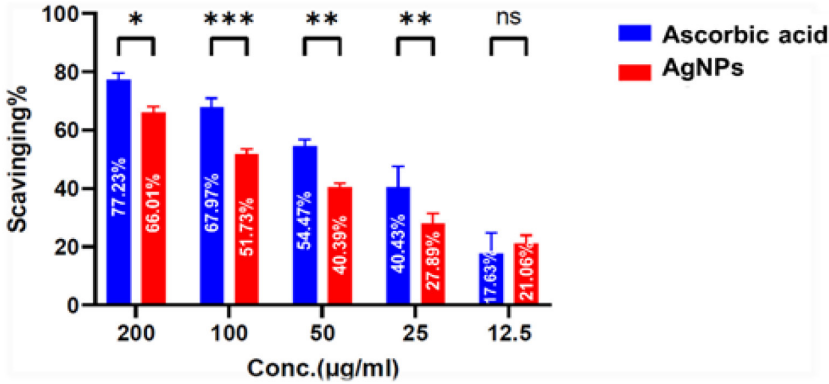


Fig. 12. The antioxidant activity of biosynthesized Aelu-AgNPs obtained from *A. littoralis* aqueous extract utilizing DPPH radical scavenging assay

The antioxidant activity of Aelu-AgNPs observed less than ascorbic acid in all concentration except for 12.5 μg/ml which was higher than a standard with no significant differences, the current investigation recorded the higher antioxidant activity of AgNPs as 66% at 200 μg/ml, at the same concentration this finding was similar to [43] study, which report the scavenging activity as 65.9%, and higher than [44] result with 50% inhibition. Scavenging activity of Aelu-AgNPs seems to be associated with the presence of biologically active compound such as phenols, which was suggested to be as capping and stabilizing agents by FTIR spectra in the current result.

Conclusion

This study found that *A. littoralis* aqueous extract has a considerable ability to produce AgNPs with spherical and semispherical shapes. The Aelu-AgNPs at various concentrations demonstrate high antibacterial activity against all examined pathogenic bacteria mentioned in this study. In comparison to normal cell lines, the green produced AgNPs exhibited a higher level of cytotoxicity against cancer cell lines. The antioxidant activity was found more effective at the lower concentration of biosynthesized Aelu-AgNPs compared to ascorbic acid. Consequently, the potential green synthesized AgNPs utilizing the *A. littoralis* aqueous extract are advantageous for biological applications, including antibacterial, anticancer, and antioxidant activity.

References

1. Adebayo-Tayo, B. C., Ekundayo-Obaba, O., & Falodun, O. I. (2020). Antimicrobial potential of bioactive metabolites and silver nanoparticles from *Bacillus* spp. and of some antibiotics against multidrug resistant *Salmonella* spp. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, *17*(5), 511-522. https://doi.org/10.4274/tjps.galenos.2019.46548 EDN: https://elibrary.ru/CQLULG
2. Catalano, A., Iacopetta, D., Ceramella, J., Scumaci, D., Giuzio, F., Saturnino, C., & Sinicropi, M. S. (2022). Multidrug resistance (MDR): A widespread phenomenon in pharmacological therapies. *Molecules*, *27*(3), 616-634. https://doi.org/10.3390/molecules27030616 EDN: https://elibrary.ru/HEJIDP
3. Khalil, M. A., El Maghraby, G. M., Sonbol, F. I., Allam, N. G., Ateya, P. S., & Ali, S. S. (2021). Enhanced efficacy of some antibiotics in presence of silver nanoparticles against multidrug resistant *Pseudomonas aeruginosa* recovered from burn wound infections. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 1-20. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.648560 EDN: https://elibrary.ru/LNGKRA

4. Mikhailova, E. O. (2020). Silver nanoparticles: Mechanism of action and probable bio-application. *Journal of Functional Biomaterials*, *11*(4), 84-110. https://doi.org/10.3390/jfb11040084 EDN: https://elibrary.ru/BHRVSB
5. Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P., & Caro, N. (2021). Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(13), 7202-7223. https://doi.org/10.3390/ijms22137202 EDN: https://elibrary.ru/ZDZBXM
6. Zhang, X. F., Liu, Z. G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, *17*(9), 1534-1568. https://doi.org/10.3390/ijms17091534 EDN: https://elibrary.ru/XTTASF
7. Swanner, J., Fahrenholtz, C. D., Tenvooren, I., Bernish, B. W., Sears, J. J., Hooker, A., Furdui, C. M., Alli, E., Li, W., Donati, G. L., Cook, K. L., Vidi, P. A., & Singh, R. (2019). Silver nanoparticles selectively treat triple-negative breast cancer cells without affecting non-malignant breast epithelial cells in vitro and in vivo. *FASEB Bio Advances*, *1*(10), 639-661.
8. Khalil, M. A., El-Shanshoury, A. E. R. R., Alghamdi, M. A., Alsalmi, F. A., Mohamed, S. F., Sun, J., & Ali, S. S. (2022). Biosynthesis of silver nanoparticles by Marine actinobacterium *Nocardiopsis dassonvillei* and exploring their therapeutic potentials. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 1-15.
9. Parveen, K., Banse, V., & Ledwani, L. (2016). Green synthesis of nanoparticles: Their advantages and disadvantages. *AIP Conference Proceedings*, *1724*(1).
10. Vishwanath, R., & Negi, B. (2021). Conventional and green methods of synthesis of silver nanoparticles and their antimicrobial properties. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, *4*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100205 EDN: https://elibrary.ru/ZOITFI
11. Dahoumane, S. A., Mechouet, M., Wijesekera, K., Filipe, C. D., Sicard, C., Bazylinski, D. A., & Jeffryes, C. (2017). Algae-mediated biosynthesis of inorganic nanomaterials as a promising route in nanobiotechnology-a review. *Green Chemistry*, *19*(3), 552-587. https://doi.org/10.1039/c6gc02346k EDN: https://elibrary.ru/YIXMMU
12. Alharbi, N. S., Alsubhi, N. S., & Felimban, A. I. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants: Characterization and application. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *15*(3), 109-124. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.06.012 EDN: https://elibrary.ru/PMPFXW
13. Sytar, O., Mbarki, S., Zivcak, M., & Brestic, M. (2018). The involvement of different secondary metabolites in salinity tolerance of crops. In *Salinity Responses*

and Tolerance in Plants (pp. 21-48). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90318-7_2 EDN: https://elibrary.ru/VBDWHK

14. Reddy, N. V., Li, H., Hou, T., Bethu, M. S., Ren, Z., & Zhang, Z. (2021). Phytosynthesis of silver nanoparticles using *Perilla frutescens* leaf extract: characterization and evaluation of antibacterial, antioxidant, and anticancer activities. *International Journal of Nanomedicine*, *1*, 15-29.
15. Vijapur, L. S., Srinivas, Y., Desai, A. R., Gudigennavar, A. S., Shidramshettar, S. L., & Yaragattimath, P. (2023). Development of biosynthesized silver nanoparticles from *Cinnamomum tamala* for anti-oxidant, anti-microbial and anti-cancer activity. *Journal of Research in Pharmacy*, *27*(2), 769-782.
16. CLSI. (2024). *Performance standards for antimicrobial susceptibility testing, M100*, 34th ed. Clinical and Laboratory Standards Institute.
17. Hussein, A. A., Albarazanchi, S. I., & Al-Shanon, A. F. (2020). Evaluation of anticancer potential for L-glutaminase purified from *Bacillus subtilis*. *International Journal of Pharmaceutical Research*, *12*(1), 293-299.
18. Al-Saffar, A. Z., Al-Shanon, A. F., Al-Brazanchi, S. L., Sabry, F. A., Hassan, F., & Hadi, N. A. (2017). Phytochemical analysis, antioxidant and cytotoxic potentials of *Pelargonium graveolens* extract in human breast adenocarcinoma (MCF-7) cell line. *Asian Journal of Biochemistry*, *12*(1), 16-26.
19. Dada, A. O., Inyinbor, A. A., Idu, E. I., Bello, O. M., Oluyori, A. P., Adelani-Akande, T. A., Okunola, A. A., & Dada, O. (2018). Effect of operational parameters, characterization and antibacterial studies of green synthesis of silver nanoparticles using *Tithonia diversifolia*. *PeerJ*, *6*, 1-17.
20. Chand, K., Cao, D., Fouad, D. E., Shah, A. H., Dayo, A. Q., Zhu, K., Lakhan, M. N., Mehdi, G., & Dong, S. (2020). Green synthesis, characterization and photocatalytic application of silver nanoparticles synthesized by various plant extracts. *Arabian Journal of Chemistry*, *13*(11), 8248-8261. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.01.009 EDN: https://elibrary.ru/VUOGGA
21. Jain, N., Jain, P., Rajput, D., & Patil, U. K. (2021). Green synthesized plant-based silver nanoparticles: Therapeutic prospective for anticancer and antiviral activity. *Micro and Nano Systems Letters*, *9*(1), 1-24. https://doi.org/10.1186/s40486-021-00131-6 EDN: https://elibrary.ru/FOSWMC
22. Salleh, A., Naomi, R., Utami, N. D., Mohammad, A. W., Mahmoudi, E., Mustafa, N., & Fauzi, M. B. (2020). The potential of silver nanoparticles for antiviral and antibacterial applications: A mechanism of action. *Nanomaterials*, *10*(8), 1-20. https://doi.org/10.3390/nano10081566 EDN: https://elibrary.ru/TCWRJZ
23. Raja, S., Ramesh, V., & Thivaharan, V. (2017). Green biosynthesis of silver nanoparticles using *Calliandra haematocephala* leaf extract, their antibacterial

activity and hydrogen peroxide sensing capability. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*, 253-261.

24. Corciovă, A., Mircea, C., Burlec, A. F., Fifere, A., Moleavin, I. T., Sarghi, A., Tuchiluș, C., Ivănescu, B., & Macovei, I. (2022). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using a *Lythrum salicaria* extract and in vitro exploration of their biological activities. *Life*, *12*(10), 1643-1659.
25. Kalpana, D., Han, J. H., Park, W. S., Lee, S. M., Wahab, R., & Lee, Y. S. (2019). Green biosynthesis of silver nanoparticles using *Torreya nucifera* and their antibacterial activity. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(7), 1722-1732.
26. Elumalai, D., Hemavathi, M., Deepaa, C. V., & Kaleena, P. K. (2017). Evaluation of phytosynthesised silver nanoparticles from leaf extracts of *Leucas aspera* and *Hyptis suaveolens* and their larvicidal activity against malaria, dengue and filariasis vectors. *Parasite Epidemiology and Control*, *2*(4), 15-26.
27. Serunting, M. A., Zulfikar, M. A., Setyorini, D. A., Rizki, W. O. S., Kurniawan, R., & Setiyanto, H. (2024). Facile sunlight-irradiation mediated green synthesis of highly stable silver nanoparticles using *Archidendron bubalinum* pods extract for antibacterial activity application. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *10*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100811 EDN: https://elibrary.ru/NBCFTF
28. Naveed, M., Batool, H., Rehman, S. U., Javed, A., Makhdoom, S. I., Aziz, T., Mohamed, A. A., Sameeh, M. Y., Almalki, A. A., Alamri, A. S., & Alhomrani, M. (2022). Characterization and evaluation of the antioxidant, antidiabetic, anti-inflammatory, and cytotoxic activities of silver nanoparticles synthesized using *Brachychiton populneus* leaf extract. *Processes*, *10*(8), 1521-1539. https://doi.org/10.3390/pr10081521 EDN: https://elibrary.ru/FEXTOS
29. Tufail, M. S., Liaqat, I., Andleeb, S., Naseem, S., Zafar, U., Sadiqa, A., Liaqat, I., Ali, N. M., Bibi, A., Arshad, N., & Saleem, G. (2022). Biogenic synthesis, characterization and antibacterial properties of silver nanoparticles against human pathogens. *Journal of Oleo Science*, *71*(2), 257-265. https://doi.org/10.5650/jos.ess21291 EDN: https://elibrary.ru/YCISAT
30. Shareef, A. A., Farhan, F. J., & Alriyahee, F. A. A. (2024). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Typha domingensis* Pers. Pollen (qurraid) and Evaluate its Antibacterial Activity. *Baghdad Science Journal*, *21*(1), 28-40.
31. Surega, R., Anita, B., Ramakrishnan, S., Gunasekaran, K., & Nakkeran, S. (2020). Synthesis and characterization of AgNps using plant extracts. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *9*, 1939-1947. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.902.221 EDN: https://elibrary.ru/DVCFTH

32. Shareef, A. A., Hassan, Z. A., Kadhi, M. A., & Al-Mussawi, A. A. (2022). Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Synthesized by Aqueous Extract of *Carthamus oxycantha* M. Bieb. Against Antibiotics Resistant Bacteria. *Baghdad Science Journal*, *19*(3), 460-468. https://doi.org/10.21123/BSJ.2022.19.3.0460 EDN: https://elibrary.ru/HDLJFK
33. Shaaban, M. T., Zayed, M., & Salama, H. S. (2023). Antibacterial potential of bacterial cellulose impregnated with green synthesized silver nanoparticle against *S. aureus* and *P. aeruginosa*. *Current Microbiology*, *80*(2), 75-84. https://doi.org/10.1007/s00284-023-03182-7 EDN: https://elibrary.ru/IJDQXR
34. Qin, W., Wang, C. Y., Ma, Y. X., Shen, M. J., Li, J., Jiao, K., Tay, F. R., & Niu, L. N. (2020). Microbe-mediated extracellular and intracellular mineralization: environmental, industrial, and biotechnological applications. *Advanced Materials*, *32*(22), 1-39. https://doi.org/10.1002/adma.201907833 EDN: https://elibrary.ru/PVAAEA
35. Yassin, M. T., Mostafa, A. A. F., Al-Askar, A. A., & Al-Otibi, F. O. (2022). Synergistic antibacterial activity of green synthesized silver nanomaterials with colistin antibiotic against multidrug-resistant bacterial pathogens. *Crystals*, *12*(8), 1-20. https://doi.org/10.3390/cryst12081057 EDN: https://elibrary.ru/OCNPZL
36. Farhan, F. J., & Shareef, A. A. (2024). Biosynthesis of silver nanoparticles by extracellular metabolites of marine *Kocuria flava* and investigated its role in enhancing of antibacterial activity of ciprofloxacin. *Baghdad Science Journal*, *22*(1), 1-20.
37. Abdellatif, A. A., Alhathloul, S. S., Aljohani, A. S., Maswadeh, H., Abdallah, E. M., Musa, K. H., & ElHamd, M. A. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles incorporated aromatherapies utilized for their antioxidant and antimicrobial activities against some clinical bacterial isolates. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, *2022*(1), 2432758.
38. Choi, J. S., Jung, H. C., Baek, Y. J., Kim, B. Y., Lee, M. W., Kim, H. D., & Kim, S. W. (2021). Antibacterial activity of green-synthesized silver nanoparticles using *Areca catechu* extract against antibiotic-resistant bacteria. *Nanomaterials*, *11*(1), 205-221. https://doi.org/10.3390/nano11010205 EDN: https://elibrary.ru/KVYFZO
39. Audtarat, S., Hongsachart, P., Dasri, T., Chio-Srichan, S., Soontaranon, S., Wongsinlatam, W., & Sompech, S. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles loaded into bacterial cellulose for antimicrobial application. *Nanocomposites*, *8*(1), 34-46. https://doi.org/10.1080/20550324.2022.2055375 EDN: https://elibrary.ru/MPSWPX

40. Hamid, M. K., Ahmed, M. E., & Huseen, D. A. (2024). Biosynthesis of Silver Nanoparticles by *Pseudomonas aeruginosa* and Evaluation of Their Antibacterial Activity and Cytotoxicity Assay Properties. *Iraqi Journal of Medical Sciences*, *22*(1), 154-163.
41. Hamdi, O. H., Saadedin, S. M., & Al-Zaidi, I. H. (2021). Green biosynthesis of silver nanoparticles using gallium aparine green part extract and anti-skin cancer activity. *Medico Legal Update*, *21*(2), 908-913. https://doi.org/10.37506/mlu.v21i2.2799 EDN: https://elibrary.ru/VEJLUE
42. Dawood, H. A., & Ahmed, A. S. (2021). Assessment on cytotoxicity of conjugation galardin (GM6001) with AG-PEG on A375 cell line. *Biochemical & Cellular Archives*, *21*(1), 2789-2799. EDN: https://elibrary.ru/WGZFJP
43. Palle, S. R., Penchalaneni, J., Lavudi, K., Gaddam, S. A., Kotakadi, V. S., & Challagundala, V. N. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles by leaf extracts of *Boerhavia erecta* and spectral characterization and their antimicrobial, antioxidant ad cytotoxic studies on ovarian cancer cell lines. *Letters in Applied Nano Bio Science*, *9*(3), 1165-1176.
44. Karunakaran, S., & Hari, R. (2022). Comparative antioxidant and anti-gout activities of *Citrullus colocynthis* loaded fruit silver nanoparticles with its ethanolic extract. *Avicenna Journal of Medical Biotechnology*, *14*(4), 303-309. https://doi.org/10.18502/ajmb.v14i4.10485 EDN: https://elibrary.ru/KWFDCP

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alaa M. Alrudainy, MSc. Student, Department of Biology
College of Education for Pure Sciences, University of Basrah
Basrah, Iraq
alaaalrudainy0@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4479-4125

Ali Aboud Shareef, PhD., Prof., Department of Biology
College of Education for Pure Sciences, University of Basrah
Basrah, Iraq
aliaboud547@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3545-0349

Поступила 20.02.2024
После рецензирования 16.04.2024
Принята 27.05.2024

Received 20.02.2024
Revised 16.04.2024
Accepted 27.05.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1295 **EDN: RZPONV**
UDC 547.78:577.16:615.4:615.9

Original article

THE ECO-FREIENDLY SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES (AgNPs) USING MARANTA LEUCONEURA ETHANOLIC EXTRACT WITH THE ASSESSMENT OF ANTIBACTERIAL, ANTIOXIDANT, ANTICANCER ACTIVITIES

N.M. Alassadi, G.J. Al-Ghizzawi

Abstract

Background. Considering the significant interest in the use of biosynthesized silver nanoparticles (AgNPs) obtained from plant extracts.

Purpose. The study is aimed to utilize the ethanolic extract of Maranta leuconeura as a reducing agent to form AgNPs, and evaluate its biological potential effect.

Materials and methods. The plant was extracted using 70% ethanol to create silver nanoparticles.The synthesis of AgNPs was initially confirmed by surface plasmon resonance at 400 nm, facilitated by biologically active compounds that contributed to reduction, capping, and stabilization, as evidenced by FTIR analysis, while zeta potential analysis indicated good stability at -37.1 mV. The fabricated AgNPs microscopic study revealed spherical particles of average sizes 39.9 nm, whereas XRD analysis indicated a face-centred cubic (FCC) crystalline nature.

Results and discussion. The antibacterial efficacy of AgNPs against tested isolates indicated that *Staphylococcus epidermidis* and *Proteus mirabilis* exhibited the highest sensitivity to silver nanoparticles, with an average inhibition zone measuring 14.4 mm. The results of the antioxidant activity demonstrated comparable radical scavenging to ascorbic acid, depending on the concentration. The evaluation of cytotoxicity against cancer SiHa cell line and normal HdFn cell line, revealed a concentration-dependent effect and potential anticancer impact, with an IC_{50} of 17.49 and 125 μg/ml for SiHa and HdFn respectively.

Conclusion. Nanoparticles produced from *Maranta leuconeura* leaf extract may be significant in medicinal applications owing to their distinctive features.

Keywords: AgNPs; Maranta leuconeura; antibacterial activity; SiHa; antioxidant activity

For citation. Alassadi, N. M., & Al-Ghizzawi, G. J. (2025). The eco-friendly synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) using Maranta leuconeura ethanolic extract with the assessment of antibacterial, antioxidant, anticancer activities. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 217-236. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1295

Introduction

The characteristics of nanoparticles (NPs), when contrasted with their bulk counterparts, confer significant importance upon them. According to [1], nanomaterials display many features, such as biological, magnetic, catalytic, and optical properties [1]. The main techniques for synthesizing nanoparticles are chemical, physical, and biological processes. Chemophysical approaches may result in energy waste and health issues, whereas the biological (green synthesis) approach is more economical, environmentally friendly, and safer for individuals [2]. In this method, nanoparticles were synthesized by bacteria, fungi, algae, and plants extracts [3].

Green synthesis, utilizing plant extracts, is favoured for its cost-effectiveness, accessibility, efficacy, and flexibility to use of different part of plants including, leaf, flower, fruit, root, stem, bark, seed, nut. Plants include many metabolites, including terpenoids, flavonoids, steroids, tannins, proteins, and starches, which encompass multiple functional groups and are capable of the reduction and prevent aggregation of NPs. Furthermore, nanoparticles synthesized using plant extract exhibit lower cytotoxicity [4].

Among metallic nanoparticles, AgNPs are recognized for their biological application including, antimicrobial, antioxidant, and anticancer properties [5]. Due to the increasing concern of antibiotic resistance, many researchers have turned their attention to silver nanoparticles because of their long-lasting antimicrobial effect on multidrug-resistant bacteria [6; 7]. Due to the diverse targets of silver nanoparticles, it is challenging for bacteria to evolve resistance mechanisms against them [1; 8]. Silver nanoparticles have gained significant importance as possible anticancer treatments due to their specific toxicity targeting cancer cells, as they alter cell shape, induce oxidative stress, and thus reduce cell viability [9].

Several research have revealed the medicinal properties of *Maranta leuconeura*, (family: Marantaceae) often known as the prayer plant. The concentration of chemical compounds like rutin in it makes these effects even more apparent [10]. *Maranta leuconeura* has many health benefits, and one of them is that it contains bioactive compounds, which boost its medicinal potential. To be more specific, rosmarinic acid extracts have garnered a lot of attention

because of the promising effects they may have in preventing and treating illnesses including cancer and atherosclerosis [11].

This is the first study to examine the ability of *Maranta leuconeura* ethanolic extract to synthesize AgNPs and assess their biological applications, including antibacterial efficacy against MDR bacteria, antioxidant activity measured by DPPH, and anticancer activity evaluated via MTT method against SiHa and HdFn cell lines.

Materials and methods

Preparation of *Maranta leuconeura* ethanolic leaf extract

The ethanolic leaf extract of *Maranta leuconeura* was prepared following the methodology of Swilam and Nematallah (2022) [12] with some modifications. The plant leaf was thoroughly rinsed with double distilled water, and then allowed to dry at room temperature in the shaded area. Following drying and grinding, the ethanolic extract was obtained by macerating 30 g of leaf powder in 1 L of 70% ethanol for 1 day at 30 °C. The extract was filtered through Whatman No. 1, then evaporated at 30°C.

Green synthesis of ML-AgNPs solution

The green synthesized solution of *Maranta leuconeura* AgNPs (ML-AgNPs), was prepared according to [13], by mixed 225 ml of 1 mM silver nitrate solution with 25 ml of 3% ethanolic leaves extract. ML-AgNPs solution were purified using centrifugation for 30 minutes at 4000 rpm to remove impurities. The pellets were then washed with deionized water, allowed to dry at ambient temperature, and then stored at 4°C.

Green synthesized ML-AgNPs characterization techniques

UV–Vis spectrum analysis

The initial conformation of the successful formation of ML-AgNPs was performed after color shift by using A UV-Visible spectrophotometer (Thermo, Biomate5) at the wave length of 250-800 nm.

Fourier transmission infrared spectroscopy (FTIR) analysis technique

The KBr technique, utilizing FTIR (ALPHA) at a spectral frequency of 4000–400 cm^{-1}, was employed for each dried plant extract and ML-AgNPs powder to identify the main functional groups responsible for NP reduction and capping.

X-ray diffraction (XRD) analysis of ML-AgNPs

The ML-AgNPs crystalline structures were confirmed by scanning the diffraction pattern with an X-ray diffractometer (PHLIPS, PW1730) from 20°C to 80°C in the 2θ range [14].

Zeta potential analyser

The HORIBA SZ-100 nanoparticle analyzer was utilized in this study to evaluate the stability of ML-AgNPs and to measure their surface charge.

FE-SEM and EDX analyses

FESEM (TESCAN, MIRA3) instrument was used for determined the particle size, and the morphological features of ML-AgNPs. The EDX analysis was conducted to identify the types of chemical elements in the ML-AgNPs sample and their respective percentages.

Antimicrobial activity of ML-AgNPs

Multidrug-resistant bacteria *(Staphylococcus epidermidis, Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Shigella flexneri, Pseudomonas aeruginosa,* and *Proteus mirabilis*) obtained from Al-Fayha and Al-Sadar Teaching Hospitals in Basrah, were used to evaluate ML-AgNPs antimicrobial activity, by agar-well diffusion method. According to (Vijapur *et al.,* 2023) [15], with specific modifications, the bacterial suspension exhibiting 0.5 McFarland turbidity, spreader on plates with Muller-Hinton agar (MHA). Five 6-mm wells were formed. Each plate included a sterile cork borer. To obtain ML-AgNPs 500 µg/ml stock solution, 10 mg of ML-AgNPs powder was mixed with 20 ml of Dimethyl sulfoxide (DMSO). Subsequently, to each well, 100 µl of a two-fold serial dilution was added, with DMSO as a control. The plates were incubated at 37°C for 24 hours. The hollow zones around wells measured the inhibition of ML-AgNPs in millimeters.

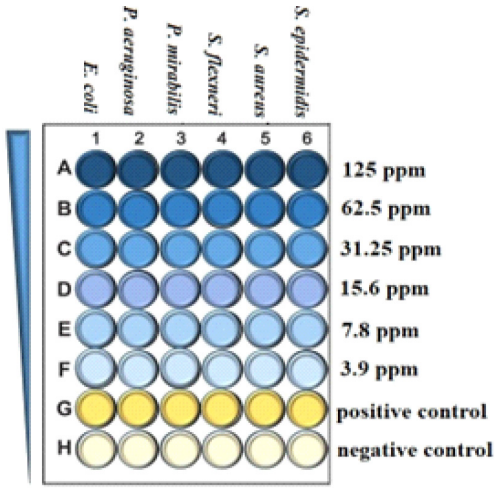


Fig. 1. Schematic of the MIC microtiter plates

Microdilution assays were conducted in 96-well microtiter plates for the minimum inhibitory concentration (MIC), following the CLSI (34th Ed.) procedure [16]. 2.5 ml of the stock solution (500 µg/ml) diluted with 7.5 ml of Muellar-Hinton broth (MHB) to obtain 125 µg/ml. which was used to prepare a serial dilution from 125 to 3.9 µg/ml. To each well in rows A to F, 100 µl of each concentration was added (Fig. 1). Wells in rows A-G for columns 2-5 were then treated with 20 µl of each bacterial suspension. In the last step, 100 µl of MHB was dispensed into the positive and negative control wells located in rows G and H respectively. The plate was incubated at 37°C for 24 hours.

To observe color change, 20 µl of purple resazurin dye solution with a concentration 0.016% was added and incubated for 2 hours. Color Pink or purple indicates bacterial growth, whereas color blue indicates inhibitory concentration. The MIC value represent the final well in a column without color change. By inoculating MHA plates with contents from the MIC well and the well with the highest concentration, the MBC was established.

Evaluation of ML-AgNPs cytotoxicity effect

ML-AgNPs were evaluated for cytotoxicity and antitumor efficacy against cervical cancer cell line (SiHa) and human dermal fibroblasts, neonatal normal cell line (HdFn) by the MTT assay. In 96-well microtiter plates, $1x10^4$ to $1x10^6$ cells/ml were inoculated with 200 µl of media and incubated for 24 hours at 37°C. Subsequently, 200 µl of ML-AgNPs various concentration (ranging from 400 to 25 µg/ml) were added and incubated for two days. Following exposure to ML-AgNPs, 10 µl of MTT solution was added to every well and left to incubate for four hours. The formazan blue crystals were dissolved by adding 100 µl of DMSO to each well after the media was carefully removed. The absorbance was measured at 575 nm using the ELISA reader (Bio-Rad, Germany). The cytotoxicity test was assessed by calculating the IC50 value, which represents the concentration exhibiting 50% inhibitory activity [17].

Antioxidant effect of synthesized ML-AgNPs

Following the methodology of [18], the antioxidant activity of ML-AgNPs was assessed using the DPPH method. A total of 500 µL of ML-AgNPs and ascorbic acid, diluted twofold serially from 200 to 12.5 µg/ml, was added to separate reaction tubes. Concurrently, each concentration was supplemented with 3000 µL of a 9:1 v/v mixture of methanol and DMSO, and 300 µL of a DPPH solution (0.1 mg/ml). The tubes were gently agitated for a few seconds and left in the absence of light for one hour at room temperature. Incubation was followed by absorption measurements at 517 nm using ELISA readers. The

methanol-DMSO mixture and DPPH solution were used as negative controls, while the ascorbic acid used as a reference.

Statistical analysis

Mean ± standard deviation was used for all research data. The antibacterial activity result was assessed using a one-way ANOVA analysis in SPSS, version 22 (IBM Company, Chicago, IL, USA). Significance differences were determined at a p-value ≤ 0.05. Graph Pad Prism 10.4.0 was used to analyze anticancer and antioxidant findings, whereas Origin Pro 10.15 displayed FTIR and XRD data.

Result and discussion

Green synthesis of ML-AgNPs solution

In this eco-friendly method, ML-AgNPs were produced by mixing plant extract with $AgNO_3$ solution. (Fig. 2) demonstrates that after 5 days at room temperature, the reaction solution's color changes from light brown to dark brown. This clearly supports the synthesis of ML-AgNPs. The color change in the silver nanoparticle solution was caused by surface plasmon resonance (SPR), which proved that the secondary metabolites in the plant extract reduced the silver ions. Previous research varied in their assessment of the duration needed for the AgNPs solution to change color. Some reported that the initial color change in medicinal plants occurred within 1 to 4 hours, while others reported it within 3 days to 14 days in non-medicinal plants. This discrepancy is due to the the difference in concentration of bioactive compound, which are crucial to NPs synthesis [19].



Fig. 2. Color shift of the reaction mixture

Green synthesized ML-AgNPs characterization techniques

UV–Vis spectrum analysis

After the visible color change, the synthesis of ML-AgNPs was confirmed using this simple, efficient, and very sensitive method. A single narrow absorp-

tion peak at 400 nm characterizes the UV-vis absorption spectra of AgNPs, as seen in Fig. 3. The SPR absorption band occurs when silver nanoparticles are exposed to light waves due to the proximity of their conduction and valence bands, facilitating collective electron oscillation in resonance. The absorbance is influenced by the chemical environment, nanoparticle dimensions and morphology, dielectric medium, and nanoparticle configuration [20]. The distinctive band of spherical AgNPs, according to [21], typically peaks between 400 and 420 nm. The relationship between SPR absorption band and shape is corroborated by SEM research on ML-AgNPs. Numerous studies have documented an absorption peak between 400 and 450 nm, including [22] study, which identified the SPR peak at 400 nm.

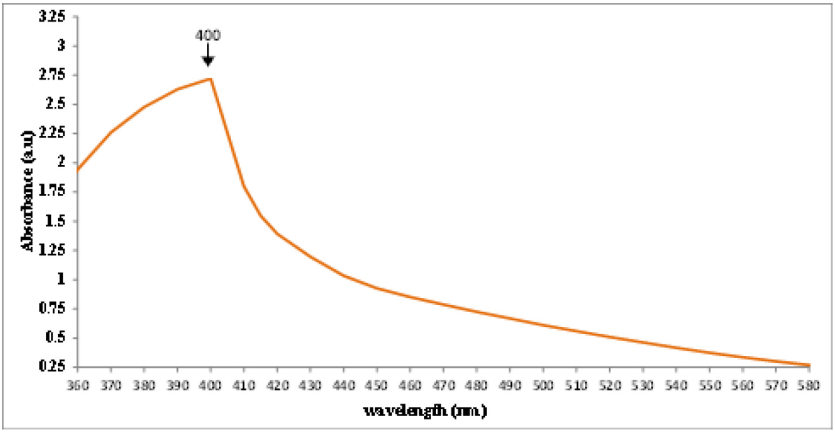


Fig. 3. UV-Visible spectrum of biosynthesis ML-AgNPs

Fourier transmission infrared (FTIR) spectroscopy analysis technique

To determine the plant biomolecule functional groups that reduced silver ions into AgNPs, FTIR analysis was performed. Fig. 4 shows the FTIR spectra for both the *Maranta leuconeura* extract and the ML-AgNPs.

The FTIR spectrum of the plant extract shows multiple peaks, with the most prominent ones being 3352.2 cm^{-1} for the stretching of the O−H group in alcohols and phenolic compounds, 2976.3 cm^{-1} for the stretching of the C−H group in alkanes, 2897.2 cm^{-1} for the stretching of the O−H group in alcohol, 1732.8 cm^{-1} for the C−H bending of aromatic compounds, and 1644.0 cm^{-1} for the C=C stretching vibrations of the alkene functional groups [23]. The FTIR spectrum of the AgNPs was similar to that of the plant extract with slight shift

in the positions of peaks as well as the disappearance of other peaks which indicates the successful synthesis of silver nanoparticles. The O-H stretching vibrations of the phenolic functional and alcoholic groups were identified at 3436.9 cm^{-1} as a wide peak.

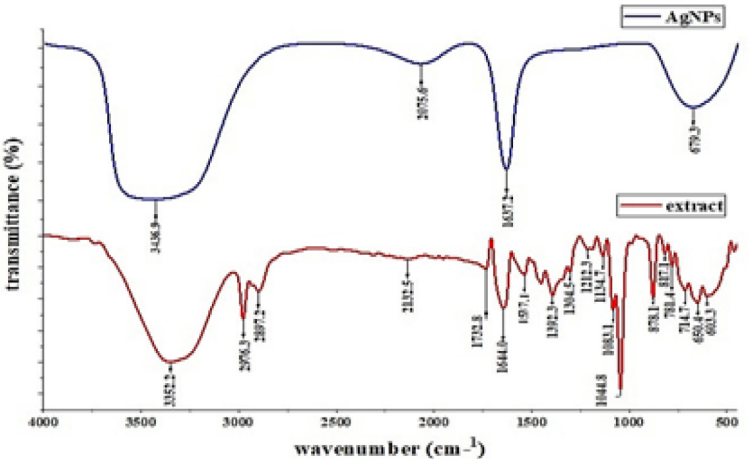


Fig. 4. ML-AgNPs with *Maranta leuconeura* ethanolic leaf extract FTIR spectrum

The alkene functional group's C=C stretching cause the 1636 cm-1 band. The band at 679 cm-1 indicates a link between silver nanoparticles and hydroxyl group oxygen [24]. The AgNPs spectrum shows these functional groups, notably in the 1600-1700 cm^{-1} region, confirming their significance in reducing silver ions to silver nanoparticles and producing a coating layer on their surface to avoid aggregation [25; 26].

X-ray diffraction (XRD) analysis of ML-AgNPs

The findings validated the sample's crystalline characteristics and showed that the silver had a cubic crystalline structure (Fig. 5), as indicated by reference code 96-901-1667. The following 2θ angles showed the principal diffraction peaks: 27.9°, 32.3°, 46.4°, 55.0°, 57.8°, 67.5°, 74.4°, and 77.1°. The crystal planes (111), (200), (220), (311), (222), (400), (311), and (410), respectively, are represented by these peaks. While the larger peaks might suggest some particle size fluctuation, the sharpness of these peaks suggests good crystallinity, the peak at 2θ of 32.38° seems to be associated with silver oxide, while of 27.99° may correspond to the bioorganic compound from *Maranta leuconeura* leaf that act as capping agent of AgNPs [27].

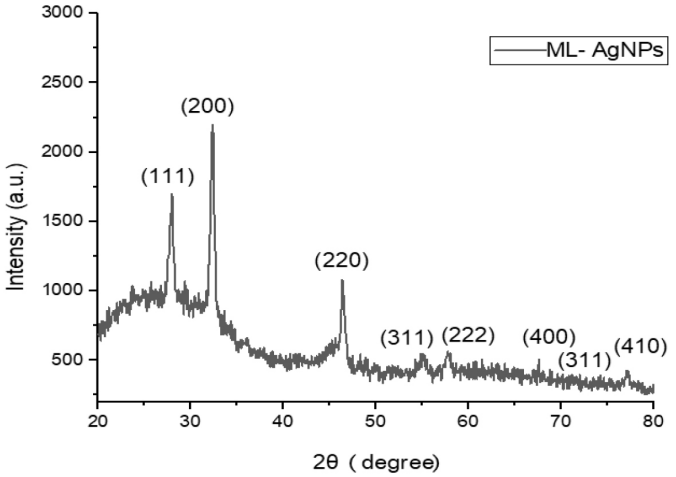


Fig. 5. XRD pattern of the synthesized ML-AgNPs

Zeta potential analyzer

The zeta potential analyzer was used to measure the surface electrical charge to evaluate synthesized nanoparticles stability. Fig. 6 shows that the ML-AgNPs surface in the colloidal solution had a negative charge of -37.1 mV (Fig. 6).

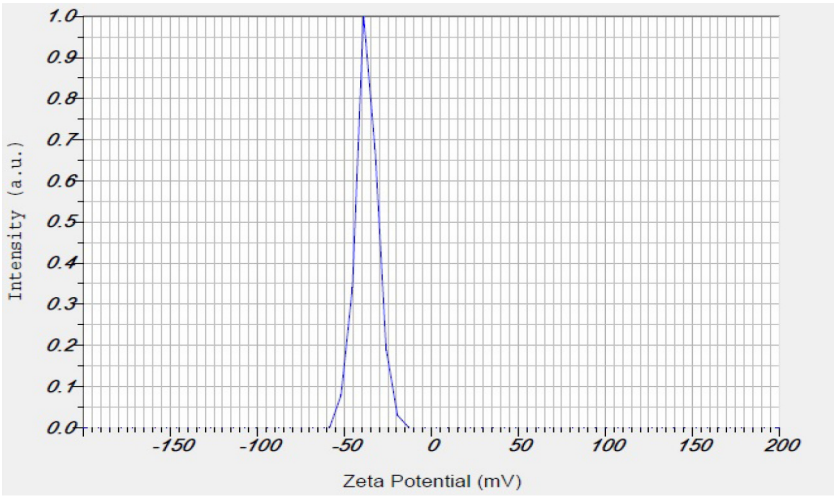


Fig. 6. Green synthesised ML-AgNPs zeta potential analysis

According to [28], the high stability, as shown by a zeta potential value above +30 mV or below −30 mV, is enhanced by particle repulsion. FTIR investigations indicate that the hydroxyl functional groups, which stabilize AgNPs and inhibit aggregation, can be responsible for the negative electrical charge [29].

FE-SEM and EDX analyses

The particles sizes and shape of silver nanoparticles were revealed by the FE-SEM investigation. The biosynthetic ML-AgNPs had an almost homogeneous, spherical in shape and an average diameter of 39.9 ± 5.4 nm at 120000 x magnification, as shown in (Fig. 7) of the FESEM image. The size distribution histogram indicated that the ML-AgNPs size range, approximately between 25 and 55 nm. This narrow size distribution indicates the efficacy of plant extract to produce homogeneous size and shape of ML-AgNPs which is crucial for their activities. Researchers vary in their assessment of the size and morphology of silver nanoparticles, and this variation is attributable to the experimental conditions and reduction agent [30].

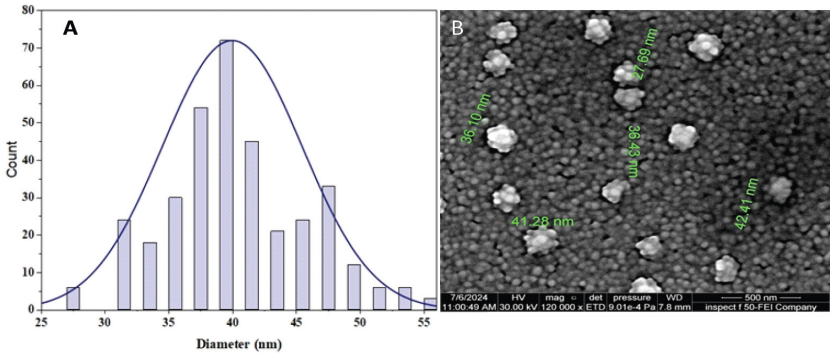


Fig. 7. (A) Size distribution histogram of ML-AgNPs (B) FESEM image of biosynthesis ML-AgNPs

The elemental composition of ML-AgNPs was investigated using EDX spectroscopy. The presence of silver nano crystallites is confirmed by the spectra's high signal peak at around 3 keV (Fig. 8), which indicates a silver element with a high weight percentage of 71.87% [31]. In contrast, the presence of Cl, O, and Ca is indicated by weak signals at 18.55%, 8.54%, and 1.04% weight percentages, respectively. These elements might be present because of the surface biomolecules that capped the ML-AgNPs or could be appear as a result for preparing sample to analysis by FESEM instrument.

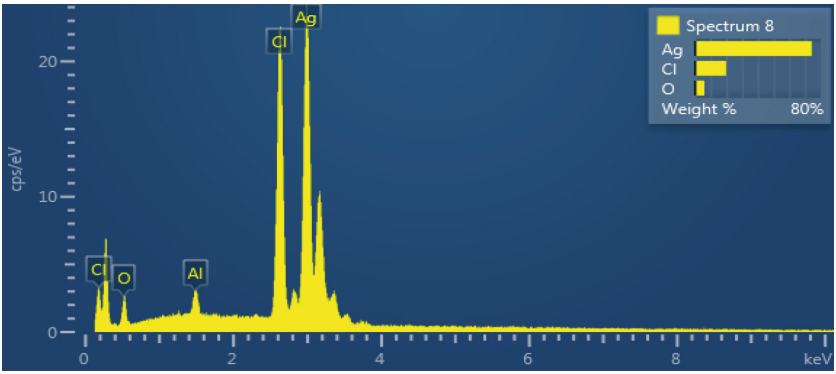


Fig. 8. EDX spectrum analysis of biosynthesized ML- AgNPs

Antimicrobial activity of ML-AgNPs

The ability of ML-AgNPs to inhibit six multidrug-resistant pathogenic bacteria growth shown in Fig. 9. According to the result presented in Table 1, it was clear that *S. epidermidis* and *P. mirabilis* were the most significantly sensitive isolates to ML-AgNPs with 14.4 mm inhibition zone, while *S. aureus* was the lowest sensitive isolates to silver nanoparticle at 12.8 mm of inhibition zone. The highest concentration demonstrated the greatest activity against all tested isolates, whereas the lowest effectiveness of AgNPs was observed at 62.5 µg/ml; this finding is consistent with prior research, including that of [32].

Table 1.

Inhibition zones diameter of tested bacterial isolates by various concentrations of ML-AgNPs

Bacterial isolates	ML-AgNPs Concentration (µg/ml)				Total mean
	500	250	125	62.5	
P. aeruginosa	15 ± 0.49	13 ± 0.55	13 ± 0.51	12 ± 0.10	13.4 ± 1.48 ^{a}
E. coli	15 ± 0.52	14 ± 0.43	13 ± 0.49	12 ± 0.66	13.8 ± 0.95 ^{ab}
P. mirabilis	15 ± 0.55	15 ± 0.51	14 ± 0.10	13 ± 0.49	14.4 ± 0.75 ^{bc}
S. flexneri	15 ± 0.60	14 ± 0.10	14 ± 0.15	12 ± 0.55	13.8 ± 0.96 ^{abcd}
S. aureus	14 ± 0.49	13 ± 0.55	12 ± 0.05	11 ± 0.46	12.8 ± 1.31 ^{ae}
S. epidermidis	15 ± 0.60	15 ± 0.15	14 ± 0.51	13 ± 0.60	14.4 ± 0.68 ^{bcd}
Total mean	15 ± 0.64 ^{a}	14 ± 0.67 ^{b}	13 ± 0.91 ^{c}	12 ± 0.95 ^{d}	13.7 ± 1.16
- distinct letters indicating significant variations at $p \leq 0.05$					

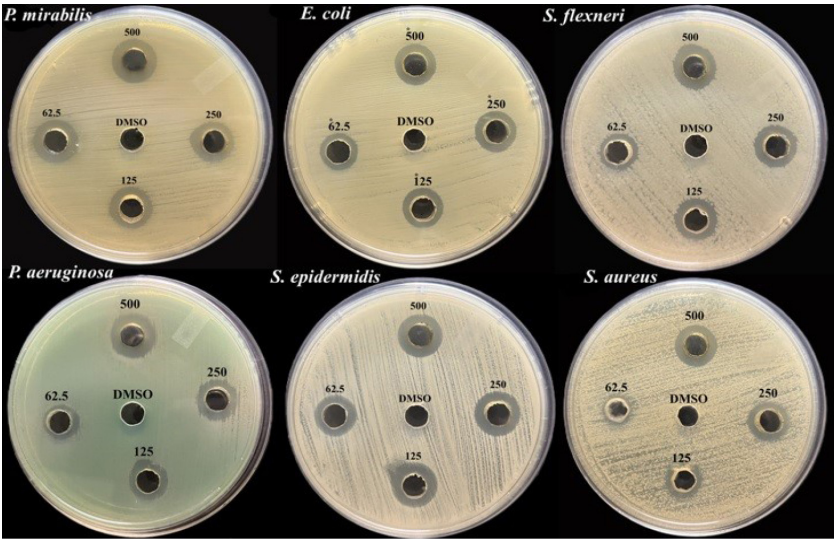


Fig. 9. Antibacterial activity of ML-AgNPs against MDR-bacteria

Table 2 shows the resazurin-based microtiter dilution technique used to determine these isolates' MIC and MBC values. The MIC value was 125 µg/ml for Gr+ bacterial isolates and 62.5 µg/ml for Gr- bacterial isolates. At 125 µg/ml, *S. aureus, S. epidermidis*, and *E. coli* had the lowest MBC findings, whereas *P. aeruginosa, P. mirabilis, and S. flexneri* recorded the highest MBC values at 62.5 µg/ml. The thin peptidoglycan layer of Gr- bacteria cell walls facilitate the penetration of nanoparticles, even at lower concentrations, hence suppressing bacterial growth. This may clarify why their MIC values are lower than those of Gr+ bacteria.

Table 2.

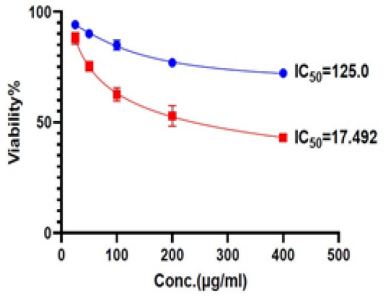
MIC and MBC values tested MDR-isolates

MDR bacteria		MIC value (µg/ml)	MBC value (µg/ml)
Gram-negative bacteria	*P. aeruginosa*	62.5	62.5
	E. coli	62.5	125
	P. mirabilis	62.5	62.5
	S. flexneri	62.5	62.5
Gram-positive bacteria	*S. aureus*	125	125
	S. epidermidis	125	125

The exact process by which silver nanoparticles exert their antibacterial effects is still not fully understood. Researchers propose that the binding of silver nanoparticles to the plasmic membrane damages selective permeability, disrupts respiratory chain enzymes, causes leakage of subcellular components or induces oxidative stress by free radical formation [33; 34].

Evaluation of ML-AgNPs cytotoxicity effect

The potential anticancer and cytotoxic effects of ML-AgNPs were shown by the MTT assay on the HdFn normal cell line and the SiHa cancer cell line, with dosages ranging from 400 to 25 µg/ml. The concentration-dependent inhibition of SiHa and HdFn was seen after 24 hours of exposure to ML-AgNPs, as shown in Fig. 10. The IC_{50} for SiHa was 17.49 µg/ml, while the IC50 for HdFn was 125 µg/ml. These significant differences indicate the anticancer potential of ML-AgNPs. It was obvious that cancer cells were more susceptible to silver nanoparticles than normal cells.



Concentration µg/ml	SiHa (mean+SD)	HdFn (mean+SD)
400	43.05 ± 1.7	72.18 ± 1.6
200	52.85 ± 4.6	76.96 ± 1.4
100	62.65 ± 3.0	84.83 ±2.3
50	75.34 ± 2.2	90.04 ± 1.2
25	87.92 ± 2.4	94.13 ± 1.3

Fig. 10. Cytotoxicity effect of ML-AgNPs

[35] suggest that NPs sized between 10 and 100 nm exhibit less toxicity to normal cells while demonstrating significant toxicity to cancer cells. This indicates that the diameter of the nanoparticles produced in the present study (39.9 nm), as demonstrated by SEM, may have significantly influenced the anticancer effectiveness, or that cancer cells possess an enhanced ability for the cellular uptake of AgNPs. The proposed mechanism of action of biosynthesized nanoparticles on the cervical cancer line, indicated increased ROS generation, cell morphological alterations, and DNA fragmentation that ends in cell death [36]. Several research indicated AgNPs anticancer effect on SiHa cell line such as [37] with an IC_{50} of 18.25 µg/ml, which is comparable to the current study, while other studies have reported different IC50 values including [38] and [39]. This variance may be attributable to cell line type, size, shape and NP surface charge.

Antioxidant effect of synthesized ML-AgNPs

The activities of ML-AgNPs in scavenging free radicals at various concentrations (200, 100, 50, 25 µg/ml) and ascorbic acid as a reference are shown in Fig. 11 and Table 3. The antioxidant activity of AgNPs increased with concentration, confirming their scavenging effect. At all concentrations the scavenging ability of ML-AgNPs was close to the standard, with no significant differences except for 12.5 µg/ml, where it higher than ascorbic acid. The highest scavenging percentage of ML-AgNPs was measured at 200 µg/mL, which was 73.34 ± 1.39 %. This value was greater than the results obtained at the same concentration from [40] (62.22%) and [41] (64.9%).

Table 3.

Effects of AgNPs and ascorbic acid on DPPH radical scavenging

Tested Concentration µg/ml	Scavenging percent (%)	
	ML-AgNPs (mean ±SD)	Ascorbic acid (mean ±SD)
200	73.34 ± 1.3	77.23 ± 2.4
100	64.77 ± 1.4	66.43 ± 0.9
50	52.70 ± 3.2	55.05 ± 1.5
25	42.70 ± 1.8	43.51 ± 0.8
12.5	28.39 ± 0.6	26.11 ± 0.2

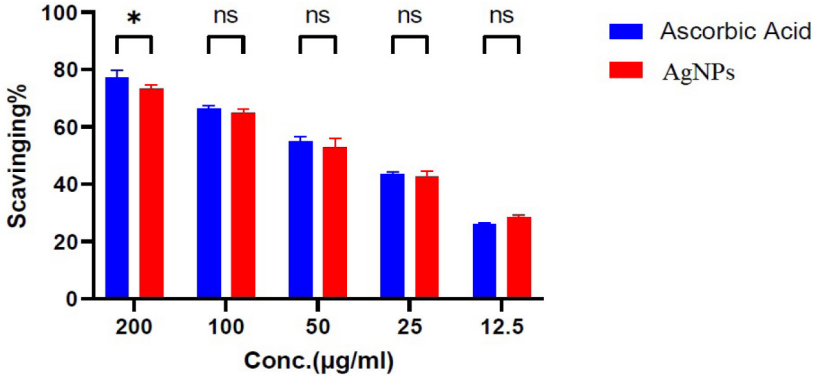


Fig. 11. Free radical scavenging ability of ML-AgNPs and ascorbic acid

[42] proposed that the antioxidant effect of AgNPs caused by the simultaneous action of polyphenols, and the nanoparticles themselves, which function as catalysts, this may explain the capacity of ML-AgNPs, coated by polyphenols (as shown by FTIR spectrum), to scavenge free radicals.

Conclusions

This safe and economical approach effectively synthesized AgNPs, utilizing ethanolic extract of *Maranta leuconeura* leaves. The biosynthesized ML-AgNPs were spherical, nanoscale, non-aggregated, pure, and showed a long term of stability. They demonstrated efficacy against Gr- and Gr+ bacteria, and showed good antioxidant activity close to the ascorbic acid. The present study also revealed distinct cytotoxicity against SiHa cancer cells. Additional in vitro studies are necessary to evaluate cancer cell targeting methodologies.

References

1. Singh, A., Gautam, P. K., Verma, A., Singh, V., Shivapriya, P. M., Shivalkar, S., Sahoo, A. K., & Samanta, S. K. (2020). Green synthesis of metallic nanoparticles as effective alternatives to treat antibiotics resistant bacterial infections: A review. *Biotechnology Reports*, *25*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00427 EDN: https://elibrary.ru/BSVIFJ
2. Ying, S., Guan, Z., Ofoegbu, P. C., Clubb, P., Rico, C., He, F., & Hong, J. (2022). Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations. *Environmental Technology & Innovation*, *26*, 1-20.
3. Arif, R., & Uddin, R. (2021). A review on recent developments in the biosynthesis of silver nanoparticles and its biomedical applications. *Medical Devices & Sensors*, *4*(1), 1-20.
4. Paiva-Santos, A. C., Herdade, A. M., Guerra, C., Peixoto, D., Pereira-Silva, M., Zeinali, M., Mascarenhas-Melo, F., Paranhos, A., & Veiga, F. (2021). Plant-mediated green synthesis of metal-based nanoparticles for dermopharmaceutical and cosmetic applications. *International Journal of Pharmaceutics*, *597*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120311 EDN: https://elibrary.ru/LURTJC
5. Sharma, B., Singh, I., Bajar, S., Gupta, S., Gautam, H., & Kumar, P. (2020). Biogenic silver nanoparticles: Evaluation of their biological and catalytic potential. *Indian Journal of Microbiology*, *60*, 468-474. https://doi.org/10.1007/s12088-020-00889-0 EDN: https://elibrary.ru/TXQPEC
6. Khan, S. A., Shahid, S., & Lee, C. S. (2020). Green synthesis of gold and silver nanoparticles using leaf extract of *Clerodendrum inerme*; characterization, antimicrobial, and antioxidant activities. *Biomolecules*, *10*, 835-865. https://doi.org/10.3390/biom10060835 EDN: https://elibrary.ru/ORGNHP
7. AlKhafaji, M. H., Mohsin, R. H., & Faqri, A. M. A. (2024). Food Additive Mediated Biosynthesis of AgNPs with Antimicrobial Activity Against Hypermucoviscous Enterotoxigenic Foodborne *Klebsiella pneumoniae*. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, *37*(1), 278-295. https://doi.org/10.37077/25200860.2024.37.1.21 EDN: https://elibrary.ru/XGOOMR

8. Fatima, A., Shehzad A., Shahzad R., Khan S., Al-Suhaimi E.A. (2024). Impact of nanoparticles on structural elements within the cells. In *Molecular impacts of nanoparticles on plants and algae* (pp. 111-141). Cambridge, US: Academic Press.
9. Ratan, Z. A., Haidere, M. F., Nurunnabi, M. D., Shahriar, S. M., Ahammad, A. S., Shim, Y. Y., Reaney, M. J. T., & Cho, J. Y. (2020). Green chemistry synthesis of silver nanoparticles and their potential anticancer effects. *Cancers*, *12*(4), 855-881. https://doi.org/10.3390/cancers12040855 EDN: https://elibrary.ru/LGYCNB
10. Habtemariam, S., & Varghese, G. K. (2015). Extractability of rutin in herbal tea preparations of *Moringa stenopetala* leaves. *Beverages*, *1*(3), 169-182.
11. Amoah, S. K., Sandjo, L. P., Kratz, J. M., & Biavatti, M. W. (2016). Rosmarinic acid-pharmaceutical and clinical aspects. *Planta Medica*, *82*(5), 388-406. https://doi.org/10.1055/s-0035-1568274 EDN: https://elibrary.ru/UNJOEO
12. Swilam, N., & Nematallah, K. A. (2020). Polyphenols profile of pomegranate leaves and their role in green synthesis of silver nanoparticles. *Scientific Reports*, *10*(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-020-71847-5 EDN: https://elibrary.ru/JLNOXK
13. Reddy, N. V., Li, H., Hou, T., Bethu, M. S., Ren, Z., & Zhang, Z. (2021). Phytosynthesis of silver nanoparticles using *Perilla frutescens* leaf extract: characterization and evaluation of antibacterial, antioxidant, and anticancer activities. *International Journal of Nanomedicine*, *16*, 15-29.
14. Weeranantanapan, O., Chudapongse, N., Limphirat, W., & Nantapong, N. (2022). *Streptomyces chiangmaiensis* SSUT88A mediated green synthesis of silver nanoparticles: Characterization and evaluation of antibacterial action against clinical drug-resistant strains. *RSC Advances*, *12*, 4336-4345. https://doi.org/10.1039/d1ra08238h EDN: https://elibrary.ru/HXCGDV
15. Vijapur, L. S., Srinivas, Y., Desai, A. R., Gudigennavar, A. S., Shidramshettar, S. L., & Yaragattimath, P. (2023). Development of biosynthesized silver nanoparticles from *Cinnamomum tamala* for anti-oxidant, anti-microbial and anti-cancer activity. *Journal of Research in Pharmacy*, *27*(2), 769-782.
16. CLSI. (2024). *Performance standards for antimicrobial susceptibility testing, M100*, 34th ed. US: Clinical and Laboratory Standards Institute.
17. Hussein, A. A., Albarazanchi, S. I., & Al-Shanon, A. F. (2020). Evaluation of anticancer potential for L-glutaminase purified from *Bacillus subtilis*. *International Journal of Pharmaceutical Research*, *12*(1), 293–299.
18. Al-Saffar, A. Z., Al-Shanon, A. F., Al-Brazanchi, S. L., Sabry, F. A., Hassan, F., & Hadi, N. A. (2017). Phytochemical analysis, antioxidant and cytotoxic

potentials of *Pelargonium graveolens* extract in human breast adenocarcinoma (MCF-7) cell line. *Asian Journal of Biochemistry*, *12*(1), 16-26.

19. Urnukhsaikhan, E., Bold, B. E., Gunbileg, A., Sukhbaatar, N., & Mishig-Ochir, T. (2021). Antibacterial activity and characteristics of silver nanoparticles biosynthesized from *Carduus crispus*. *Scientific Reports*, *11*(1), 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00520-2 EDN: https://elibrary.ru/WAGIAC
20. Salleh, A., Naomi, R., Utami, N. D., Mohammad, A. W., Mahmoudi, E., Mustafa, N., & Fauzi, M. B. (2020). The potential of silver nanoparticles for antiviral and antibacterial applications: A mechanism of action. *Nanomaterials*, *10*(8), 1566-1586. https://doi.org/10.3390/nano10081566 EDN: https://elibrary.ru/TCWRJZ
21. Raja, S., Ramesh, V., & Thivaharan, V. (2017). Green biosynthesis of silver nanoparticles using *Calliandra haematocephala* leaf extract, their antibacterial activity and hydrogen peroxide sensing capability. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*, 253–261.
22. Abdulsahib, S. S. (2021). Synthesis, characterization and biomedical applications of silver nanoparticles. *Biomedicine*, *41*(2), 458-464. https://doi.org/10.51248/.v41i2.1058 EDN: https://elibrary.ru/DTUPFA
23. Sharifi-Rad, M., Pohl, P., & Epifano, F. (2021). Phytofabrication of silver nanoparticles (AgNPs) with pharmaceutical capabilities using *Otostegia persica* (Burm.) Boiss. leaf extract. *Nanomaterials*, *11*(4), 1045-1063. https://doi.org/10.3390/nano11041045 EDN: https://elibrary.ru/RZCTAX
24. Said, A., Abu-Elghait, M., Atta, H. M., & Salem, S. S. (2024). Antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles using *Lawsonia inermis* against common pathogens from urinary tract infection. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *196*(1), 85-98. https://doi.org/10.1007/s12010-023-04482-1 EDN: https://elibrary.ru/CXJVUY
25. Mohammadi, S., Pourseyedi, S., & Amini, A. (2016). Green synthesis of silver nanoparticles with a long lasting stability using colloidal solution of cowpea seeds (*Vigna* sp. L). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *4*(2), 2023-2032. https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.026 EDN: https://elibrary.ru/WVCOSR
26. Chand, K., Cao, D., Fouad, D. E., Shah, A. H., Dayo, A. Q., Zhu, K., Lakhan, M. N., Mehdi, G., & Dong, S. (2020). Green synthesis, characterization and photocatalytic application of silver nanoparticles synthesized by various plant extracts. *Arabian Journal of Chemistry*, *13*(11), 8248-8261. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.01.009 EDN: https://elibrary.ru/VUOGGA
27. Gevorgyan, S., Schubert, R., Falke, S., Lorenzen, K., Trchounian, K., & Betzel, C. (2022). Structural characterization and antibacterial activity of silver

nanoparticles synthesized using a low-molecular-weight Royal Jelly extract. *Scientific Reports*, *12*(1), 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-022-17929-y EDN: https://elibrary.ru/YEMCEQ

28. Nagaraja, S., Ahmed, S. S., DR, B., Goudanavar, P., Fattepur, S., Meravanige, G., Shariff, A., Shiroorkar, P. N., Habeebuddin, M., & Telsang, M. (2022). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles of *Psidium guajava* leaf extract and evaluation for its antidiabetic activity. *Molecules*, *27*(14), 1-12. https://doi.org/10.3390/molecules27144336 EDN: https://elibrary.ru/HCTIUU
29. Wan Mat Khalir, W. K. A., Shameli, K., Jazayeri, S. D., Othman, N. A., Che Jusoh, N. W., & Hassan, N. M. (2020). Biosynthesized silver nanoparticles by aqueous stem extract of *Entada spiralis* and screening of their biomedical activity. *Frontiers in Chemistry*, *8*, 620-635.
30. Velgosova, O., Mačák, L., Čižmárová, E., & Mára, V. (2022). Influence of reagents on the synthesis process and shape of silver nanoparticles. *Materials*, *15*(19), 1-10. https://doi.org/10.3390/ma15196829 EDN: https://elibrary.ru/CLTUTY
31. Akter, S., Lee, S. Y., Siddiqi, M. Z., Balusamy, S. R., Ashrafudoulla, M., Rupa, E. J., & Huq, M. A. (2020). Ecofriendly synthesis of silver nanoparticles by *Terrabacter humi* sp. nov. and their antibacterial application against antibiotic-resistant pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(24), 1-19.
32. Shareef, A. A., Hassan, Z. A., Kadhim, M. A., & Al-Mussawi, A. A. (2022). Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Synthesized by Aqueous Extract of *Carthamus oxycantha* M. Bieb. Against Antibiotics Resistant Bacteria. *Baghdad Science Journal*, *19*(3), 460-468. https://doi.org/10.21123/BSJ.2022.19.3.0460 EDN: https://elibrary.ru/HDLJFK
33. Aref, M. S., & Salem, S. S. (2020). Bio-callus synthesis of silver nanoparticles, characterization, and antibacterial activities via *Cinnamomum camphora* callus culture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *27*. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101689 EDN: https://elibrary.ru/KZJPMQ
34. Elakraa, A. A., Salem, S. S., El-Sayyad, G. S., & Attia, M. S. (2022). Cefotaxime incorporated bimetallic silver-selenium nanoparticles: promising antimicrobial synergism, antibiofilm activity, and bacterial membrane leakage reaction mechanism. *RSC Advances*, *12*(41), 26603-26619. https://doi.org/10.1039/d2ra04717a EDN: https://elibrary.ru/WGFIIV
35. Sukhanova, A., Bozrova, S., Sokolov, P., Berestovoy, M., Karaulov, A., & Nabiev, I. (2018). Dependence of nanoparticle toxicity on their physical and chemical properties. *Nanoscale Research Letters*, *13*, 1-21. https://doi.org/10.1186/s11671-018-2457-x EDN: https://elibrary.ru/XYCZJR

36. Pucelik, B., Sułek, A., Borkowski, M., Barzowska, A., Kobielusz, M., & Dąbrowski, J. M. (2022). Synthesis and characterization of size-and charge-tunable silver nanoparticles for selective anticancer and antibacterial treatment. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *14*(13), 14981-14996. https://doi.org/10.1021/acsami.2c01100 EDN: https://elibrary.ru/WSSINJ
37. Mohammed Asik, R., Manikkaraja, C., Tamil Surya, K., Suganthy, N., Priya Aarthy, A., Mathe, D., Sivakumar, M., Archunan, G., & Padmanabhan, P., Gulyas, B. (2021). Anticancer Potential of L-Histidine-Capped Silver Nanoparticles against Human Cervical Cancer Cells (SiHA). *Nanomaterials*, *11*(11), 3154-3171. https://doi.org/10.3390/nano11113154 EDN: https://elibrary.ru/EQLPXQ
38. Tripathi, D., Modi, A., Smita, S. S., Narayan, G., & Pandey-Rai, S. (2022). Biomedical potential of green synthesized silver nanoparticles from root extract of *Asparagus officinalis*. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, *31*(1), 213-218.
39. Gowda, A. T. C. S., Anil, V. S., & Raghavan, S. (2024). Phytosynthesis of silver nanoparticles using aqueous sandalwood (*Santalum album* L.) leaf extract: Divergent effects of SW-AgNPs on proliferating plant and cancer cells. *PLOS ONE*, *19*(4), 1-32.
40. Subramanyam, G. K., Gaddam, S. A., Kotakadi, V. S., Palithya, S., Penchalaneni, J., & Challagundla, V. N. (2021). *Argyreia nervosa* (Samudra pala) leaf extract mediated silver nanoparticles and evaluation of their antioxidant, antibacterial activity, in vitro anticancer and apoptotic studies in KB oral cancer cell lines. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, *49*(1), 634-649. https://doi.org/10.1080/21691401.2021.1996384 EDN: https://elibrary.ru/PGOFBV
41. Palle, S. R., Penchalaneni, J., Lavudi, K., Gaddam, S. A., Kotakadi, V. S., & Challagundala, V. N. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles by leaf extracts of *Boerhavia erecta* and spectral characterization and their antimicrobial, antioxidant and cytotoxic studies on ovarian cancer cell lines. *Letters in Applied NanoBioScience*, *9*(3), 1165-1176. https://doi.org/10.33263/lianbs93.11651176 EDN: https://elibrary.ru/OOAEQA
42. Khorrami, S., Zarrabi, A., Khaleghi, M., Danaei, M., & Mozafari, M. R. (2018). Selective cytotoxicity of green synthesized silver nanoparticles against the MCF-7 tumor cell line and their enhanced antioxidant and antimicrobial properties. *International Journal of Nanomedicine*, *13*, 8013-8024.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Noor M. Alassadi, MSc. Student, Department of Biology
College of Education for Pure Sciences, University of Basrah
Basrah, Iraq

nooralassadi887@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0700-2852

Ghaida'a J. Al-Ghizzawi, PhD, Prof., Department of Biology
College of Education for Pure Sciences, University of Basrah
Basrah, Iraq
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0533-1143
ghaeda.abdulnabi@uobasrah.edu.iq

Поступила 20.02.2024
После рецензирования 01.04.2024
Принята 27.05.2024

Received 20.02.2024
Revised 01.04.2024
Accepted 27.05.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1072 **EDN: RCSHPU**
УДК 575.174.015.3 (224.22)

CC BY NC ND

Научная статья

ВЫЯВЛЕНИЕ НОСИТЕЛЕЙ МУТАНТНЫХ АЛЛЕЛЕЙ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЁМНОГО РЕГИОНА РОССИИ С ПОМОЩЬЮ NGS-СЕКВЕНИРОВАНИЯ

Э.А. Снегин, А.С. Бархатов, А.А. Сычев, Е.А. Снегина, С.Р. Юсупов, А.Ю. Юсупова

Аннотация

Обоснование. Для проведения качественной селекционной работы в популяциях крупного рогатого скота необходимо использовать методы секвенирования нового поколения (NGS), которые позволяют за короткий промежуток времени оценить большие выборки животных по значительному количеству однонуклеотидных замен (SNP).

Материалы и методы. Проведено генотипирование крупного рогатого скота голштинской породы черно-пестрой масти, разводимого в центрально-черноземном регионе России (Белгородская область), с помощью NGS-секвенирования (мультилокусная панель TruSeq® Bovine Parentage Kit, Illumina США).

Результаты. Было установлено, что большинство исследуемых животных являются межлинейными гибридами. Корреляционный анализ на соответствие животных линий «Reflection Sovereign», «Montvik Chieftain» и «Vis Back Ideal» показал отсутствие корреляционной зависимости (r=0,165, p=0,106). Кроме того, 10,4 % голов являлись носителями гена, относящегося голштинской породе красно-пестрой масти. Также 61,5 % голов оказались носителями мутантного аллеля *G* (_SNPchr8_108833985), который снижает иммунитет и способствует развитию моракселлеза. Выявлены носители ряда неблагоприятных мутаций, таких как Синдактилия (SY) – 8.3 % голов, мутации, приводящие к лейкизму (ген *MITF*) – 12,3% голов; а также мутации гена мелакортинового рецептора (*MC1R*) – 10,4% голов. Носители полулетальной мутации (аллель *T*) в гене *APAF1* составили 3,0 % голов, носители летальной

мутации (аллеля *C*) гена *HH3* – 14,6% голов, носитель летальной мутации (аллеля *C*) гена *HHB* (BLAD) – 1,0% голов, носители полулетальной мутации (аллеля *A*) гена SLC35A3 – 2,0% голов. Все это свидетельствует об ошибках в селекционной работе. На фоне указанных неблагоприятных генетических факторов был отмечены носители мутаций с положительным эффектом, влияющих на мясную и молочную продуктивность, а именно: носители мутации гена *MSTN* (аллель *T*) – 50% голов, носители мутации в гене *ABCG2* (аллель *C*) – 4,2 % голов, носители мутации в гене *DGAT1* (аллель *A*) – 28.1 % голов, носитель мутации в гене *CSN1S1* (аллель *A*) – 1 % голов.

Заключение. Полагаем, что корректировка селекционной работы в отношение указанных мутаций, как с отрицательным, так и с положительным эффектом, позволит хозяйствам создавать племенные ядра высокопродуктивных животных, что будет способствовать повышение количества и качества молочной продукции.

Ключевые слова: крупный рогатый скот; SNP; NGS-секвенирование; генотипирование; летальные аллели

Для цитирования. Снегин, Э. А., Бархатов, А. С., Сычев, А. А., Снегина, Е. А., Юсупов, С. Р., & Юсупова, А. Ю. (2025). Выявление носителей мутантных аллелей крупного рогатого скота на территории Центрально-Черноземного региона России с помощью NGS-секвенирования. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 237-260. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1072

Original article

IDENTIFICATION OF THE CARRIERS OF THE MUTANT ALLELES IN THE CATTLE IN THE CENTRAL BLACK EARTH REGION OF RUSSIA USING NGS SEQUENCING

E.A. Snegin, A.S. Barkhatov, A.A. Sychev, E.A. Snegina, S.R. Yusupov, A.Yu. Yusupova

Abstract

Background. To carry out high-quality breeding work in the cattle populations, it is necessary to use next generation sequencing (NGS) methods, which allow large samples of the animals to be assessed for a significant number of the single nucleotide substitutions (SNPs) in a short period of time.

Materials and methods. Genotyping of the Holstein black-and-white cattle bred in the Central Black Earth region of Russia (Belgorod region) was carried out using NGS sequencing (multilocus panel TruSeq® Bovine Parentage Kit, Illumina USA).

Results. It was found that most of the animals studied are the inter-line hybrids. Correlation analysis of the "Reflection Sovereign", "Montvik Chieftain" and "Vis Back Ideal" lines showed no correlation dependency (r=0,165, p=0,106). Additionally, 10,4% of the cattle were carriers of the gene related to the Holstein red-and-white coat color. Furthermore, 61,5% of the cattle were carriers of the mutant allele G (_SNPchr8_108833985), which lowers immunity and contributes to the development of moraxellosis. Carriers of several unfavorable mutations were identified, such as Syndactyly (SY) – 8,3%, mutations leading to leukism (MITF gene) – 12,3%, and mutations in the melanocortin receptor gene (*MC1R*) – 10,4%. Carriers of the semi-lethal mutation (allele T) in the *APAF1* gene accounted for 3,0% of the cattle, carriers of the lethal mutation (allele C) in the *HH3* gene – 14,6%, carriers of the lethal mutation (allele *C*) in the *HHB* (BLAD) gene – 1,0%, carriers of the semi-lethal mutation (allele *A*) in the SLC35A3 gene – 2,0%. All this indicates errors in the breeding work. Against the backdrop of these unfavorable genetic factors, carriers of mutations with a positive effect on meat and milk productivity were observed, namely carriers of the *MSTN* gene mutation (allele *T*) – 50%, carriers of the *ABCG2* gene mutation (allele *C*) – 4.2%, carriers of the *DGAT1* gene mutation (allele *A*) – 28,1%, carrier of the *CSN1S1* gene mutation (allele *A*) – 1,0%.

Conclusion. We believe that adjusting the breeding work regarding these mutations, both with negative and positive effects, will allow farms to create core herds of high-productivity animals, which will contribute to increasing the quantity and quality of dairy products.

Keywords: cattle; SNP; NGS sequencing; genotyping; lethal alleles

For citation. Snegin, E. A., Barkhatov, A. S., Sychev, A. A., Snegina, E. A., Yusupov, S. R., & Yusupova, A. Y. (2025). Identification of the carriers of the mutant alleles in the cattle in the Central Black Earth region of Russia using NGS sequencing. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 237-260. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1072

Введение

В связи с разведением на территории России различных зарубежных пород крупного рогатого скота участились случаи завоза в страну спермы быков производителей, имеющих в генотипе мутантные аллели, снижаю-

щие производственные показатели животных. Кроме того, на указанную проблему накладываются ошибки самих хозяйств при ведении родословных в племенной работе. Одним из способов решения этих проблем является использование высокопроизводительного секвенирования (NGS) для генотипирования сельскохозяйственных животных, которое позволяет за короткий промежуток времени оценить большие выборки животных по значительному количеству однонуклеотидных замен (SNP) в хозяйственно значимых генах и осуществить эффективный отбор животных с потенциально высокими и низкими показателями.

Цель – исследовать поголовье крупного рогатого скота голштинской породы черно-пестрой масти, разводимого в хозяйствах центрально-черноземного региона России (Белгородская область) с помощью кастомизированной панели TruSeq® Bovine Parentage Kit (Illumina, США), созданной для высокопроизводительного секвенирования (NGS), позволяющей одновременно исследовать животных на 263 SNP.

Стоит отметить, что данные исследования были впервые проведены в популяции КРС, разводимых на территории Белгородской области.

Материал и методы

В анализе были задействована выборка из 96 особей крупного рогатого скота (племенные коровы), которые согласно племенным свидетельствам относились к голштинской породе черно-пестрой масти.

SNP-анализа был проведен с помощью кастомизированной панели TruSeq® Bovine Parentage Kit (Illumina, США). Выделение геномной ДНК осуществляли из цельной крови животного с помощью стандартного набора «ДНК-экстран 1» (Синтол, Россия), согласно протоколу производителя. Количественную оценку выделенных фрагментов ДНК проводили на флуориметре Qubit (Invitrogen). Концентрация ДНК каждого образца находилась в диапазоне 10-25 нг/мкл. Подготовку ДНК-библиотек проводили согласно инструкции производителя «TruSeq Bovine Parentage Reference Guide». Амплификацию целевых последовательностей ДНК проводили на термоциклере Veriti (Applied Biosystems, США). Оценку качества библиотеки осуществляли с помощью электрофореза в 4% агарозном геле. Во всех 96 образцах размер продукта ПЦР находился в диапазоне 200-300 п.о., что соответствовало требованиям производителя. Секвенирование подготовленных фрагментов ДНК проводили на ДНК-секвенаторе MiSeq (Illumina, США) (секвенатор NGS, Next Generation Sequencing). Биоинформационную обработку полученных результатов проводили с помощь

программы SEQUENCE GENOTYPER-v1-0, в результате которой получали информацию в формате Excel, где были представлены генотипы анализируемых животных.

Результаты и их обсуждение

Проверка происхождения изученного поголовья КРС

Экспертизу достоверности происхождения проводили по 200 SNP, рекомендованных ISAG, включенных в используемую панель. В качестве порогового значения при определении породной принадлежности был выбран 75 % уровень исключения (Q критерий). Для подтверждения индивидуального соответствия особи породе использовали программу Structure (v. 2.3.1) [41]. Ввиду наличия в анализируемой группе коров потомков трех линий, идущих от отцов «Reflection Sovereign», «Montvik Chieftain» и «Vis Back Ideal», анализ был выполнен с указанием наиболее вероятного числа популяций k=3. Результаты генотипирования 96 особей голштинской породы представлены на рисунке 1.

Согласно полученным данным, анализируемая популяция коров разделилась на три группы, причем часть особей оказались гибридами, которых нельзя было отнести к той или иной линии (№ 10, 12, 41, 48, 60, 61, 62, 70-76, 81, 82, 84, 90, 93, 94, 96).

Основная часть особей оказались в пределах, не выходящих за 75 % уровень исключения, т.е. являлись чистопородными. Вместе с тем, проведенный корреляционный анализ на соответствие линий, выделенных одним цветом, определенной линии предка, показал отсутствие корреляционной зависимости (коэффициент Пирсона r=0,165, p=0,106), что свидетельствует, либо о присутствии в популяции животных иных линий, либо об ошибках в документах при ведении племенного учета. Из представленных трех линий наибольший процент совпадений с одним цветом (зеленым) обнаруживается в линии предка Reflection Sovereign (85,3% совпадений, что составляет 36,0 % от всего исследованного поголовья). В этой же группе обнаруживается наибольшее количество особей с Q=100 %. Отнести оставшиеся два цвета (синий и красный) к какой-то определенной линии предка не представляется возможным.

Кроме того, стоит отметить, что в исследованном поголовье 89,6 % голов соответствует голштинской породе черно-пестрой масти, тогда как 10,4 % голов являются носителями гена, относящегося к голштинской породе красно-пестрой масти (MC1R_SNPchr18_14757910+MC1R_SNPchr18_ аллель *T*).

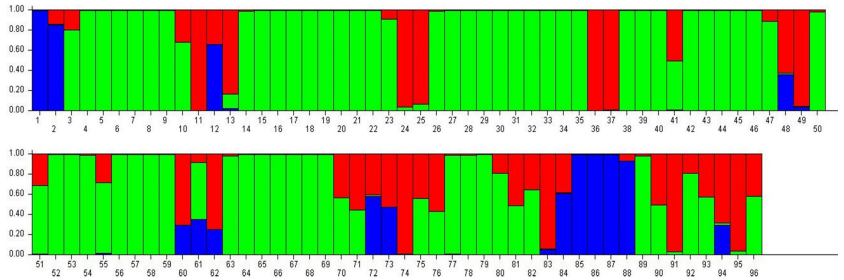


Рис. 1. Популяционная структура выборки из 96 коров голштинской породы, полученная в программе STRUCTURE по данным SNP-анализа 200 локусов. Принадлежность к той или иной субпопуляции отображается высотой цветных столбиков внутри колонки образца. Один столбик – одно животное.

В качестве примера можно привести корову с № 4, которая является гомозиготой по аллелю красной окраски *TT*, имеющей красно-пестрый фенотип, хотя по документам относится к черно-пестрому варианту.

Исследование генетического полиморфизма маркерных генов хозяйственно ценных признаков

Согласно полученным данным мутантные варианты по большинству исследуемых генов, как с отрицательными, так и с положительными эффектами, отсутствуют. Вместе с тем, обращает внимание присутствие значительного генетического груза по отдельным локусам (табл. 1). Так, в частности 61,5% голов являются носителями мутантного аллеля *G* (_SNPchr8_108833985, «PinkEye», инфекционный кератит, пастбищная слепота крупного рогатого скота), из них 19 особей оказались гомозиготами по данной мутации (*GG*). Известно, что указанный мутантный аллель снижает иммунитет и способствует развитию моракселлеза, что сказывается на производственных показателях животных. Согласно данным, приведенным в мировой литературе, частота мутантного аллеля *G* в этом локусе довольно высока во многих группах животных из разных регионов. Например, в Индии его частота варьирует от 0,34 до 0,7 [23, 43]. В Бразилии среди поголовья голштиского скота частота аллеля *G*=0,46 [12], в Испании – 0,44 [26], в Китае – 0,45 [25]. Все это свидетельствует об отсутствии целенаправленной селекционной работы в этом направлении не только в России, но и в других странах.

В белгородской группе выявлены носители ряда неблагоприятных мутаций, таких как Синдактилия (Mulefoot, *MFD*; *SY*; *HHM*), вызывающая срастание копыт. Частота мутантного аллеля *A* составила 0,042 (носителя-

ми явились 8,3 % голов скота), что сопоставимо с популяциями в других странах. Например, в Уругвае – 0,02 [34], в Корее – 0,04 [20]. Есть мнение, что в некоторых случаях может проводиться направленный искусственный отбор в пользу гетерозигот по этому локусу, т.к. носители мутантного аллеля могут отличаться повышенной молочной продуктивностью [16].

Таблица 1.

Частоты генотипов и аллелей крупного рогатого скота белгородской популяции с отрицательным эффектом

№	Мутация	Обозначение в панели TruSeq Bovine	Частота аллеля	Частота генотипов	
1	«PinkEye»	SNPchr8_108833985	*A* – 0,594 *G* – 0,406	*AA*	0,386
				*A**G***	0,416
				GG	0,198
2	Синдактилия (Mulefoot)	LRP4_SNPchr15_77675440+LRP4_ SNPchr15_.	*G* – 0,958 *A* – 0,042	*GG*	0,917
				GA	0,083
				AA	0,000
3	*MITF*	MITF_SNPchr22_31769189	*T* – 0,937 *A* – 0,063	*TT*	0,875
				TA	0,125
				AA	0,000
4	*MC1R*	MC1R_SNPchr18_14757910+MC1R_ SNPchr18_	*C* – 0,943 *T* – 0,057	*CC*	0,896
				CT	0,094
				TT	0,010
5	*APAF1*	APAF1_SNPchr5_63150400	*C* – 0,984 *T* – 0,016	*CC*	0,969
				CT	0,031
				TT	0,000
6	*HH3*	SMC2_SNPchr8_95410507	*T* – 0,927 *C* – 0,073	*TT*	0,854
				TC	0,146
				CC	0,000
7	*BLAD*	ITGB2_SNPchr1_145114963	*T* – 0,995 *C* – 0,005	*TT*	0,990
				TC	0,010
				CC	0,000
8	*CVM*	SLC35A3_SNPchr3_43412427	*G* – 0,990 *T* – 0,010	*GG*	0,979
				GT	0,021
				TT	0,000

Также в белгородской популяции КРС отмечены носители мутантных аллелей в локусах, ответственных за окрасочные признаки животных. Так, у 6,3 % голов отмечены мутации, приводящие к лейкизму (ген *MITF*, аллель *A*), т.е. к частичной потере пигментации наружного покрова у животных. Такая низкая частота этого аллеля вероятно является поло-

жительным моментом для белгородской популяции, т.к. в других регионах мира его частота существенно выше. Например, самая высокая частота аллеля *A*, определяющего белый фенотип, была отмечена в породе герефорд (до 0,92). В других породах частота аллеля *A* варьируется от низкой (якутская порода), до умеренной (бурятская) [14]. В Италии в популяции голштинского скота частота аллеля *A* составила 0,790, в симментальской породе – 0,926, в итальянской бурой породе – 0,271 [21].

По гену мелакортинового рецептора (*MC1R*), также влияющего на окрас шерсти, 10% изученных животных является гомозиготами по мутантному аллелю *T* и еще 9,4 % голов оказались его носителями. В мире наиболее часто мутантный аллель *T* встречается в азиатских породах. Например, в Японии его частота составила 0,940 [36], во Вьетнаме – 1,0, в Китае и Бангладеш – 0,998 [40].

Кроме того, в ходе исследования были выявлены особи, несущие аллели с летальным и полулетальным эффектом, которые подлежат обязательной элиминации (выбраковке) в племенных хозяйствах.

Носители полулетальной мутации (аллель *T*) в гене *APAF1*, который в гомозиготном состоянии увеличивает вероятность аборта плода, в белгородской популяции составили 3.1%. Известно, что аллель *T* в гене *APAF1* отмечается в различных регионах мира, но везде его частота невысока. Например, в Белоруссии этот показатель оказался равным 0,014 [1], в Индии – 0,016 [17], во Франции – 0,013 [18], в Китае – 0,05 [44]. В других регионах России частота аллеля Т варьировала от 0,005 [24] до 0,023 [4]. Самое высокое значение отмечено в популяции голштинской породы Польши – 0,24 [31]. Таким образом, белгородская популяция оказалась в группе благополучных регионов по этой мутации.

У 14,6% голов в локусе *HH3* (голштинский гаплотип 3) был выявлен летальный аллеля *C* (частота 0,073), который вызывает эмбриональную смертность до 60-х суток стельности. Полученный показатель почти вдвое и более превосходит аналогичные данные, полученные по популяциям из других стран и регионов РФ, где частота указанного аллеля не превышает 0,044. Например, в Индии частота аллеля *C* составила 0,015 [17], в Швейцарии и во Франции – 0,012 [18; 22], в Уругвае – 0,02 [35], в США – 0,014 [13], в Китае – 0,013 [44], в других регионах России – от 0,014 до 0,044 [24; 29].

Также в белгородской группе был выявлен единственный носитель летальной мутации (аллеля *C*) гена *HHB* (*BLAD*), вызывающей недостаточную адгезию лейкоцитов 1 типа. Такая низкая частота мутантного, безусловно, является положительным моментом для белгородской группы.

Известно, в Германии в 2000 году носительство было 24%, а к 2007 году снизилось до 1,6%, в Чехии в 90-х годах частота носителей у голштинов достигала 13%, а к 2016 г стала менее 1%. В Турции в частота аллеля *C* у голштинов была 0,008 [10], в Белоруссии – 0,016 [2], в Казахстане – 0,005 [6], в Китае – 0,007 [9], в Уругвае – 0,01 [34]. Все это свидетельствует о направленной селекции против этого генетического заболевания, как в мире, так и белгородском регионе.

У двух животных из Белгородской области была зафиксирована полулетальная мутация (аллель *T*) гена *SLC35A3*, вызывающего синдром сложной деформации позвоночника (*CVM*). В других регионах, например, в Японии в популяции голштинской породы частота аллеля *T* составила – 0,065 [15], в Словении – 0,05 [35], в Китае – 0,047 [9], в Уругвае – 0,01 [35], в Казахстане – 0,009 [6], в Турции – 0,017 [37]. Столь низкая частота этого аллеля свидетельствует о планомерной работе в сторону снижения частоты проявления данного недуга.

На фоне указанных неблагоприятных генетических факторов в исследуемой популяции присутствовали носители мутаций с положительным эффектом, влияющих на мясную и молочную продуктивность (табл.2).

Носители мутации гена *MSTN* (аллель *T*), фактора дифференцировки роста 8, ответственного за достоверное ($p<0,5$) увеличение мускулатуры у крупного рогатого скота, составили 50% голов. По частоте встречаемости указанного аллеля белгородская популяция близка к показателю в других российских группах, где его частота в среднем составила 0,310 [7]. Вместе с тем в ряде европейских стран частота аллеля *T* не превышала 0,04 [11], а во Франции у породы шароле оказалась равной 0,065, у породы лимузин – 0,003 [46].

Носители мутации в гене *ABCG2* (аллель *C*), увеличивающей жирность молока в 3 раза – 4,2 % голов. В некоторых регионах мира, также как и в белгородской популяции голштинского скота, частота аллеля *C* в гене *ABCG2* оказалась невысокой. Например, в Польше она составила 0,01 [30], в Турции – 0,019 [47], в Иране и Австралии – 0,03 [8; 39]. Тем не менее в ряде государств, вероятно ведется планомерная работа по увеличению доли носителей этого положительного аллеля. Например, в Израиле у голштинов его частота оказалась равной 0,2 [42], в США – 0,195 [27], что сопоставимо с показателями в популяции джерсейской породы в Польше [32]. Полагаем российским племенным хозяйствам нужно также проводить работу в сторону увеличения доли аллеля *C* для повышения жирности получаемого молока.

Таблица 2.

Частоты генотипов и аллелей крупного рогатого скота белгородской популяции с положительным эффектом

№	Мутация	Обозначение в панели TruSeq Bovine	Частота аллелей	Частота генотипов	
1	*MSTN*	MSTN_SNPchr2_6215942	*C* – 0,698 *T* – 0,302	*CC*	0,489
				CT	0,417
				TT	0,094
2	*ABCG2*	ABCG2_SNPchr6_38027010	*A* – 0,979 C – 0,021	*AA*	0,958
				AC	0,042
				CC	0,000
3	*DGAT1*	DGAT1_SNPchr14_1802265	*G* – 0,844 *A* – 0,156	*GG*	0,719
				GA	0,250
				AA	0,031
4	*CSN1S1*	CSN1S1_SNPchr6_87157909	*G* – 0,995 *A* – 0,005	*GG*	0,990
				GA	0,010
				AA	0,0

Носители мутации в гене *DGAT1* (аллель *A*), которая достоверно ($p<0,05$) ассоциирована с увеличение жирности молока – 28,1 % голов. Данная частота аллеля явно уступает аналогичным показателям, отмеченным в других странах. Например, в Чехии для голштинской и симментальской породы его частота составила 0,96, в Румынии – 0,956 [28], в Китае – 0,830 [19], в Чили – 0,660 [38], других регионах России – от 0,6 до 0,74 [3; 5].

Носитель мутации в гене *CSN1S1* (аллель *A*), показывающей более высокие характеристики содержания в молоке белка αS1-казеина– 1 % голов. Уровень носительства положительного аллеля *A* в гене *CSN1S1* в белгородской группе аналогичен таковому в других группах. Например, в Италии среди голштинского скота его частота равна 0,003 [47], а в Польше – 0,006 [33]. Вероятнее всего, для голштинской породы такая частота аллеля *A* является обычным показателем.

Заключение

Использование технологии NGS позволило выявить определенные недочеты в селекционной работе племенных хозяйств Белгородской области, занимающихся разведением голштинского скота. Полагаем, что корректировка селекционной работы в отношение указанных мутаций, как с отрицательным, так и с положительным эффектом, позволит хозяйствам создавать племенные ядра высокопродуктивных животных, что будет способствовать повышение количества и качества молочной продукции.

Список литературы

1. Романишко, Е. Л., Михайлова, М. Е., Киреева, А. И., & Шейко, Р. И. (2021). Выявление гаплотипов фертильности в белорусской популяции крупного рогатого скота голштинской породы. *Молекулярная и прикладная генетика*, *31*, 7-21. https://doi.org/10.47612/1999-9127-2021-31-7-21 EDN: https://elibrary.ru/SOVXXS
2. Епишко, О. А., Пестис, В. К., Танана, Л. А., Кузьмина, Т. И., Чебуранова, Е. С., Шевченко, М. Ю., Петрова, А. П., Глинская, Н. А., & Трахимчик, Р. В. (2017). Определение рецессивных мутаций BLAD, CVM и BS в популяции крупного рогатого скота молочного направления Республики Беларусь. *Сборник научных трудов. Сельское хозяйство — проблемы и перспективы. Зоотехния*, *37*, 44-51. EDN: https://elibrary.ru/YOZAWL
3. Загидуллин, Л. Р., Шайдуллин, Р. Р., Ахметов, Т. М., & Тюлькин, С. В. (2020). Полиморфизм генов каппа-казеина и диацилглицерол О-ацилтрансферазы у черно-пестрого скота. *Молочнохозяйственный вестник*, *37*(1), 24-34. EDN: https://elibrary.ru/TUJEVN
4. Романенкова, О. В., Гладырь, Е. А., Костюнина, О. В., & Зиновьева, Н. А. (2016). Скрининг российской популяции крупного рогатого скота на наличие мутации в APAF1, ассоциированной с гаплотипом фертильности HH1. *Достижения науки и техники АПК*, *30*(2), 94-97. EDN: https://elibrary.ru/VPIDTX
5. Тюлькин, С. В. (2019). *Молекулярно-генетическое тестирование крупного рогатого скота по генам белков молока, гормонов, фермента и наследственных заболеваний*. Автореф. дис. д-ра биол. наук. Казань. 46 с. EDN: https://elibrary.ru/BBNXRA
6. Усенбеков, Е. С., Яковлев, А. Ф., & Акимжан, Н. А. (2016). Результаты мониторинга быков-производителей на носительство генетических дефектов. *Вестник КазНУ. Серия биологическая*, *67*(2), 129-139.
7. Шуклин, С. Ю. (2022). *Использование STR-маркеров и SNP чипов при формировании высокопродуктивного поголовья молочного скота*. Автореф. дис. канд. биол. наук. Лесные Поляны, Московская область. 22 с. EDN: https://elibrary.ru/ZNOYQF
8. Turner, L. B., Harrison, B. E., Bunch, R. J., Porto Neto, L. R., Li, Y., & Barendse, W. (2010). A genome-wide association study of tick burden and milk composition in cattle. *Animal Production Science*, *50*(4), 235-245. https://doi.org/10.1071/AN09135
9. Zhang, Y., Fan, X., Sun, D., Wang, Y., Yu, Y., Xie, Y., Zhang, S., & Zhang, Y. (2012). A novel method for rapid and reliable detection of complex vertebral

malformation and bovine leukocyte adhesion deficiency in Holstein cattle. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *3*(1), 24. https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-24

10. Akyüz, B., & Ertuğrul, O. (2006). Detection of bovine leukocyte adhesion deficiency (BLAD) in Turkish native and Holstein cattle. *Acta Veterinaria Hungarica*, *54*(2), 173-178. https://doi.org/10.1556/AVet.54.2006
11. Sifuentes-Rincón, A. M., Puentes-Montiel, H. E., Moreno-Medina, V. R., & Rosa-Reyna, X. F. (2006). Assessment of the myostatin Q204X allele using an allelic discrimination assay. *Genetics and Molecular Biology*, *29*(3), 496-497. https://doi.org/10.1590/S1415-47572006000300017
12. Mesquita, A. Q., Rezende, C. S. M., Mesquita, A. J., Jardim, E. A. G. V., & Kipnis, A. P. J. (2012). Association of TLR4 polymorphisms with subclinical mastitis in Brazilian Holsteins. *Brazilian Journal of Microbiology*, *43*(2), 692-697. https://doi.org/10.1590/S1517-83822012000200034
13. Cole, J. B., Null, D. J., & Van Raden, P. M. (2016). Phenotypic and genetic effects of recessive haplotypes on yield, longevity, and fertility. *Journal of Dairy Science*, *99*(9), 7274-7288. https://doi.org/10.3168/jds.2015-10777
14. Igoshin, A. V., Romashov, G. A., Chernyaeva, E. N., Elatkin, N. P., Yudin, N. S., & Larkin, D. M. (2022). Comparative analysis of allele frequencies for DNA polymorphisms associated with disease and economically important traits in the genomes of Russian and foreign cattle breeds. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, *26*(3), 298-307. https://doi.org/10.18699/VJGB-22-28 EDN: https://elibrary.ru/WLUUNI
15. Ghanem, M. E., Akita, M., Suzuki, T., Kasuga, A., & Nishiboi, M. (2008). Complex vertebral malformation in Holstein cows in Japan and its inheritance to crossbred F1 generation. *Animal Reproduction Science*, *103*(3-4), 348-354. https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.05.006
16. Johnson, E. B., Steffen, D. J., Lynch, K. W., & Herz, J. (2006). Defective splicing of Megf7/Lrp4, a regulator of distal limb development, in autosomal recessive mulefoot disease. *Genomics*, *88*, 600-609. https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2006.08.005
17. Kumar, A., Gupta, I. D., Mohan, G., Vineeth, M. R., Kumar, D. R., Jayakumar, S., & Niranjan, S. K. (2020). Development of PCR based assays for detection of lethal Holstein haplotype 1, 3 and 4 in Holstein Friesian cattle. *Molecular and Cellular Probes*, *50*, 101503. https://doi.org/10.1016/j.mcp.2019.101503 EDN: https://elibrary.ru/FNVMGE
18. Fritz, S., Capitan, A., Djari, A., Rodriguez, S. C., Barbat, A., Baur, A., Grohs, C., Weiss, B., Boussaha, M., Esquerre, D., Klopp, C., Rocha, D., & Boichard, D.

(2013). Detection of Haplotypes Associated with Prenatal Death in Dairy Cattle and Identification of Deleterious Mutations in GART, SHBG and SLC37A2. *PLoS ONE*, *8*(6), e65550. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065550 EDN: https://elibrary.ru/RJOLRV

19. Li, F., Cai, C., Qu, K., Liu, J., Jia, Y., Hanif, Q., Chen, N., Zhang, J., Chen, H., Huang, B., & Lei, C. (2021). DGAT1 K232A polymorphism is associated with milk production traits in Chinese cattle. *Animal Biotechnology*, *32*(4), 427-431. https://doi.org/10.1080/10495398.2020.1711769 EDN: https://elibrary.ru/MPQIGT
20. Arora, D., Srikanth, K., Lim, D., Park, J., Choi, S., Lee, S. H., Shin, D. H., & Park, W. (2021). Exploration of OMIA Registered Recessive Mutations in Hanwoo Cattle. *Journal of Agriculture & Life Science*, *55*(2), 137-143. https://doi.org/10.14397/jals.2021.55.2.137 EDN: https://elibrary.ru/PPVEAS
21. Fontanesi, L., Scotti, E., & Russo, V. (2012). Haplotype variability in the bovine MITF gene and association with piebaldism in Holstein and Simmental cattle breeds. *Animal Genetics*, *43*(3), 250-256. https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2011.02242.x
22. Häfliger, I. M., Spengeler, M., Seefried, F. R., & Drögemüller, C. (2022). Four novel candidate causal variants for deficient homozygous haplotypes in Holstein cattle. *Scientific Reports*, *12*(1), 5435. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09403-6 EDN: https://elibrary.ru/SGDZQS
23. Kumar, S., Kumar, S., Singh, R. V., Chauhan, A., Kumar, A., Sulabh, S., Bharati, J., & Singh, S. V. (2019). Genetic association of polymorphisms in bovine TLR2 and TLR4 genes with Mycobacterium avium subspecies paratuberculosis infection in Indian cattle population. *Veterinary Research Communications*, *43*, 105-114. https://doi.org/10.1007/s11259-019-09750-2 EDN: https://elibrary.ru/OBMXRA
24. Sermyagin, A. A., Conte, A. F., Volkova, V. V., Romanenkova, O. S., Kharzhau, A. A., Reyer, H., Wimmers, K., Brem, G., & Zinovieva, N. A. (2018). Genetic highlights for reproduction and health traits in Russian black-and-white and Holstein animals selected for production of high-quality embryos. *Reproduction, Fertility and Development*, *30*(1), 199. https://doi.org/10.1071/RDv30n1Ab119 EDN: https://elibrary.ru/XVWBID
25. Wang, X., Xu, S., Gao, X., Ren, H., & Chen, J. (2007). Genetic polymorphism of TLR4 gene and correlation with mastitis in cattle. *Journal of Genetics and Genomics*, *34*(5), 406-412. https://doi.org/10.1016/S1673-8527(07)60044-7
26. Ruiz-Larranaga, O., Manzano, C., Iriondo, M., Garrido, J. M., Molina, E., Vazquez, P., Juste, R. A., & Estonba, A. (2011). Genetic variation of toll-like

receptor genes and infection by Mycobacterium avium ssp. paratuberculosis in Holstein-Friesian cattle. *Journal of Dairy Science*, *94*(7), 3635-3641. https://doi.org/10.3168/jds.2010-3788

27. Cohen-Zinder, M., Seroussi, E., Larkin, D. M., Loor, J. J., Wind, A. E., Lee, J.-H., Drackley, J. K., Band, M. R., Hernandez, A. G., Shani, M., Lewin, H. A., Weller, J. I., & Ron, M. (2006). Identification of a missense mutation in the bovine ABCG2 gene with a major effect on the QTL on chromosome 6 affecting milk yield and composition in Holstein cattle. *Genome Research*, *15*, 936-944. https://doi.org/10.1101/gr.3806705
28. Tăbăran, A., Balteanu, V. A., Gal, E., Pusta, D., Mihaiu, R., Dan, S. D., Tăbăran, A. F., & Mihaiu, M. (2015). Influence of DGAT1 K232A Polymorphism on Milk Fat Percentage and Fatty Acid Profiles in Romanian Holstein Cattle. *Animal Biotechnology*, *26*(2), 105-111. https://doi.org/10.1080/10495398.2014.933740
29. Khatib, A., Mazur, A. M., & Prokhortchouk, E. (2020). The distribution of lethal Holstein haplotypes affecting female fertility among the Russian Black-and-White cattle. *EurAsian Journal of Biosciences*, *14*(2), 2545-2552. EDN: https://elibrary.ru/WVDVMW
30. Komisarek, J., & Dorynek, Z. (2009). Effect of ABCG2, PPARGC1A, OLR1 and SCD1 gene polymorphism on estimated breeding values for functional and production traits in Polish Holstein-Friesian bulls. *Journal of Applied Genetics*, *50*(2), 125-132. https://doi.org/10.1007/BF03195663 EDN: https://elibrary.ru/BLUBGD
31. Kaminski, S. (2020). Novel method for identification of the lethal mutation in bovine APAF1 gene and its preliminary prevalence in Polish Holstein-Friesian bulls. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, *23*(1), 157-160. https://doi.org/10.24425/pjvs.2020.132760 EDN: https://elibrary.ru/SEPOII
32. Kowalewska-Łuczak, I., & Kulig, H. (2013). Polymorphism of the FAM13A, ABCG2, OPN, LAP3, HCAP-G, PPARGC1A genes and somatic cell count of Jersey cows - Preliminary study. *Research in Veterinary Science*, *94*(2), 252-255. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2012.08.006 EDN: https://elibrary.ru/RMJNIZ
33. Kolenda, M., & Sitkowska, B. (2021). The Polymorphism in Various Milk Protein Genes in Polish Holstein-Friesian Dairy Cattle. *Animals*, *11*(2), 389. https://doi.org/10.3390/ani11020389 EDN: https://elibrary.ru/TABYKS
34. Briano-Rodriguez, C., Romero, A., Llambí, S., Sica, A. B., Rodriguez, M. T. F., Giannitti, F., Rubén Dario Caffarena, R. D., Schild, C. O., Casaux, M. L., & Quintela, F. D. (2021). Lethal and semi-lethal mutations in Holstein calves in Uruguay. *Ciência Rural*, *51*(7). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200734 EDN: https://elibrary.ru/UFIVOF

35. Logar, B., Kavar, T., & Meglič, V. (2008). Detection of recessive mutations (CVM, BLAD and RED factor) in holstein bulls in Slovenia. *Journal of Central European Agriculture*, *9*(1), 101-106.
36. Matsumoto, H., Kojya, M., Takamuku, H., Kimura, S., Kashimura, A., Imai, S., Yamauchi, K., & Ito, S. (2020). MC1R c.310G>- and c.871G > A determine the coat color of Kumamoto sub-breed of Japanese Brown cattle. *Animal Science Journal*, *91*(1), 13367. https://doi.org/10.1111/asj.13367 EDN: https://elibrary.ru/NKCTQT
37. Meydan, H., Yildiz, M. A., & Agerholm, J. S. (2010). Screening for bovine leukocyte adhesion deficiency, deficiency of uridine monophosphate synthase, complex vertebral malformation, bovine citrullinaemia, and factor XI deficiency in Holstein cows reared in Turkey. *Acta Veterinaria Scandinavica*, *52*(1), 56. https://doi.org/10.1186/1751-0147-52-56 EDN: https://elibrary.ru/OMEZZT
38. Morales, R., & Ungerfeld, E. M. (2016). Milk fatty acid profile is modulated by DGAT1 and SCD1 genotypes in dairy cattle on pasture and strategic supplementation. *Genetics and Molecular Research*, *15*(2), 15027057. https://doi.org/10.4238/gmr.15027057
39. Nanaei, H. A., Mahyari, S. A., & Edriss, M.-A. (2014). Effect of LEPR, ABCG2 and SCD1 Gene Polymorphisms on Reproductive Traits in the Iranian Holstein Cattle. *Reproduction in Domestic Animals*, *49*(5), 769-774. https://doi.org/10.1111/rda.12365
40. Zhang, Y., Li, Q., Ye, S., Faruque, M. O., Yu, Y., Sun, D., Zhang, S., & Wang, Y. (2014). New variants in the melanocortin 1 receptor gene (MC1R) in Asian cattle. *Animal Genetics*, *45*(4), 609-610. https://doi.org/10.1111/age.12160
41. Pritchard, J. K., Wen, X., & Falush, D. (2010). *Documentation for structure software: Version 2.3*. Retrieved from http://pritch.bsd.unicado.edu/structure.html
42. Ron, M., Cohen-Zinder, M., Peter, C., Weller, J. I., & Erhardt, G. (2006). Short Communication: A Polymorphism in ABCG2 in Bos indicus and Bos taurus Cattle Breeds. *Journal of Dairy Science*, *89*, 4921-4923. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72542-5
43. Gopi, B., Singh, R. V., Kumar, S. a., Kumar, S. u., Chauhan, A., Kumar, A., & Singh, S. V. (2020). Single-nucleotide polymorphisms in CLEC7A, CD209 and TLR4 gene and their association with susceptibility to paratuberculosis in Indian cattle. *Journal of Genetics*, *99*, 14. https://doi.org/10.1007/s12041-019-1172-4 EDN: https://elibrary.ru/GPALQP
44. Zhang, Y., Liang, D., Huang, H., Yang, Z., Wang, Y., Yu, Y., Liu, L., Zhang, S., Han, J., & Xiao, W. (2020). Technical note: Development and application of

KASP assays for rapid screening of 8 genetic defects in Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*, *103*(1), 619-624. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16345 EDN: https://elibrary.ru/CKCEKF

45. Chessa, S., Gattolin, S., Cremonesi, P., Soglia, D., Finocchiaro, R., Van Kaam, J. T., Marusi, M., & Civati, G. (2020). The effect of selection on casein genetic polymorphisms and haplotypes in Italian Holstein cattle. *Italian Journal of Animal Science*, *19*(1), 833-839. https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1802356 EDN: https://elibrary.ru/MQDAIV
46. Allais, S., Levéziel, H. H., Payet-Duprat, N., Hocquette, J. F., Lepetit, J., Rousset, S., Denoyelle, C., Bernard-Capel, C., Journaux, L., Bonnot, A., & Renand, G. (2010). The two mutations, Q204X and nt821, of the myostatin gene affect carcass and meat quality in young heterozygous bulls of French beef breeds. *Journal of Animal Science*, *88*(2), 446-454. https://doi.org/10.2527/jas.2009-2385
47. Yildirim, M., & Sahin, E. (2010). ABCG2 Gene polymorphism in Holstein cows of Turkey. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, *16*(3), 473-476. https://doi.org/10.9775/kvfd.2009.1047

References

1. Romanishko, E. L., Mikhailova, M. E., Kireeva, A. I., & Sheiko, R. I. (2021). Identification of fertility haplotypes in the Belarusian population of Holstein cattle. *Molecular and Applied Genetics*, *31*, 7-21. https://doi.org/10.47612/1999-9127-2021-31-7-21 EDN: https://elibrary.ru/SOVXXS
2. Epishko, O. A., Pestis, V. K., Tanana, L. A., Kuzmina, T. I., Cheburanova, E. S., Shevchenko, M. Yu., Petrova, A. P., Glinkskaya, N. A., & Trakhimchik, R. V. (2017). Detection of BLAD, CVM and BS recessive mutations in the population of dairy cattle of the Republic of Belarus. *Collection of Scientific Papers. Agriculture — Problems and Prospects. Animal Husbandry*, *37*, 44-51. EDN: https://elibrary.ru/YOZAWL
3. Zagidullin, L. R., Shaydullin, R. R., Akhmetov, T. M., & Tyulkyn, S. V. (2020). Polymorphism of kappa-casein and diacylglycerol O-acyltransferase genes in black-and-white cattle. *Dairy Industry Herald*, *37(1)*, 24-34. EDN: https://elibrary.ru/TUJEVN
4. Romanenkova, O. V., Gladyr, E. A., Kostyunina, O. V., & Zinovieva, N. A. (2016). Screening of the Russian population of cattle for the presence of a mutation in APAF1 associated with the fertility haplotype HH1. *Achievements of Science and Technology of Agroindustrial Complex*, *30(2)*, 94-97. EDN: https://elibrary.ru/VPIDTX

5. Tyulkyn, S. V. (2019). Molecular genetic testing of cattle for milk protein genes, hormones, enzymes and hereditary diseases (Doctoral dissertation). Kazan. 46 p. EDN: https://elibrary.ru/BBNXRA
6. Usenbekov, E. S., Yakovlev, A. F., & Akimzhan, N. A. (2016). Results of monitoring bulls for genetic defects. *Bulletin of KazNU. Biological Series*, *67(2)*, 129-139.
7. Shuklin, S. Yu. (2022). Use of STR markers and SNP chips in the formation of a highly productive herd of dairy cattle (Master's thesis). Lesnaya Polyana, Moscow region. 22 p. EDN: https://elibrary.ru/ZNOYQF
8. Turner, L. B., Harrison, B. E., Bunch, R. J., Porto Neto, L. R., Li, Y., & Barendse, W. (2010). A genome-wide association study of tick burden and milk composition in cattle. *Animal Production Science*, *50*(4), 235-245. https://doi.org/10.1071/AN09135
9. Zhang, Y., Fan, X., Sun, D., Wang, Y., Yu, Y., Xie, Y., Zhang, S., & Zhang, Y. (2012). A novel method for rapid and reliable detection of complex vertebral malformation and bovine leukocyte adhesion deficiency in Holstein cattle. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *3*(1), 24. https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-24
10. Akyüz, B., & Ertuğrul, O. (2006). Detection of bovine leukocyte adhesion deficiency (BLAD) in Turkish native and Holstein cattle. *Acta Veterinaria Hungarica*, *54*(2), 173-178. https://doi.org/10.1556/AVet.54.2006
11. Sifuentes-Rincón, A. M., Puentes-Montiel, H. E., Moreno-Medina, V. R., & Rosa-Reyna, X. F. (2006). Assessment of the myostatin Q204X allele using an allelic discrimination assay. *Genetics and Molecular Biology*, *29*(3), 496-497. https://doi.org/10.1590/S1415-47572006000300017
12. Mesquita, A. Q., Rezende, C. S. M., Mesquita, A. J., Jardim, E. A. G. V., & Kipnis, A. P. J. (2012). Association of TLR4 polymorphisms with subclinical mastitis in Brazilian Holsteins. *Brazilian Journal of Microbiology*, *43*(2), 692-697. https://doi.org/10.1590/S1517-83822012000200034
13. Cole, J. B., Null, D. J., & Van Raden, P. M. (2016). Phenotypic and genetic effects of recessive haplotypes on yield, longevity, and fertility. *Journal of Dairy Science*, *99*(9), 7274-7288. https://doi.org/10.3168/jds.2015-10777
14. Igoshin, A. V., Romashov, G. A., Chernyaeva, E. N., Elatkin, N. P., Yudin, N. S., & Larkin, D. M. (2022). Comparative analysis of allele frequencies for DNA polymorphisms associated with disease and economically important traits in the genomes of Russian and foreign cattle breeds. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, *26*(3), 298-307. https://doi.org/10.18699/VJGB-22-28 EDN: https://elibrary.ru/WLUUNI

15. Ghanem, M. E., Akita, M., Suzuki, T., Kasuga, A., & Nishiboi, M. (2008). Complex vertebral malformation in Holstein cows in Japan and its inheritance to crossbred F1 generation. *Animal Reproduction Science*, *103*(3-4), 348-354. https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.05.006
16. Johnson, E. B., Steffen, D. J., Lynch, K. W., & Herz, J. (2006). Defective splicing of Megf7/Lrp4, a regulator of distal limb development, in autosomal recessive mulefoot disease. *Genomics*, *88*, 600-609. https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2006.08.005
17. Kumar, A., Gupta, I. D., Mohan, G., Vineeth, M. R., Kumar, D. R., Jayakumar, S., & Niranjan, S. K. (2020). Development of PCR based assays for detection of lethal Holstein haplotype 1, 3 and 4 in Holstein Friesian cattle. *Molecular and Cellular Probes*, *50*, 101503. https://doi.org/10.1016/j.mcp.2019.101503 EDN: https://elibrary.ru/FNVMGE
18. Fritz, S., Capitan, A., Djari, A., Rodriguez, S. C., Barbat, A., Baur, A., Grohs, C., Weiss, B., Boussaha, M., Esquerre, D., Klopp, C., Rocha, D., & Boichard, D. (2013). Detection of Haplotypes Associated with Prenatal Death in Dairy Cattle and Identification of Deleterious Mutations in GART, SHBG and SLC37A2. *PLoS ONE*, *8*(6), e65550. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065550 EDN: https://elibrary.ru/RJOLRV
19. Li, F., Cai, C., Qu, K., Liu, J., Jia, Y., Hanif, Q., Chen, N., Zhang, J., Chen, H., Huang, B., & Lei, C. (2021). DGAT1 K232A polymorphism is associated with milk production traits in Chinese cattle. *Animal Biotechnology*, *32*(4), 427-431. https://doi.org/10.1080/10495398.2020.1711769 EDN: https://elibrary.ru/MPQIGT
20. Arora, D., Srikanth, K., Lim, D., Park, J., Choi, S., Lee, S. H., Shin, D. H., & Park, W. (2021). Exploration of OMIA Registered Recessive Mutations in Hanwoo Cattle. *Journal of Agriculture & Life Science*, *55*(2), 137-143. https://doi.org/10.14397/jals.2021.55.2.137 EDN: https://elibrary.ru/PPVEAS
21. Fontanesi, L., Scotti, E., & Russo, V. (2012). Haplotype variability in the bovine MITF gene and association with piebaldism in Holstein and Simmental cattle breeds. *Animal Genetics*, *43*(3), 250-256. https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2011.02242.x
22. Häfliger, I. M., Spengeler, M., Seefried, F. R., & Drögemüller, C. (2022). Four novel candidate causal variants for deficient homozygous haplotypes in Holstein cattle. *Scientific Reports*, *12*(1), 5435. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09403-6 EDN: https://elibrary.ru/SGDZQS
23. Kumar, S., Kumar, S., Singh, R. V., Chauhan, A., Kumar, A., Sulabh, S., Bharati, J., & Singh, S. V. (2019). Genetic association of polymorphisms in bovine TLR2

and TLR4 genes with Mycobacterium avium subspecies paratuberculosis infection in Indian cattle population. *Veterinary Research Communications*, *43*, 105-114. https://doi.org/10.1007/s11259-019-09750-2 EDN: https://elibrary.ru/OBMXRA

24. Sermyagin, A. A., Conte, A. F., Volkova, V. V., Romanenkova, O. S., Kharzhau, A. A., Reyer, H., Wimmers, K., Brem, G., & Zinovieva, N. A. (2018). Genetic highlights for reproduction and health traits in Russian black-and-white and Holstein animals selected for production of high-quality embryos. *Reproduction, Fertility and Development*, *30*(1), 199. https://doi.org/10.1071/RDv30n1Ab119 EDN: https://elibrary.ru/XVWBID
25. Wang, X., Xu, S., Gao, X., Ren, H., & Chen, J. (2007). Genetic polymorphism of TLR4 gene and correlation with mastitis in cattle. *Journal of Genetics and Genomics*, *34*(5), 406-412. https://doi.org/10.1016/S1673-8527(07)60044-7
26. Ruiz-Larranaga, O., Manzano, C., Iriondo, M., Garrido, J. M., Molina, E., Vazquez, P., Juste, R. A., & Estonba, A. (2011). Genetic variation of toll-like receptor genes and infection by Mycobacterium avium ssp. paratuberculosis in Holstein-Friesian cattle. *Journal of Dairy Science*, *94*(7), 3635-3641. https://doi.org/10.3168/jds.2010-3788
27. Cohen-Zinder, M., Seroussi, E., Larkin, D. M., Loor, J. J., Wind, A. E., Lee, J.-H., Drackley, J. K., Band, M. R., Hernandez, A. G., Shani, M., Lewin, H. A., Weller, J. I., & Ron, M. (2006). Identification of a missense mutation in the bovine ABCG2 gene with a major effect on the QTL on chromosome 6 affecting milk yield and composition in Holstein cattle. *Genome Research*, *15*, 936-944. https://doi.org/10.1101/gr.3806705
28. Tăbăran, A., Balteanu, V. A., Gal, E., Pusta, D., Mihaiu, R., Dan, S. D., Tăbăran, A. F., & Mihaiu, M. (2015). Influence of DGAT1 K232A Polymorphism on Milk Fat Percentage and Fatty Acid Profiles in Romanian Holstein Cattle. *Animal Biotechnology*, *26*(2), 105-111. https://doi.org/10.1080/10495398.2014.933740
29. Khatib, A., Mazur, A. M., & Prokhortchouk, E. (2020). The distribution of lethal Holstein haplotypes affecting female fertility among the Russian Black-and-White cattle. *EurAsian Journal of Biosciences*, *14*(2), 2545-2552. EDN: https://elibrary.ru/WVDVMW
30. Komisarek, J., & Dorynek, Z. (2009). Effect of ABCG2, PPARGC1A, OLR1 and SCD1 gene polymorphism on estimated breeding values for functional and production traits in Polish Holstein-Friesian bulls. *Journal of Applied Genetics*, *50*(2), 125-132. https://doi.org/10.1007/BF03195663 EDN: https://elibrary.ru/BLUBGD
31. Kaminski, S. (2020). Novel method for identification of the lethal mutation in bovine APAF1 gene and its preliminary prevalence in Polish Holstein-

Friesian bulls. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, *23*(1), 157-160. https://doi.org/10.24425/pjvs.2020.132760 EDN: https://elibrary.ru/SEPOII

32. Kowalewska-Łuczak, I., & Kulig, H. (2013). Polymorphism of the FAM13A, ABCG2, OPN, LAP3, HCAP-G, PPARGC1A genes and somatic cell count of Jersey cows - Preliminary study. *Research in Veterinary Science*, *94*(2), 252-255. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2012.08.006 EDN: https://elibrary.ru/RMJNIZ
33. Kolenda, M., & Sitkowska, B. (2021). The Polymorphism in Various Milk Protein Genes in Polish Holstein-Friesian Dairy Cattle. *Animals*, *11*(2), 389. https://doi.org/10.3390/ani11020389 EDN: https://elibrary.ru/TABYKS
34. Briano-Rodriguez, C., Romero, A., Llambí, S., Sica, A. B., Rodriguez, M. T. F., Giannitti, F., Rubén Dario Caffarena, R. D., Schild, C. O., Casaux, M. L., & Quintela, F. D. (2021). Lethal and semi-lethal mutations in Holstein calves in Uruguay. *Ciência Rural*, *51*(7). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200734 EDN: https://elibrary.ru/UFIVOF
35. Logar, B., Kavar, T., & Meglič, V. (2008). Detection of recessive mutations (CVM, BLAD and RED factor) in holstein bulls in Slovenia. *Journal of Central European Agriculture*, *9*(1), 101-106.
36. Matsumoto, H., Kojya, M., Takamuku, H., Kimura, S., Kashimura, A., Imai, S., Yamauchi, K., & Ito, S. (2020). MC1R c.310G>- and c.871G > A determine the coat color of Kumamoto sub-breed of Japanese Brown cattle. *Animal Science Journal*, *91*(1), 13367. https://doi.org/10.1111/asj.13367 EDN: https://elibrary.ru/NKCTQT
37. Meydan, H., Yildiz, M. A., & Agerholm, J. S. (2010). Screening for bovine leukocyte adhesion deficiency, deficiency of uridine monophosphate synthase, complex vertebral malformation, bovine citrullinaemia, and factor XI deficiency in Holstein cows reared in Turkey. *Acta Veterinaria Scandinavica*, *52*(1), 56. https://doi.org/10.1186/1751-0147-52-56 EDN: https://elibrary.ru/OMEZZT
38. Morales, R., & Ungerfeld, E. M. (2016). Milk fatty acid profile is modulated by DGAT1 and SCD1 genotypes in dairy cattle on pasture and strategic supplementation. *Genetics and Molecular Research*, *15*(2), 15027057. https://doi.org/10.4238/gmr.15027057
39. Nanaei, H. A., Mahyari, S. A., & Edriss, M.-A. (2014). Effect of LEPR, ABCG2 and SCD1 Gene Polymorphisms on Reproductive Traits in the Iranian Holstein Cattle. *Reproduction in Domestic Animals*, *49*(5), 769-774. https://doi.org/10.1111/rda.12365
40. Zhang, Y., Li, Q., Ye, S., Faruque, M. O., Yu, Y., Sun, D., Zhang, S., & Wang, Y. (2014). New variants in the melanocortin 1 receptor gene (MC1R) in Asian cattle. *Animal Genetics*, *45*(4), 609-610. https://doi.org/10.1111/age.12160

41. Pritchard, J. K., Wen, X., & Falush, D. (2010). *Documentation for structure software: Version 2.3*. Retrieved from http://pritch.bsd.unicado.edu/structure.html
42. Ron, M., Cohen-Zinder, M., Peter, C., Weller, J. I., & Erhardt, G. (2006). Short Communication: A Polymorphism in ABCG2 in Bos indicus and Bos taurus Cattle Breeds. *Journal of Dairy Science*, *89*, 4921-4923. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72542-5
43. Gopi, B., Singh, R. V., Kumar, S. a., Kumar, S. u., Chauhan, A., Kumar, A., & Singh, S. V. (2020). Single-nucleotide polymorphisms in CLEC7A, CD209 and TLR4 gene and their association with susceptibility to paratuberculosis in Indian cattle. *Journal of Genetics*, *99*, 14. https://doi.org/10.1007/s12041-019-1172-4 EDN: https://elibrary.ru/GPALQP
44. Zhang, Y., Liang, D., Huang, H., Yang, Z., Wang, Y., Yu, Y., Liu, L., Zhang, S., Han, J., & Xiao, W. (2020). Technical note: Development and application of KASP assays for rapid screening of 8 genetic defects in Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*, *103*(1), 619-624. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16345 EDN: https://elibrary.ru/CKCEKF
45. Chessa, S., Gattolin, S., Cremonesi, P., Soglia, D., Finocchiaro, R., Van Kaam, J. T., Marusi, M., & Civati, G. (2020). The effect of selection on casein genetic polymorphisms and haplotypes in Italian Holstein cattle. *Italian Journal of Animal Science*, *19*(1), 833-839. https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1802356 EDN: https://elibrary.ru/MQDAIV
46. Allais, S., Levéziel, H. H., Payet-Duprat, N., Hocquette, J. F., Lepetit, J., Rousset, S., Denoyelle, C., Bernard-Capel, C., Journaux, L., Bonnot, A., & Renand, G. (2010). The two mutations, Q204X and nt821, of the myostatin gene affect carcass and meat quality in young heterozygous bulls of French beef breeds. *Journal of Animal Science*, *88*(2), 446-454. https://doi.org/10.2527/jas.2009-2385
47. Yildirim, M., & Sahin, E. (2010). ABCG2 Gene polymorphism in Holstein cows of Turkey. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, *16*(3), 473-476. https://doi.org/10.9775/kvfd.2009.1047

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Снегин Эдуард Анатольевич, д-р биол. наук, профессор, директор НИЦ Геномной селекции
Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
snegin@bsu.edu.ru

Бархатов Анатолий Сергеевич, к.б.н., младший научный сотрудник НИЦ Геномной селекции
Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
barkhatov@bsu.edu.ru

Сычев Антон Александрович, к.б.н., старший научный сотрудник НИЦ Геномной селекции
Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
sychev@bsu.edu.ru

Снегина Елена Андреевна, научный сотрудник НИЦ Геномной селекции
Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
snegina@bsu.edu.ru

Юсупов Сергей Рискулович, младший научный сотрудник НИЦ Геномной селекции
Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
yusupov@bsu.edu.ru

Юсупова Александра Юрьевна, младший научный сотрудник НИЦ Геномной селекции

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

DATA ABOUT THE AUTHORS

Eduard A. Snegin, Dr. Sc. (Biology), Professor, Director of the Research Center for Genomic Breeding
Belgorod National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
snegin@bsu.edu.ru
SPIN-code: 5655-7828
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7574-6910

Anatoliy S. Barkhatov, Cand. Sci. (Biol.), Junior Researcher of the Research Center for Genomic Breeding
Belgorod National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
barkhatov@bsu.edu.ru
SPIN-code: 3833-2940
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9996-7251
Researcher ID: AAM-2535-2020/
Scopus Author ID: 57197819027

Anton A. Sychev, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher of the Research Center for Genomic Breeding
Belgorod National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
sychev@bsu.edu.ru
SPIN-code: 6720-0967
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3311-0914

Elena A. Snegina, Researcher of the Research Center for Genomic Breeding
Belgorod National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
snegina@bsu.edu.ru
SPIN-code: 3402-6300
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1789-1121

Sergei R. Yusupov, Junior Researcher of the Research Center for Genomic Breeding
Belgorod National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
yusupov@bsu.edu.ru
SPIN-code: 6628-1450
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5425-8942

Alexandra Yu. Yusupova, Junior Researcher of the Research Center for Genomic Breeding
Belgorod National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
tishchenko_ayu@bsu.edu.ru
SPIN-code: 9486-0844
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1838-7816

Поступила 27.05.2024
После рецензирования 04.09.2024
Принята 15.10.2024

Received 27.05.2024
Revised 04.09.2024
Accepted 15.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1107 **EDN: ODFQOK**
УДК 636.5.033/61.619

CC BY NC ND

Научная статья

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЛИФОСАТА И АНТИБИОТИКОВ НА СОСТАВ И ФУНКЦИИ МИКРОБИОМА КИШЕЧНИКА БРОЙЛЕРОВ

Д.Г. Тюрина, Е.А. Йылдырым, Г.Ю. Лаптев, Н.И. Новикова, Л.А. Ильина, В.А. Филиппова, А.В. Дубровин, К.А. Калиткина, Е.С. Пономарева, И.А. Ключникова, В.А. Заикин, Е.П. Горфункель

Аннотация

Обоснование. Сочетанное действие остаточных количеств пестицидов и антибиотиков в кормах для птиц может приводить к негативному воздействию на состав кишечного микробиома поголовья.

Цель. Проанализировать изменение состава микробиома слепых отростков кишечника бройлеров под воздействием глифосата в количестве 1 ПДК для продуктов питания изолированно и при комбинации глифосата с антибиотиками и противококцидийным препаратом.

Материалы и методы. Подопытных птиц делили на 4 группы: I группа - контрольная, которая получала основной рацион (ОР), II опытная - ОР с добавлением глифосата; III опытная - ОР с добавлением глифосата и ветеринарных антибиотиков; IV опытная - ОР с добавлением глифосата и кокцидиостатика. Состав бактерий определяли методом NGS- секвенирования на автоматическом секвенаторе MiSeq («Illumina, Inc.», США). Программное обеспечение PICRUSt2 (v.2.3.0) (https://github.com/picrust/picrust2) было использовано для проведения прогнозирования функциональной активности метагенома, семейств генов и белков.

Результаты. Результаты показали, что под влиянием глифосата (опытная группа II) на 7-е и 40-е сутки жизни бройлеров из сообщества микроорганизмов химуса слепых отростков кишечника полностью элиминировались микроорганизмы филума Proteobacteria, на 14-е сутки их содержание снижалось в 3,7 раза по сравнению с контрольной группой I ($P \leq 0,05$). В группах III и IV их количество возрастало по сравнению с группой II до 3,1 и 7,9 раза соответственно ($P \leq 0,05$). В 7-ми суточном возрасте в опытной группе II, а также в 7-40 суточном возрасте в опытной группе III снижалось количество бактерий

Ruminococcaceae и Oscillospiraceae до 10,3 и 11,8% соответственно по сравнению с контрольной группой I (P≤0,05). Изменения в составе микробных таксонов под влиянием вводимых в корм пестицидов и лекарственных веществ привели к изменению 185 потенциальных функциональных путей (P≤0,05). Так, снижалась активность путей энергетического, углеводного, протеинового метаболизма, обмена жиров, биосинтеза коферментов и кофакторов, витаминов в опытных группах II-IV по сравнению с контрольной группой I (P≤0,05).

Заключение. Полученные нами данные указывают на то, что при экспериментальной контаминации корма гербицидом глифосатом, введении в корм ветеринарных антибиотиков и кокцидиостатика в слепых отростках кишечника цыплят-бройлеров происходили изменения структуры микробиома уже на высоких таксономических уровнях, а также наблюдалось угнетение критически важных потенциально заложенных функциональных путей. Это может негативно повлиять на организм хозяина.

Ключевые слова: глифосат; антибиотики; кокцидиостатик; бройлеры; токсическое действие; микробиом; NGS-секвенирование

Для цитирования. Тюрина, Д. Г., Йылдырым, Е. А., Лаптев, Г. Ю., Новикова, Н. И., Ильина, Л. А., Филиппова, В. А., Дубровин, А. В., Калиткина, К. А., Пономарева, Е. С., Ключникова, И. А., Заикин, В. А., & Горфункель, Е. П. (2025). Результаты исследования воздействия глифосата и антибиотиков на состав и функции микробиома кишечника бройлеров. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 261-294. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1107

Original article

THE RESULTS OF THE STUDY OF THE EFFECTS OF GLYPHOSATE AND ANTIBIOTICS ON THE COMPOSITION AND FUNCTIONS OF THE INTESTINAL MICROBIOME OF BROILERS

D.G. Tyurina, E.A. Yildirim, G.Y. Laptev, N.I. Novikova, L.A. Ilyina, V.A. Filippova, A.V. Dubrovin, K.A. Kalitkina, E.S. Ponomareva, I.A. Klyuchnikova, V.A. Zaikin, E.P. Gorfunkel

Abstract

Background. The combined effect of residual amounts of pesticides and antibiotics in poultry feed can lead to a negative effect on the composition of the intestinal microbiome of livestock.

Purpose. To analyze changes in the composition of broilers intestinal cecum microbiome under the influence of glyphosate in an amount of 1 MPC for food products in isolation and with a combination of glyphosate with antibiotics and an anticoccidial drug.

Materials and methods. The experimental birds were divided into 4 groups: Group I - control, which received the basic diet (BD), experimental group II - BD with the addition of glyphosate; III experimental - BD with the addition of glyphosate and veterinary antibiotics; IV experimental - BD with the addition of glyphosate and anticoccidial drug. The composition of bacteria was determined by NGS sequencing on a MiSeq automatic sequencer (Illumina, Inc., USA). PICRUSt2 (v.2.3.0) software (https://github.com/picrust/picrust2) was used to perform functional activity prediction of the metagenome, gene families, and proteins.

Results. The results showed that under the influence of glyphosate (experimental group II), on the 7th and 40th days of life of broilers, microorganisms of the phylum Proteobacteria were completely eliminated from the community of microorganisms in the chyme of the intestinal cecum; on the 14th day, their content decreased by 3 .7 times compared to control group I ($P \leq 0.05$). In groups III and IV, their number increased compared to group II to 3.1 and 7.9 times, respectively ($P \leq 0.05$). At 7 days of age in experimental group II, as well as at 7-40 days of age in experimental group III, the number of Ruminococcaceae and Oscillospiraceae bacteria decreased to 10.3 and 11.8%, respectively, compared to control group I ($P \leq 0.05$). Changes in the composition of microbial taxa under the influence of pesticides and medicinal substances introduced into feed led to changes in 185 potential functional pathways ($P \leq 0.05$). Thus, the activity of the pathways of energy, carbohydrate, protein metabolism, fat metabolism, biosynthesis of coenzymes and cofactors, vitamins decreased in experimental groups II-IV compared to control group I ($P \leq 0.05$).

Conclusion. Our data indicate that during the experimental contamination of feed with the herbicide glyphosate, the introduction of veterinary antibiotics and anticoccidial drug into the feed in the caeca of the intestines of broiler chickens, changes in the structure of the microbiome occurred already at high taxonomic levels, and critical inhibition was also observed important potentially underlying functional pathways. This can negatively affect the host's body.

Keywords: glyphosate; antibiotics; coccidiostatic; broilers; toxic effect; microbiome; NGS sequencing

For citation. Tyurina, D. G., Yildirim, E. A., Laptev, G. Y., Novikova, N. I., Ilyina, L. A., Filippova, V. A., Dubrovin, A. V., Kalitkina, K. A., Ponomareva, E. S., Klyuchnikova, I. A., Zaikin, V. A., & Gorfunkel, E. P. (2025). The results of the

study of the effects of glyphosate and antibiotics on the composition and functions of the intestinal microbiome of broilers. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 261-294. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1107

Введение

Микробиом кишечника животных и птиц представляет собой динамичную совокупность бактерий, архей, грибов и фагов, которые продуцируют микробные метаболиты, образуя метаболическую ось хозяин-микроб, играющую многогранную роль в метаболизме животных и птиц, иммунном гомеостазе и устойчивости к колонизации патогенами [11; 28; 54]. Кишечные микроорганизмы напрямую или косвенно (с помощью метаболитов) оказывают влияние на всасывание и использование организмом питательных веществ и показатели продуктивности [19; 38]. В слепой кишке происходят основные процессы микробной ферментации, приводящие к синтезу летучих жирных кислот, которые обеспечивают хозяина энергией [4].

В последние десятилетия все большее внимания уделяется факторам, которые влияют на состав и стабильность микробиомов, связанных с хозяином [30]. Оказалось, что на состав кишечного микробиома оказывают влияние различные факторы, включая ксенобитики, присутствующие в кормах [41].

Так, гербициды на основе глифосата, которые традиционно используются в сельском хозяйстве [12] достаточно часто обнаруживаются в кормах для птиц [3]. Глифосат воздействует на шикиматный путь, в результате которого синтезируются ароматические аминокислоты у растений. Данный путь отсутствует у животных и человека, но имеется у некоторых микроорганизмов, что предполагает возможное его влияние на состав микроорганизмов пищеварительной системы птиц [40]. Использование глифосата на сегодняшний день является очень спорным, поскольку научные организации пришли к противоположным выводам об уровне его опасности [17]. Недавние результаты показали, что глифосат вызывает эмбриональную смертность у домашней птицы [44], снижает скорость вылупления [14], нарушает синтез ферментов цитохрома P450 в печени и тонком кишечнике птиц [15], негативно влияет на зоотехнические характеристики, включая развитие органов пищеварительного тракта и прирост массы тела бройлеров [50], что может иметь связь с измененным составом микробиома пищеварительной системы.

Кроме того, антибиотики, которые также можно отнести к группе ксенобиотиков, широко используются в бройлерном животноводстве для про-

филактики и лечения заболеваний. Накопленные данные свидетельствуют о том, что лечение антибиотиками вызывает значительные изменения в микробиоте желудочно-кишечного тракта бройлеров, может вызывать дисбиоз и нарушения развития кишечника, что отрицательно влияет на физиологию бройлеров и метаболические показатели [34]. С другой стороны, иммунная система птиц подвергается неблагоприятному воздействию со стороны антибиотиков, что приводит к снижению концентрации макрофагов в ткани слизистой оболочки кишечника, и, в свою очередь, также влияет на состав микробиоты [39].

Кокцидиоз, который является серьезным протозойным инфекционным заболеванием, которое наносит глобальный экономический ущерб птицеводству [52] также вынуждает использовать антикокцидиальные антибиотики в ветеринарной медицине во всем мире [55]. Кокцидии прямо или косвенно влияют на здоровье хозяина и значительно уменьшают разнообразие микробиоты в кишечнике [27], следовательно, борьба с кокцидиями с помощью антибиотиков может внести существенный вклад в изменение состава микробиома.

На сегодняшний день исследования воздействия различных ксенобиотиков на физиологию и продуктивность животных и птиц, в основном, сосредоточены на последствиях их обособленного влиния. Однако, сочетанное воздействие остаточных количеств глифосата, антибиотиков и антикокцидиальных препаратов может приводить к более негативным последствиям, включая изменение состава микробиома кишечника [35].

Цель исследования – проанализировать изменение состава микробиома слепых отростков кишечника бройлеров под воздействием глифосата в количестве 1 ПДК для продуктов питания изолированно и при комбинации глифосата с антибиотиками и противококцидийным препаратом.

Материалы и методы

В КФХ, находящимся в селе Федоровское Тосненского района Ленинградской области, был проведен эксперимент по выращиванию цыплят-бройлеров кросса Росс 308 с суточного возраста до 40-дневного. 260 птиц поделили на 4 равные группы: I – контрольная I, которая получала основной рацион (ОР), II опытная – получала ОР с добавлением глифосата в дозе 20 мг/кг корма; III опытная – получала ОР с добавлением глифосата и ветеринарных антибиотиков энрофлоксацина и метансульфоната колистина; IV опытная – получала глифосат и аммоний мадурамицин (антикокцидиальный антибиотик). Полнорационный комбикорм ПК5_1Г_431

(ЗАО «Гатчинский комбикормовый завод», Ленинградская область, Россия) использовали для кормления бройлеров в возрасте от 1 до 4 недель. С 28-го по 40-й день цыплятам скармливали полнорационный комбикорм ПК-6_Г_888 (ЗАО «Гатчинский комбикормовый завод»). Режимы поения, освещения и влажности соответствовали рекомендациям по содержанию бройлеров Росс 308 [1]. Цыплята опытных и контрольной групп содержались в трехъярусных клетках, состоящих из блоков ББ-1 (НПО «Стимул-Инк», Московская область, Россия).

Корма искусственно загрязняли глифосатом в виде препарата «Агрокиллер» (ЗАО «Август», Москва, Россия), который содержит 500 г/л глифосата кислоты. Рабочий раствор вводили в корм с помощью опрыскивания. Концентрацию глифосата в корме измеряли методом иммуноферментного анализа (ИФА), используя фотометр Stat Fax 303+ (Awareness Technology, Inc., США) и тест-систему GLY ELISA Microtiter Plate (Eurofins Abraxis, Warminster, PA, США). Фоновых следов глифосата не выявили. Антибиотик энрофлоксацин добавляли в питьевую воду в виде препарата «Энрофлон 10% раствор для перорального применения» (ООО «НПК-ВИК», Россия) в количестве 0,5 мл на 1 л воды в возрасте 0-10 суток жизни цыплят, антибиотик колистина метансульфонат добавляли в воду в виде препарата «Колистин 2 млн» (Организация-разработчик: ООО «Ареал Медикал»/производитель «АВЗ-СП», Россия) в количестве 0,25 мл на 1 л воды на 33-37 сутки жизни. Антикокцидиальный препарат добавляли в количестве 500 г на 1 т корма на протяжении 35 суток жизни цыплят.

Исследования проводились в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых в экспериментальных и других научных целях (ETS № 123, Страсбург, 1986 г.) и в соответствии с этическим законодательством Российской Федерации в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации № 498-ФЗ «Об ответственном обращении с животными». Исследование одобрено биоэтической комиссией Федерального исследовательского центра животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста (ФГБНУ ФИЦ ВИЖ имени Л. К. Эрнста).

Отбор проб химуса слепых отростков кишечника бройлеров (n=3) для анализа состава микробиома проводили в суточном возрасте, а также на 7-е, 14-е и 40-е сутки эксперимента. Суммарную ДНК выделяли при помощи набора Genomic DNA Purification Kit («Thermo Fisher Scientific, Inc.», США). Состав бактерий определяли методом NGS-секвенирования на автоматическом секвенаторе MiSeq («Illumina, Inc.», США) с примене-

нием праймеров для V3-V4 региона 16S рРНК: 5′- TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGCCTACGGGNGGCWGCAG-3′, 5′- GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGGACTACHVGGGTATCTAATCC-3′. Этапы ПЦР-реакции включали: 3 мин при 95 °C; 30 с при 95 °C, 30 с при 55 °C, 30 с при 72 °C (25 циклов); 5 мин при 72 °C. Секвенирование проводили при помощи реагентов для подготовки библиотек Nextera® XT IndexKit («Illumina, Inc.», США), для очистки ПЦР-продуктов Agencourt AMPure XP («Beckman Coulter, Inc.», США) и для проведения секвенирования MiSeq® ReagentKit v2 (500 cycle) («Illumina, Inc.», США).

Биоинформатическая обработка полученных результатов проводилась при использовании конвейера сквозного анализа микробиома QIIME2 ver. 2020.8 (https://docs.qiime2.org/2020.8/). Фильтрацию шумовых последовательностей проводили с использованием пакета DADA2. Для построения филогении de novo выполнили множественное выравнивание последовательностей с помощью пакета MAFFT. Для назначения таксономии использовали программное обеспечение QIIME2.

Программное обеспечение PICRUSt2 (v.2.3.0) (https://github.com/picrust/picrust2) было использовано для проведения прогно-зирования функциональной активности метагенома, семейств генов и белков. Для поиска метаболических путей и белков использовали базу MetaCyc (https://metacyc.org/).

Математическую и статистическую обработку результатов осуществляли методом многофакторного дисперсионного анализа (multifactor ANalysis Of VAriance, ANOVA) в программах Microsoft Excel XP/2003, R-Studio (Version 1.1.453) (https://rstudio.com).

Результаты исследования

При проведении NGS-секвенирования состава бактерий химуса слепых отростков кишечника бройлеров всего из образцов было получено 129,090 высококачественных парных последовательностей 16S рРНК (при этом медиана считывания составляла 9,558, минимум - 1,236 и максимум -13,630).

Результаты показали, что в составе кишечного микробиома бройлеров было обнаружено 5 филумов микроорганизмов в суточном возрасте, 4 филума – в 7 суток жизни, 3 филума – в 14 суток, 6 филумов – в 40 суток (рисунок 1). Доминирующими филумами в суточном возрасте были *Firmicutes* и *Proteobacteria*, на следующих этапах онтогенеза (с 7-х по 40-е сутки) – преимущественно *Firmicutes*.

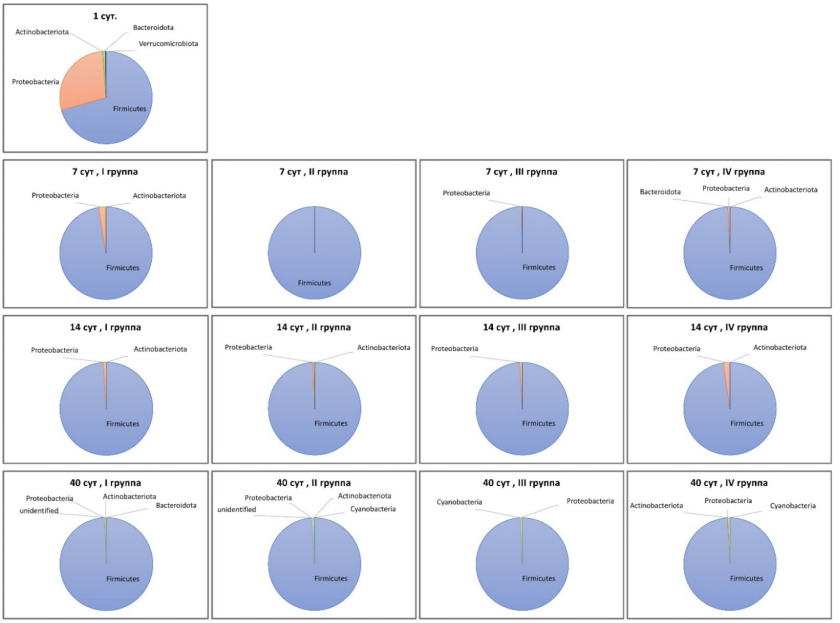


Рис. 1. Таксономический состав микробиоты слепых отростков кишечника бройлеров кросса Росс 308 на уровне филумов под влиянием глифосата и антибиотиков: I-IV опытные группы, n=3 (анализ методом NGS-секвенирования)

Мы показали, что состав микробиома слепых отростков кишечника резко отличался у цыплят суточного возраста от птиц более старших возрастов. Так, содержание Proteobacteria у птиц суточного возраста составляло 28,0±2,24%, тогда как у птиц более старших возрастов не превышало 2,4±0,15%. Численность *Firmicutes*, напротив, с возрастом увеличивалась ($P \leq 0,05$).

Стоит отметить, что под влиянием глифосата в монорежиме (опытная группа II) на 7-е и 40-е сутки жизни бройлеров из химуса слепых отростков кишечника полностью элиминировались микроорганизмы филума *Proteobacteria* из сообщества, на 14-е сутки их содержание снижалось в 3,7 раза по сравнению с контрольной группой I ($P \leq 0,05$). В опытных группах III и IV их количество возрастало по сравнению с группой II до 3,1 и 7,9 раза соответственно ($P \leq 0,05$).

Обращает на себя внимание, что относительная численность представителей семейства *Clostridiaceae* у птиц суточного возраста составля-

ла 64,9±5,22%, тогда как у птиц более старших возрастов не превышала 1,0±0,09%. (рисунок 2). В возрасте 40 суток данные микроорганизмы не были представлены в кишечнике исследованных птиц.

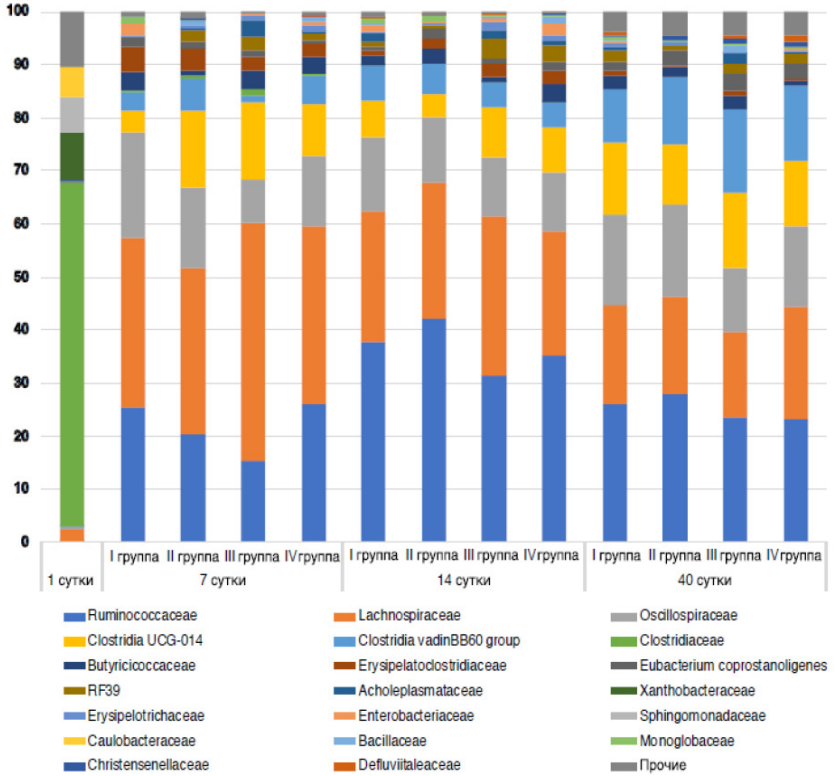


Рис. 2. Таксономический состав микробиоты слепых отростков кишечника бройлеров кросса Росс 308 на уровне семейств под влиянием глифосата и антибиотиков: I-IV опытные группы, n=3 (анализ методом NGS-секвенирования)

Как видно из рисунка 3, представители класса *Clostridia* у цыплят суточного возраста были, в основном, представлены родом *Clostridium_sensu_stricto*_1 (доля *Clostridium_sensu_stricto*_1 64,9±5,45% из 68,4±5,47% – общей доли представителей класса *Clostridia*). В то же время представители класса *Clostridia* в кишечнике птиц более старших возрастов были представлены бактериями иных родов - *Clostridia_vadin*BB60_group и *Clostridia*_UCG-014.

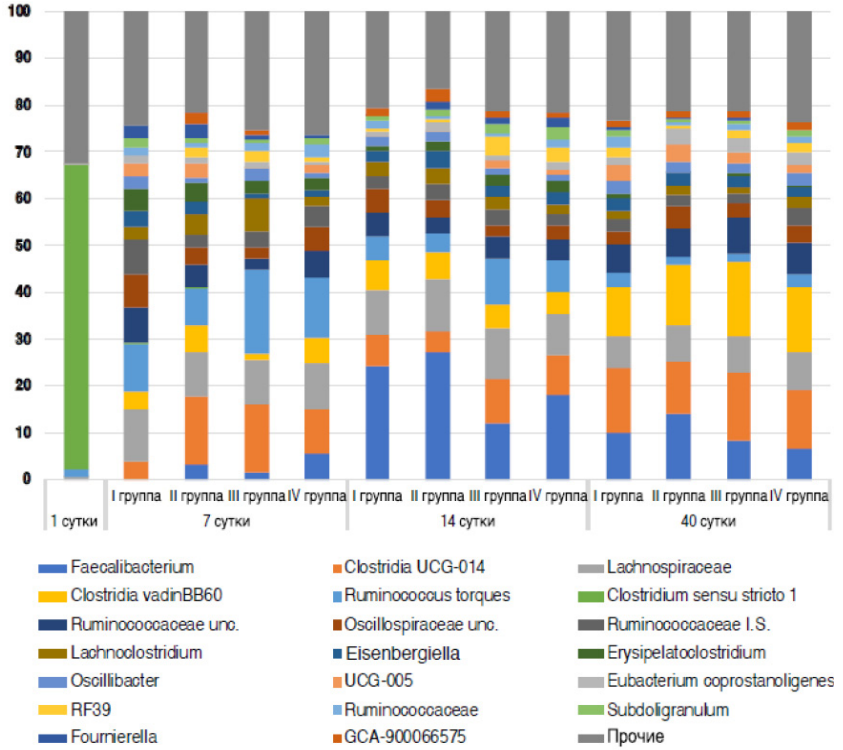


Рис. 3. Таксономический состав микробиоты слепых отростков кишечника бройлеров кросса Росс 308 на уровне родов под влиянием глифосата и антибиотиков: I-IV опытные группы, n=3 (анализ методом NGS-секвенирования)

Кроме того, относительная численность таких семейств, как *Ruminococcaceae* и *Oscillospiraceae* у птиц 7-40 суточного возраста значительно возрастала по сравнению с суточными цыплятами ($P \leq 0,05$) (рис. 2). Интересно, что в 7-ми суточном возрасте в опытной группе II под влиянием глифосата в изолированном виде, а также в 7-40 суточном возрасте на фоне глифосата в комбинации с антибиотиками (опытная группа III) снижалось количество руминококков и осцилоспир до 10,3 и 11,8% соответственно по сравнению с контрольной группой I ($P \leq 0,05$). При введении в рацион птиц опытной группы IV аммония мадурамицина содержание данных бактерий практически не изменялась (или изменялось незначительно) по сравнению с контрольной группой I ($P \leq 0,05$).

На следующем этапе с помощью биоинформатического анализа у микробного сообщества слепых отростков кишечника бройлеров было детектировано 357 прогнозируемых метаболических пути. Изменения в составе микробных таксонов под влиянием ксенобиотиков имело связь с изменением их 185 потенциально заложенных функциональных пути (P≤0,05) (рисунок 4).

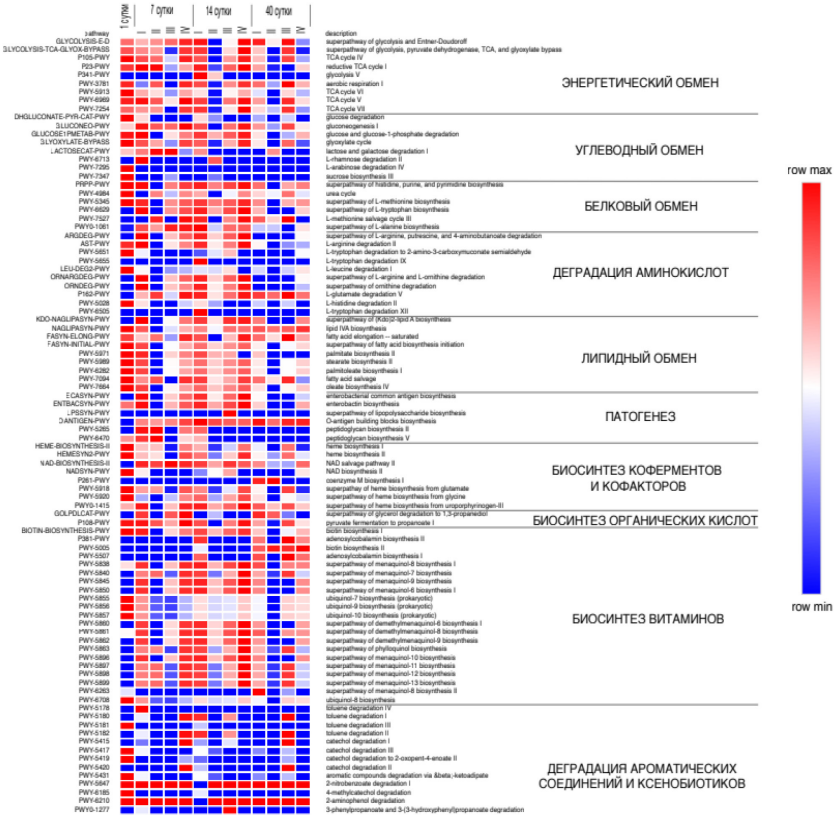


Рис. 4. Прогнозируемые бактериальные метаболическиие пути в просвете слепых отростков кишечника бройлеров кросса Росс 308, имеющих достоверные различия (P≤0,05) между группами I-IV. Максимальные значения отмечены красным, а минимальные – синим

Как видно из рисунка 4, на фоне глифосата в монорежиме (опытная группа II) наблюдались наиболее выраженные изменения предсказанных путей метаболизма микробиоты кишечника по сравнению с контролем I (P≤0,05).

Снижалась активность значительного количества прогнозируемых путей обмена энергии, углеводов, протеина, жиров, синтеза коферментов и кофакторов, витаминов, деградации ксенобиотиков (P≤0,05). Так, например, в 7-ми суточном возрасте в кишечном бактериальном сообществе цыплят не выявлялись гены, связанные с путями PRPP-PWY (синтеза гистидина, пурина и пиримидина), PWY-5345 (L-метионина (путем сульфгидрирования)), PWY-6629 (L-триптофана) в отличие от контрольной группы I. В группе III с дополнительным введением антибиотиков не удалось детектировать гены, связанные с реализацией пути PWY-7527 (цикла утилизации L-метионина III). В 14-суточном возрасте у птиц в опытной группе II снижалась относительная активность цикла мочевины в 2,7 раза и суперпути биосинтеза L-триптофана в 1,4 раза по сравнению с контрольной группой I (P≤0,05). Кроме того, снижения активности в опытных группах II-IV по сравнению с контрольной группой I (P≤0,05) были отмечены для путей биосинтеза витаминов, таких, как биотин, витамин B12, различные гомологи витамина K (рис. 4).

Обсуждение результатов

Результаты NGS-секвенирования микробиома химуса слепых отростков кишечника бройлеров показали, что доминирующими филумами в суточном возрасте были *Firmicutes* и *Proteobacteria*, на следующих этапах онтогенеза – преимущественно *Firmicutes*. В предыдущих исследованиях показано, что *Firmicutes, Bacteroidetes* и *Proteobacteria*, как правило, традиционно доминируют на всех этапах жизни птиц, составляя более 70% общего сообщества бактерий [45].

Данные о значительном количестве *Proteobacteria* в кишечнике цыплят суточного возраста, по сравнению с более старшими возрастами, совпадает с предыдущими исследованиями. Ранее было показано, что доля *Proteobacteria* достигала 41,54% в суточном возрасте [25]. Предполагается, что Proteobacteria способствуют гомеостазу анаэробной среды желудочно-кишечного тракта и, следовательно, стабильности строго анаэробной микробиоты [32]. Bortoluzzi C. с соавторами, подобно нашим исследованиям показали, что численность *Firmicutes* увеличивается с возрастом в кишечнике цыплят [5]. В состав *Firmicutes* входит значительная доля комменсальных бактерий, связанных производством бутирата [10]. Willson N. с соавторами выдвинули предположение о том, что микробиота слепой кишки молодых цыплят нестабильна и значительно варьирует [46]. Исследователи пришли к выводу о том, что в возрасте нормальная микробиота стабилизируется, в основном, к 28-ми суткам [47].

Обнаруженная высокая численность представителей семейства *Clostridiaceae* у птиц суточного возраста, вероятно, объясняется несовершенным развитием иммунной системы у цыплят раннего возраста. Ведь среди бактерий *Clostridiaceae* встречается много патогенных форм, продуцирующих экзотоксины [33], например, *Clostridium botulinum*, *C. tetani*, *C. chauvoei*, *C. novyi*, *C. sordellii*, *C. Haemolyticum*, *C. perfringens* [43]. По всей вероятности, после вылупления, подвергнувшись внешнему воздействию, цыплята оказались восприимчивы к инвазии нежелательных микроорганизмов из окружающей среды (при фекальном загрязнении яичной скорлупы и т.д.).

Интересно, что представители класса *Clostridia* у цыплят суточного возраста были, в основном, представлены родом *Clostridium_sensu_stricto*_1. В то же время представители класса *Clostridia* в кишечнике птиц более старших возрастов были представлены бактериями иных родов – *Clostridia_vadin*BB60_group и *Clostridia*_UCG-014. Это еще раз демонстрирует нестабильность микробиома суточных цыплят и указывает на наличие процессов стабилизации кишечной микробиоты с возрастом. Дело в том, что представители рода *Clostridium_sensu_stricto*_1, как правило, ассоциируются с процессами патогенеза [36], а также интерпретируются как индикаторы дисбиоза [24]. *Clostridiales_vadin*BB60_group, напротив, считается представителем нормобиоты, продуцирующей летучие жирные кислоты [51], ее численность положительно коррелирует с эффективностью откорма [29]. Бактерий рода *Clostridia*_UCG-014 также традиционно относят к представителям нормобиоты [2].

Возрастание относительной численности таких семейств, как *Ruminococcaceae* и *Oscillospiraceae* у птиц 7-40 суточного возраста по сравнению с суточными цыплятами может свидетельствовать о становлении микробного баланса с возрастом. Данные микроорганизмы связаны с более высокой продуктивностью и иммунным статусом и часто используются в качестве маркеров здоровья кишечника птицы [53]. Они могут ферментировать структурные углеводы и продуцировать жирные коротко-цепочечные кислоты [7]. Так, представители семейства *Ruminococcaceae* бактерии рода *Faecalibacterium* sp. являются одними из важных производителей масляной кислоты в кишечном тракте животных, а *Faecalibacterium prausnitzii*, как было доказано, оказывает противовоспалительное действие, поддерживает активность бактериальных ферментов и защищает пищеварительную систему от кишечных патогенов [31]. Короткоцепочечные жирные кислоты, производимые представителями данных семейств

[49] могут улучшить здоровье кишечника, поддерживая анаэробную кишечную среду и предотвращая распространение факультативных анаэробных патогенов, а также оказывают важное влияние на физиологию и энергетический баланс хозяина [48]. Поэтому снижение численности *Ruminococcaceae* и *Oscillospiraceae* в 7-ми суточном возрасте на фоне глифосата в монорежиме, а также в 7-40 суточном возрасте на фоне глифосата в сочетании с антибиотиком может приводить к негативным последствиям для организма птиц. Ранее Robinson K. с соавторами показали, что такие антибиотики, как тилозин и энрамицин, увеличивали численность *Ruminococcaceae*, тогда как салиномицин и монензин уменьшали численность этого семейства [37].

Стоит отметить, что заражение кокцидиями приводит к снижению численности большинства бактериальных таксонов (включая роды *Faecalibacterium, Alistipes* и др.) в кишечнике кур, за исключением представителей семейства *Enterobacteriaceae* [23]. Эти данные указывают на то, что кокцидиальная инфекция может вызывать выраженный дисбиоз или нарушение резидентной микробиоты и способствовать последующему заражению другими патогенами. Возможно, это является объяснением того факта, что при добавлении в рацион кокцидиостатика на фоне глифосата содержание представителей *Ruminococcaceae* и *Oscillospiraceae* практически не изменялась (или изменялось незначительно) по сравнению с контрольной группой. Ранее показано, что некоторые представители *Firmicutes* [8] в группе птиц с кокцидиозом имели тенденцию соответствовать значениям в группе здоровых птиц после лечения кокцидиостатиками этанамизурилом и салиномицином. Кроме того, численность *Enterobacter* и *Acinetobacter*, которые считаются условно-патогенными микроорганизмами у растений, животных и человека [42], были значительно снижены в группе птиц с введением в рацион салиномицина.

Большая часть преимуществ для хозяина, получаемых от симбиотического микробиома, проистекает именно от метаболитов, которые производят микроорганизмы и которые усваиваются хозяином [6]. Действительно, более 30% метаболитов, обнаруживаемых в кровотоке, хозяин получает от своего микробиома [9]. Симбиотическая микробиота кишечника модулирует здоровье хозяина посредством ряда трансгеномных метаболических и иммунорегуляторных осей [21]. Как показали наши результаты, полученные с помощью KEGG и PICRUSt2 под влиянием ксенобиотиков менялся не только микробный состав, но и активность потенциально заложенных функциональных путей, связанных с энергетическим, углеводным, белко-

вым, липидным метаболизмом, биосинтезом коферментов и кофакторов, витаминов и др. Таким образом, ксенобиотики, изменяющие критически важные пути метаболизма различных веществ, могут негативно сказаться на физиологии и продуктивности хозяина. Давно известно [20], что микробиота кишечника может синтезировать определенные витамины, в частности витамин К и витамины группы В, включая биотин, кобаламин, фолаты, никотиновую кислоту, пантотеновую кислоту, пиридоксин, рибофлавин и тиамин. Существуют данные о метаболической и физиологической значимости некоторых из этих витаминов для млекопитающих [18]. Показано, что у людей, находящихся на диете с низким содержанием витамина К в течение 3-4 недель, не развился дефицит данного витамина, но у тех, кто лечился антибиотиком широкого спектра действия, наблюдалось значительное снижение уровней протромбина в плазме из-за подавления кишечной микробиоты, продуцирующей витамин К [16]. Кроме того, снижение эффективности синтеза различных аминокислот микроорганизмами на фоне ксенобиотиков может снизить фактическую эффективность производства ценного для продуктивных животных и птиц микробиального белка [13]. По мнению исследователей [26], количество микробиального протеина в кишечнике тесно связано с микробными таксонами и их метаболизмом. Предыдущие результаты показали, что прогнозируемые пути микробиома у бройлеров с диагнозом «дисхондроплазия большеберцовой кости» отличался от клинически здоровых бройлеров, особенно по метаболизму аминокислот, углеводов, синтезу производных органических кислот, производных индола, витаминов [22].

Заключение

При экспериментальном введении в корм глифосата отдельно, а также в комбинации с ветеринарными антибиотиками и кокцидиостатиком в слепых отростках кишечника цыплят-бройлеров изменялся состав микробиома уже на уровне высоких таксономических рангов. Особенно выраженные изменения наблюдались при введении в корм глифосата в монорежиме. Некоторая коррекция дисбиоза под влиянием антибиотика и кокцидиостатика может быть связана с подавлением патогенной микробиоты и кокцидий. Под влиянием исследованных ксенобиотиков изменялся не только микробный состав, но и активность критически важных потенциально заложенных функциональных путей, связанных с энергетическим, углеводным, белковым, липидным метаболизмом, биосинтезом коферментов и кофакторов, витаминов и др. Следует иметь в виду,

что метаболиты, полученные из просвета кишечника, могут всасываться и влиять на общий метаболический фенотип хозяина.

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

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ №22-16-00128.

Список литературы

1. Егоров, И. А., Манукян, В. А., Ленкова, Т. Н. (2013). *Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы. Молекулярно-генетические методы определения микрофлоры кишечника*. Сергиев Посад: Весь Сергиев Посад. 51 с. ISBN: 978-5-91582-047-9 EDN: https://elibrary.ru/SDOKYP
2. Йылдырым, Е. А., Грозина, А. А., Вертипрахов, В. Г., Ильина, Л. А., Филиппова, В. А., Лаптев, Г. Ю., Пономарева, Е. С., Дубровин, А. В., Калиткина, К. А., Молотков, В. В., Ахматчин, Д. А., Бражник, Е. А., Новикова, Н. И., Тюрина, Д. Г. (2022). Состав и метаболический потенциал микробиома кишечника бройлеров Gallus Gallus L. под влиянием кормовых добавок при экспериментальном Т-2 токсикозе. *Сельскохозяйственная биология*, *57*(4), 743-761. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.4.743rus EDN: https://elibrary.ru/DRKMVH
3. Лаптев, Г. Ю., Йылдырым, Е. А., Тюрина, Д. Г., Ильина, Л. А., Филиппова, В. А., Калиткина, К. А., Дубровин, А. В., Новикова, Н. И., Меликиди, В. Х., Горфункель, Е. П., Пономарева, Е. С., Околелова, Т. М. (2022). Так ли безобиден глифосат? *Комбикорма*, *7-8*, 69-70. EDN: https://elibrary.ru/XJFXLL
4. Binek, M., Cisek, A. A., Rzewuska, M., Chrobak-Chmiel, D., Stefanska, I., Kizerwetter-Swida, M. (2017). Chicken intestinal microbiome: Development and function. *Med. Weter*, *73*, 618-625. https://doi.org/10.21521/mw.5790
5. Bortoluzzi, C., Scapini, L. B., Ribeiro, M. V., Pivetta, M. R., Buzim, R., Fernandes, J. I. M. (2019). Effects of β-mannanase supplementation on the intestinal microbiota composition of broiler chickens challenged with a coccidiosis vaccine. *Livestock Science*, *228*, 187-194.
6. Bortoluzzi, C., Tamburini, I., Geremia, J. (2023). Microbiome modulation, microbiome protein metabolism index, and growth performance of broilers supplemented with a precision biotic. *Poult Sci*, *102*(5), 102595. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102595 EDN: https://elibrary.ru/TFMWKJ

7. Chen, H. L., Zhao, X. Y., Zhao, G. X., Huang, H. B., Li, H. R., Shi, C. W., Yang, W. T., Jiang, Y. L., Wang, J. Z., Ye, L. P., Zhao, Q., Wang, C. F., Yang, G. L. (2020). Dissection of the cecal microbial community in chickens after Eimeria tenella infection. *Parasites and Vectors*, *13*, 1-15. https://doi.org/10.1186/s13071-020-3897-6 EDN: https://elibrary.ru/KLVQIE
8. Cheng, X., Zheng, H., Wang, C., Wang, X., Fei, C., Zhou, W., & Zhang, K. (2022). Effects of salinomycin and ethanamizuril on the three microbial communities in vivo and in vitro. *Front Microbiol*, *13*, 941259. https://doi.org/10.3389/fmi-cb.2022.941259 EDN: https://elibrary.ru/LYZGAW
9. Chernevskaya, E., Beloborodova, N., Klimenko, N., Pautova, A., Shilkin, D., Gusarov, V., & Tyakht, A. (2020). Serum and fecal profiles of aromatic microbial metabolites reflect gut microbiota disruption in critically ill patients: a prospective observational pilot study. *Crit. Care*, *24*, 312. https://doi.org/10.1186/s-13054-020-03031-0 EDN: https://elibrary.ru/OVJQNC
10. Chuang, W. Y., Lin, L. J., Shih, H. Der, Shy, Y. M., Chang, S. C., & Lee, T. T. (2021). Intestinal Microbiota, Anti-Inflammatory, and Anti-Oxidative Status of Broiler Chickens Fed Diets Containing Mushroom Waste Compost By-Products. *Animals*, *11*, 2550. https://doi.org/10.3390/ani11092550 EDN: https://elibrary.ru/JLMNFW
11. Collins, S. L., & Patterson, A. D. (2020). The gut microbiome: an orchestrator of xenobiotic metabolism. *Acta Pharm Sin B*, *10*(1), 19-32. https://doi.org/10.1016/j.apsb.2019.12.001 EDN: https://elibrary.ru/NRUGNV
12. Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., & Séralini, G. E. (2017). Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicol Rep*, *5*, 156-163. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025 EDN: https://elibrary.ru/VFCTZO
13. El, A. G., Mohsen, H., & Mohamed, S. S. (2012). Effect of Feeding a Combination of Zinc, Manganese and Copper Methionine Chelates of Early Lactation High Producing Dairy Cow. *Food and Nutrition Sciences*, 1084-1091. https://doi.org/10.4236/FNS.2012.38144
14. Fathi, M. A., Abdelghani, E., Shen, D., Ren, X., Dai, P., Li, Z., Tang, Q., Li, Y., & Li, C. (2019). Effect of in ovo glyphosate injection on embryonic development, serum biochemistry, antioxidant status and histopathological changes in newly hatched chicks. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr*, *103*, 1776-1784. https://doi.org/10.1111/jpn.13181
15. Fathi, M. A., Han, G., Kang, R., Shen, D., Shen, J., & Li, C. (2020). Disruption of cytochrome P450 enzymes in the liver and small intestine in chicken embryos in ovo exposed to glyphosate. *Environ. Sci*, *27*, 16865-16875. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08269-3 EDN: https://elibrary.ru/CBTYZL

16. Frick, P. G., Riedler, G., & Brögli, H. (1967). Dose response and minimal daily requirement for vitamin K in man. *J Appl Physiol*, *23*, 387-389. https://doi.org/10.1152/jappl.1967.23.3.387
17. Grau, D., Grau, N., Gascuel, Q., Paroissin, C., Stratonovitch, C., Lairon, D., Devault, D. A., & Di Cristofaro, J. (2022). Quantifiable urine glyphosate levels detected in 99% of the French population, with higher values in men, in younger people, and in farmers. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*, *29*, 32882-32893. https://doi.org/10.1007/s11356-021-18110-0 EDN: https://elibrary.ru/DJWFDU
18. Gustafsson, B. E., Daft, F. S., McDaniel, E. G., Smith, J. C., & Fitzgerald, R. J. (1962). Effects of vitamin K-active compounds and intestinal microorganisms in vitamin K-deficient germfree rats. *The Journal of Nutrition*, *78*, 461-468. https://doi.org/10.1093/jn/78.4.461
19. Hill, J. H., & Round, J. L. (2021). SnapShot: Microbiota effects on host physiology. *Cell*, *184*, 2796-2796. https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.04.026 EDN: https://elibrary.ru/DMSPLA
20. Hill, M. J. (1997). Intestinal flora and endogenous vitamin synthesis. *European Journal of Cancer Prevention*, *6*, S43-S45. https://doi.org/10.1097/00008469-199703001-00009
21. Holmes, E., Li, J. V., Marchesi, J. R., & Nicholson, J. K. (2012). Gut microbiota composition and activity in relation to host metabolic phenotype and disease risk. *Cell Metab*, *16*(5), 559-564. https://doi.org/10.1016/j.cmet.2012.10.007
22. Huang, S., Zhang, C., Xu, T., Shaukat, A., He, Y., Chen, P., Lin, L., Yue, K., Cao, Q., & Tong, X. (2022). Integrated Fecal Microbiome and Metabolomics Reveals a Novel Potential Biomarker for Predicting Tibial Dyschondroplasia in Chickens. *Front Physiol*, *13*, 887207. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.887207 EDN: https://elibrary.ru/HYQFGK
23. Kimura, N., Mimura, F., Nishida, S., & Kobayashi, A. (1976). Studies on the relationship between intestinal flora and cecal coccidiosis in chicken. *Poult. Sci*, *55*, 1375-1383. https://doi.org/10.3382/ps.0551375
24. Lakshminarayanan, B., Harris, H. M. B., Coakley, M., O'Sullivan, Ó., Stanton, C., Pruteanu, M., Shanahan, F., O'Toole, P. W., Ross, R. P., & On Behalf Of The Eldermet Consortium. (2013). Prevalence and characterization of Clostridium perfringens from the faecal microbiota of elderly Irish subjects. *Journal of medical microbiology*, *62*(3), 457-466. https://doi.org/10.1099/jmm.0.052258-0
25. Lee, S., La, T. M., Lee, H. J., Choi, I. S., Song, C. S., Park, S. Y., Lee, J. B., & Lee, S. W. (2019). Characterization of microbial communities in the chicken oviduct and the origin of chicken embryo gut microbiota. *Sci. Rep*, *9*, 6838. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43280-w EDN: https://elibrary.ru/KVQXQB

26. Lima, J. (2023). Estimating Microbial Protein Synthesis in the Rumen—Can 'Omics' Methods Provide New Insights into a Long-Standing Question? *Vet. Sci*, *10*.
27. Lu, C., Yan, Y., Jian, F., & Ning, C. (2021). Coccidia-microbiota interactions and their effects on the host. *Front. Cell Infect. Microbiol*, *11*, 751481. https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.751481 EDN: https://elibrary.ru/IPCEDA
28. Maruvada, P., Leone, V., Kaplan, L. M., & Chang, E. B. (2017). The Human Microbiome and Obesity: Moving beyond Associations. *Cell Host Microbe*, *22*, 589-599. https://doi.org/10.1016/j.chom.2017.10.005 EDN: https://elibrary.ru/YKKOZQ
29. McCormack, U. M., Curiao, T., Buzoianu, S. G., Prieto, M. L., Ryan, T., Varley, P., Crispie, F., Magowan, E., Metzler-Zebeli, B. U., Berry, D., O'Sullivan, O., Cotter, P. D., Gardiner, G. E., & Lawlor, P. G. (2017). Exploring a possible link between the intestinal microbiota and feed efficiency in pigs. *Appl. Environ. Microbiol*, *83*, e00380-17. https://doi.org/10.1128/AEM.00380-17
30. McDonald, J. E., Marchesi, J. R., & Koskella, B. (2020). Application of ecological and evolutionary theory to microbiome community dynamics across systems. *Proc. Biol. Sci*, *287*, 20202886. https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2886 EDN: https://elibrary.ru/ECDLLF
31. Miquel, S., Martin, R., Rossi, O., Bermudez-Humaran, L. G., Chatel, J. M., Sokol, H., Thomas, M., Wells, J. M., & Langella, P. (2013). Faecalibacterium prausnitzii and human intestinal health. *Curr. Opin. Microbiol*, *16*, 255-261. https://doi.org/10.1016/j.mib.2013.06.003
32. Moon, C. D., Young, W., Maclean, P. H., Cookson, A. L., & Bermingham, E. N. (2018). Metagenomic insights into the roles of Proteobacteria in the gastrointestinal microbiomes of healthy dogs and cats. *Microbiologyopen*, *7*(5), e00677. https://doi.org/10.1002/mbo3.677 EDN: https://elibrary.ru/CTMKJI
33. Orrell, K. E., & Melnyk, R. A. (2021). Large Clostridial Toxins: Mechanisms and Roles in Disease. *Microbiol Mol Biol Rev*, *85*(3), e0006421. https://doi.org/10.1128/MMBR.00064-21 EDN: https://elibrary.ru/IMHVYN
34. Pereira, R., Bortoluzzi, C., Durrer, A., Fagundes, N. S., Pedroso, A. A., Rafael, J. M., de Lima Perim, J. E., Zavarize, K. C., Napty, G. S., & Andreote, F. D. (2019). Performance and intestinal microbiota of chickens receiving probiotic in the feed and submitted to antibiotic therapy. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr*, *103*, 72-86. https://doi.org/10.1111/jpn.13004
35. Pires, P. G. D. S., Torres, P., Teixeira Soratto, T. A., Filho, V. B., Hauptli, L., Wagner, G., Haese, D., Pozzatti, C. D., & Moraes, P. O. (2022). Comparison of functional-oil blend and anticoccidial antibiotics effects on performance and

microbiota of broiler chickens challenged by coccidiosis. *PLoS One*, *17*(7), e0270350. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270350 EDN: https://elibrary.ru/LDTMUN

36. Rajilic-Stojanovic, M., & De Vos, W. M. (2014). The first 1000 cultured species of the human gastrointestinal microbiota. *FEMS Microbiol Rev*, *38*(5), 996-1047. https://doi.org/10.1111/1574-6976.12075
37. Robinson, K., Becker, S., Xiao, Y., Lyu, W., Yang, Q., Zhu, H., Yang, H., Zhao, J., & Zhang, G. (2019). Differential Impact of Subtherapeutic Antibiotics and Ionophores on Intestinal Microbiota of Broilers. *Microorganisms*, *7*(9), 282. https://doi.org/10.3390/microorganisms7090282
38. Saxena, S., Saxena, V. K., Tomar, S., Sapcota, D., & Gonmei, G. (2016). Characterisation of caecum and crop microbiota of Indian indigenous chicken targeting multiple hypervariable regions within 16S rRNA gene. *Brit. Poult. Sci*, *57*, 381-389. https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1161728
39. Schokker, D., de Klerk, B., Borg, R., Bossers, A., & Rebel, J. M. J. (2021). Factors Influencing the Succession of the Fecal Microbiome in Broilers. *Livest. Sci*, *247*, 104486. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104486 EDN: https://elibrary.ru/PDMHXO
40. Schönbrunn, E., Eschenburg, S., Shuttleworth, W. A., Schloss, J. V., Amrhein, N., Evans, J. N. S., & Kabsch, W. (2001). Interaction of the herbicide glyphosate with its target enzyme 5-enolpyruvylshikimate 3-phosphate synthase in atomic detail. *Proc. Natl. Acad. Sci*, *98*, 1376-1380. https://doi.org/10.1073/pnas.98.4.1376 EDN: https://elibrary.ru/LSWCXN
41. Schwartz, D. J., Langdon, A. E., & Dantas, G. (2020). Understanding the impact of antibiotic perturbation on the human microbiome. *Genome Med*, *12*, 82. https://doi.org/10.1186/s13073-020-00782-x EDN: https://elibrary.ru/AJGCKF
42. Shin, B., Park, C., & Park, W. (2020). Stress responses linked to antimicrobial resistance in Acinetobacter species. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, *104*, 1423-1435. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10317-z EDN: https://elibrary.ru/QTZXAD
43. Simpson, K. M., Callan, R. J., & Van Metre, D. C. (2018). Clostridial Abomasitis and Enteritis in Ruminants. *Vet Clin North Am Food Anim Pract*, *34*(1), 155-184. https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2017.10.010
44. Szabó, R., Szemerédy, G., Kormos, É., Lehel, J., & Budai, P. (2018). Studies on joint toxic effects of a glyphosate herbicide (FOZÁT 480) and a heavy metal (cadmium) on chicken embryos. *AGR*, *2*, 37-43.
45. Waite, D. W., & Taylor, M. W. (2014). Characterizing the avian gut microbiota: Membership, driving influences, and potential function. *Front. Microbiol*, *5*, 223. https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00223

46. Willson, N. L., Nattrass, G. S., Hughes, R. J., Moore, R. J., Stanley, D., Hynd, P. I., & Forder, R. E. A. (2018). Correlations between intestinal innate immune genes and cecal microbiota highlight potential for probiotic development for immune modulation in poultry. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, *102*, 9317-9329. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9281-1 EDN: https://elibrary.ru/VJIVQO
47. Xi, Y., Shuling, N., Kunyuan, T., Qiuyang, Z., Hewen, D., ChenCheng, G., Tianhe, Y., Liancheng, L., & Xin, F. (2019). Characteristics of the intestinal flora of specific pathogen free chickens with age. *Microb. Pathog*, *132*, 325-334. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.05.014 EDN: https://elibrary.ru/FZDTAH
48. Xu, S. Y., Aweya, J. J., Li, N., Deng, R. Y., Chen, W. Y., Tang, J., & Cheong, K. L. (2019). Microbial catabolism of porphyra haitanensis polysaccharides by human gut microbiota. *Food Chem*, *289*, 177-186. https://doi.org/10.1016/j.food-chem.2019.03.050
49. Yang, J., Li, Y., Wen, Z., Liu, W., Meng, L., & Huang, H. (2021). Oscillospira - a candidate for the next-generation probiotics. *Gut Microbes*, *13*(1), 1987783. https://doi.org/10.1080/19490976.2021.1987783 EDN: https://elibrary.ru/IDUYRW
50. Yildirim, E. A., Laptev, G. Y., Tiurina, D. G., Gorfunkel, E. P., Ilina, L. A., Filippova, V. A., Dubrovin, A. V., Brazhnik, E. A., Novikova, N. I., Melikidi, V. K., Kalitkina, K. A., Ponomareva, E. S., Griffin, D. K., & Romanov, M. N. (2024). Investigating adverse effects of chronic dietary exposure to herbicide glyphosate on zootechnical characteristics and clinical, biochemical and immunological blood parameters in broiler chickens. *Vet Res Commun*, *48*(1), 153-164. https://doi.org/10.1007/s11259-023-10195-x EDN: https://elibrary.ru/PUTFZG
51. Zhang, J., Jin, W., Jiang, Y., Xie, F., & Mao, S. (2022). Response of milk performance, rumen and hindgut microbiome to dietary supplementation with Aspergillus oryzae fermentation extracts in dairy cows. *Curr. Microbiol*, *79*, 113.
52. Zhang, K., Wang, C., Li, Y., He, J., Wang, M., & Wang, X. (2020). Rat two-generation reproductive toxicity and teratogenicity studies of a novel coccidiostat - Ethanamizuril. *Regul. Toxicol. Pharmacol*, *113*, 104623. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104623 EDN: https://elibrary.ru/BUZXEZ
53. Zhang, Z., Tang, H., Chen, P., Xie, H., & Tao, Y. (2019). Demystifying the manipulation of host immunity, metabolism, and extraintestinal tumors by the gut microbiome. *Signal Transduct. Target. Ther*, *4*, 41. https://doi.org/10.1038/s41392-019-0074-5 EDN: https://elibrary.ru/FJSSIY
54. Zheng, D., Liwinski, T., & Elinav, E. (2020). Interaction between microbiota and immunity in health and disease. *Cell Res*, *30*, 492-506. https://doi.org/10.1038/s41422-020-0332-7 EDN: https://elibrary.ru/POIHUF

55. Zhou, S., Wang, F., Wong, E. T., Fonkem, E., Hsieh, T. C., Wu, J. M., & Wu, E. (2013). Salinomycin: a novel anti-cancer agent with known anti-coccidial activities. *Current medicinal chemistry*, *20*(33), 4095-4101. https://doi.org/10.2174/15672050113109990199

References

1. Egorov, I. A., Manukyan, V. A., & Lankova, T. N. (2013). *Methodology for conducting scientific and production research on feeding poultry. Molecular genetic methods for determining intestinal microflora*. Sergiev Posad: Vsyo Sergiev Posad. 51 p. ISBN: 978-5-91582-047-9 EDN: https://elibrary.ru/SDOKYP
2. Yildyrym, E. A., Grozina, A. A., Vertiprakhov, V. G., Ilyina, L. A., Filippova, V. A., Laptev, G. Yu., Ponomareva, E. S., Dubrovin, A. V., Kalitkina, K. A., Molotkov, V. V., Akhmatchin, D. A., Brazhnik, E. A., Novikova, N. I., & Tyurina, D. G. (2022). Composition and metabolic potential of the gut microbiome of broilers Gallus Gallus L. under the influence of feed additives in experimental T-2 toxinosis. *Agricultural Biology*, *57(4)*, 743-761. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.4.743rus EDN: https://elibrary.ru/DRKMVH
3. Laptev, G. Yu., Yildyrym, E. A., Tyurina, D. G., Ilyina, L. A., Filippova, V. A., Kalitkina, K. A., Dubrovin, A. V., Novikova, N. I., Melikidi, V. Kh., Gorfunkel, E. P., Ponomareva, E. S., & Okolelova, T. M. (2022). Is glyphosate really harmless? *Compound Feed*, *7-8*, 69-70. EDN: https://elibrary.ru/XJFXLL
4. Binek, M., Cisek, A. A., Rzewuska, M., Chrobak-Chmiel, D., Stefanska, I., Kizerwetter-Swida, M. (2017). Chicken intestinal microbiome: Development and function. *Med. Weter*, *73*, 618-625. https://doi.org/10.21521/mw.5790
5. Bortoluzzi, C., Scapini, L. B., Ribeiro, M. V., Pivetta, M. R., Buzim, R., Fernandes, J. I. M. (2019). Effects of β-mannanase supplementation on the intestinal microbiota composition of broiler chickens challenged with a coccidiosis vaccine. *Livestock Science*, *228*, 187-194.
6. Bortoluzzi, C., Tamburini, I., Geremia, J. (2023). Microbiome modulation, microbiome protein metabolism index, and growth performance of broilers supplemented with a precision biotic. *Poult Sci*, *102*(5), 102595. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102595 EDN: https://elibrary.ru/TFMWKJ
7. Chen, H. L., Zhao, X. Y., Zhao, G. X., Huang, H. B., Li, H. R., Shi, C. W., Yang, W. T., Jiang, Y. L., Wang, J. Z., Ye, L. P., Zhao, Q., Wang, C. F., Yang, G. L. (2020). Dissection of the cecal microbial community in chickens after Eimeria tenella infection. *Parasites and Vectors*, *13*, 1-15. https://doi.org/10.1186/s13071-020-3897-6 EDN: https://elibrary.ru/KLVQIE

8. Cheng, X., Zheng, H., Wang, C., Wang, X., Fei, C., Zhou, W., & Zhang, K. (2022). Effects of salinomycin and ethanamizuril on the three microbial communities in vivo and in vitro. *Front Microbiol*, *13*, 941259. https://doi.org/10.3389/fmi-cb.2022.941259 EDN: https://elibrary.ru/LYZGAW
9. Chernevskaya, E., Beloborodova, N., Klimenko, N., Pautova, A., Shilkin, D., Gusarov, V., & Tyakht, A. (2020). Serum and fecal profiles of aromatic microbial metabolites reflect gut microbiota disruption in critically ill patients: a prospective observational pilot study. *Crit. Care*, *24*, 312. https://doi.org/10.1186/s-13054-020-03031-0 EDN: https://elibrary.ru/OVJQNC
10. Chuang, W. Y., Lin, L. J., Shih, H. Der, Shy, Y. M., Chang, S. C., & Lee, T. T. (2021). Intestinal Microbiota, Anti-Inflammatory, and Anti-Oxidative Status of Broiler Chickens Fed Diets Containing Mushroom Waste Compost By-Products. *Animals*, *11*, 2550. https://doi.org/10.3390/ani11092550 EDN: https://elibrary.ru/JLMNFW
11. Collins, S. L., & Patterson, A. D. (2020). The gut microbiome: an orchestrator of xenobiotic metabolism. *Acta Pharm Sin B*, *10*(1), 19-32. https://doi.org/10.1016/j.apsb.2019.12.001 EDN: https://elibrary.ru/NRUGNV
12. Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., & Séralini, G. E. (2017). Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicol Rep*, *5*, 156-163. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025 EDN: https://elibrary.ru/VFCTZO
13. El, A. G., Mohsen, H., & Mohamed, S. S. (2012). Effect of Feeding a Combination of Zinc, Manganese and Copper Methionine Chelates of Early Lactation High Producing Dairy Cow. *Food and Nutrition Sciences*, 1084-1091. https://doi.org/10.4236/FNS.2012.38144
14. Fathi, M. A., Abdelghani, E., Shen, D., Ren, X., Dai, P., Li, Z., Tang, Q., Li, Y., & Li, C. (2019). Effect of in ovo glyphosate injection on embryonic development, serum biochemistry, antioxidant status and histopathological changes in newly hatched chicks. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr*, *103*, 1776-1784. https://doi.org/10.1111/jpn.13181
15. Fathi, M. A., Han, G., Kang, R., Shen, D., Shen, J., & Li, C. (2020). Disruption of cytochrome P450 enzymes in the liver and small intestine in chicken embryos in ovo exposed to glyphosate. *Environ. Sci*, *27*, 16865-16875. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08269-3 EDN: https://elibrary.ru/CBTYZL
16. Frick, P. G., Riedler, G., & Brögli, H. (1967). Dose response and minimal daily requirement for vitamin K in man. *J Appl Physiol*, *23*, 387-389. https://doi.org/10.1152/jappl.1967.23.3.387
17. Grau, D., Grau, N., Gascuel, Q., Paroissin, C., Stratonovitch, C., Lairon, D., Devault, D. A., & Di Cristofaro, J. (2022). Quantifiable urine glyphosate levels

detected in 99% of the French population, with higher values in men, in younger people, and in farmers. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*, *29*, 32882-32893. https://doi.org/10.1007/s11356-021-18110-0 EDN: https://elibrary.ru/DJWFDU

18. Gustafsson, B. E., Daft, F. S., McDaniel, E. G., Smith, J. C., & Fitzgerald, R. J. (1962). Effects of vitamin K-active compounds and intestinal microorganisms in vitamin K-deficient germfree rats. *The Journal of Nutrition*, *78*, 461-468. https://doi.org/10.1093/jn/78.4.461
19. Hill, J. H., & Round, J. L. (2021). SnapShot: Microbiota effects on host physiology. *Cell*, *184*, 2796-2796. https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.04.026 EDN: https://elibrary.ru/DMSPLA
20. Hill, M. J. (1997). Intestinal flora and endogenous vitamin synthesis. *European Journal of Cancer Prevention*, *6*, S43-S45. https://doi.org/10.1097/00008469-199703001-00009
21. Holmes, E., Li, J. V., Marchesi, J. R., & Nicholson, J. K. (2012). Gut microbiota composition and activity in relation to host metabolic phenotype and disease risk. *Cell Metab*, *16*(5), 559-564. https://doi.org/10.1016/j.cmet.2012.10.007
22. Huang, S., Zhang, C., Xu, T., Shaukat, A., He, Y., Chen, P., Lin, L., Yue, K., Cao, Q., & Tong, X. (2022). Integrated Fecal Microbiome and Metabolomics Reveals a Novel Potential Biomarker for Predicting Tibial Dyschondroplasia in Chickens. *Front Physiol*, *13*, 887207. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.887207 EDN: https://elibrary.ru/HYQFGK
23. Kimura, N., Mimura, F., Nishida, S., & Kobayashi, A. (1976). Studies on the relationship between intestinal flora and cecal coccidiosis in chicken. *Poult. Sci*, *55*, 1375-1383. https://doi.org/10.3382/ps.0551375
24. Lakshminarayanan, B., Harris, H. M. B., Coakley, M., O'Sullivan, Ó., Stanton, C., Pruteanu, M., Shanahan, F., O'Toole, P. W., Ross, R. P., & On Behalf Of The Eldermet Consortium. (2013). Prevalence and characterization of Clostridium perfringens from the faecal microbiota of elderly Irish subjects. *Journal of medical microbiology*, *62*(3), 457-466. https://doi.org/10.1099/jmm.0.052258-0
25. Lee, S., La, T. M., Lee, H. J., Choi, I. S., Song, C. S., Park, S. Y., Lee, J. B., & Lee, S. W. (2019). Characterization of microbial communities in the chicken oviduct and the origin of chicken embryo gut microbiota. *Sci. Rep*, *9*, 6838. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43280-w EDN: https://elibrary.ru/KVQXQB
26. Lima, J. (2023). Estimating Microbial Protein Synthesis in the Rumen—Can 'Omics' Methods Provide New Insights into a Long-Standing Question? *Vet. Sci*, *10*.
27. Lu, C., Yan, Y., Jian, F., & Ning, C. (2021). Coccidia-microbiota interactions and their effects on the host. *Front. Cell Infect. Microbiol*, *11*, 751481. https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.751481 EDN: https://elibrary.ru/IPCEDA

28. Maruvada, P., Leone, V., Kaplan, L. M., & Chang, E. B. (2017). The Human Microbiome and Obesity: Moving beyond Associations. *Cell Host Microbe*, *22*, 589-599. https://doi.org/10.1016/j.chom.2017.10.005 EDN: https://elibrary.ru/YKKOZQ
29. McCormack, U. M., Curiao, T., Buzoianu, S. G., Prieto, M. L., Ryan, T., Varley, P., Crispie, F., Magowan, E., Metzler-Zebeli, B. U., Berry, D., O'Sullivan, O., Cotter, P. D., Gardiner, G. E., & Lawlor, P. G. (2017). Exploring a possible link between the intestinal microbiota and feed efficiency in pigs. *Appl. Environ. Microbiol*, *83*, e00380-17. https://doi.org/10.1128/AEM.00380-17
30. McDonald, J. E., Marchesi, J. R., & Koskella, B. (2020). Application of ecological and evolutionary theory to microbiome community dynamics across systems. *Proc. Biol. Sci*, *287*, 20202886. https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2886 EDN: https://elibrary.ru/ECDLLF
31. Miquel, S., Martin, R., Rossi, O., Bermudez-Humaran, L. G., Chatel, J. M., Sokol, H., Thomas, M., Wells, J. M., & Langella, P. (2013). Faecalibacterium prausnitzii and human intestinal health. *Curr. Opin. Microbiol*, *16*, 255-261. https://doi.org/10.1016/j.mib.2013.06.003
32. Moon, C. D., Young, W., Maclean, P. H., Cookson, A. L., & Bermingham, E. N. (2018). Metagenomic insights into the roles of Proteobacteria in the gastrointestinal microbiomes of healthy dogs and cats. *Microbiologyopen*, *7*(5), e00677. https://doi.org/10.1002/mbo3.677 EDN: https://elibrary.ru/CTMKJI
33. Orrell, K. E., & Melnyk, R. A. (2021). Large Clostridial Toxins: Mechanisms and Roles in Disease. *Microbiol Mol Biol Rev*, *85*(3), e0006421. https://doi.org/10.1128/MMBR.00064-21 EDN: https://elibrary.ru/IMHVYN
34. Pereira, R., Bortoluzzi, C., Durrer, A., Fagundes, N. S., Pedroso, A. A., Rafael, J. M., de Lima Perim, J. E., Zavarize, K. C., Napty, G. S., & Andreote, F. D. (2019). Performance and intestinal microbiota of chickens receiving probiotic in the feed and submitted to antibiotic therapy. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr*, *103*, 72-86. https://doi.org/10.1111/jpn.13004
35. Pires, P. G. D. S., Torres, P., Teixeira Soratto, T. A., Filho, V. B., Hauptli, L., Wagner, G., Haese, D., Pozzatti, C. D., & Moraes, P. O. (2022). Comparison of functional-oil blend and anticoccidial antibiotics effects on performance and microbiota of broiler chickens challenged by coccidiosis. *PLoS One*, *17*(7), e0270350. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270350 EDN: https://elibrary.ru/LDTMUN
36. Rajilic-Stojanovic, M., & De Vos, W. M. (2014). The first 1000 cultured species of the human gastrointestinal microbiota. *FEMS Microbiol Rev*, *38*(5), 996-1047. https://doi.org/10.1111/1574-6976.12075

37. Robinson, K., Becker, S., Xiao, Y., Lyu, W., Yang, Q., Zhu, H., Yang, H., Zhao, J., & Zhang, G. (2019). Differential Impact of Subtherapeutic Antibiotics and Ionophores on Intestinal Microbiota of Broilers. *Microorganisms*, *7*(9), 282. https://doi.org/10.3390/microorganisms7090282
38. Saxena, S., Saxena, V. K., Tomar, S., Sapcota, D., & Gonmei, G. (2016). Characterisation of caecum and crop microbiota of Indian indigenous chicken targeting multiple hypervariable regions within 16S rRNA gene. *Brit. Poult. Sci*, *57*, 381-389. https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1161728
39. Schokker, D., de Klerk, B., Borg, R., Bossers, A., & Rebel, J. M. J. (2021). Factors Influencing the Succession of the Fecal Microbiome in Broilers. *Livest. Sci*, *247*, 104486. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104486 EDN: https://elibrary.ru/PDMHXO
40. Schönbrunn, E., Eschenburg, S., Shuttleworth, W. A., Schloss, J. V., Amrhein, N., Evans, J. N. S., & Kabsch, W. (2001). Interaction of the herbicide glyphosate with its target enzyme 5-enolpyruvylshikimate 3-phosphate synthase in atomic detail. *Proc. Natl. Acad. Sci*, *98*, 1376-1380. https://doi.org/10.1073/pnas.98.4.1376 EDN: https://elibrary.ru/LSWCXN
41. Schwartz, D. J., Langdon, A. E., & Dantas, G. (2020). Understanding the impact of antibiotic perturbation on the human microbiome. *Genome Med*, *12*, 82. https://doi.org/10.1186/s13073-020-00782-x EDN: https://elibrary.ru/AJGCKF
42. Shin, B., Park, C., & Park, W. (2020). Stress responses linked to antimicrobial resistance in Acinetobacter species. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, *104*, 1423-1435. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10317-z EDN: https://elibrary.ru/QTZXAD
43. Simpson, K. M., Callan, R. J., & Van Metre, D. C. (2018). Clostridial Abomasitis and Enteritis in Ruminants. *Vet Clin North Am Food Anim Pract*, *34*(1), 155-184. https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2017.10.010
44. Szabó, R., Szemerédy, G., Kormos, É., Lehel, J., & Budai, P. (2018). Studies on joint toxic effects of a glyphosate herbicide (FOZÁT 480) and a heavy metal (cadmium) on chicken embryos. *AGR*, *2*, 37-43.
45. Waite, D. W., & Taylor, M. W. (2014). Characterizing the avian gut microbiota: Membership, driving influences, and potential function. *Front. Microbiol*, *5*, 223. https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00223
46. Willson, N. L., Nattrass, G. S., Hughes, R. J., Moore, R. J., Stanley, D., Hynd, P. I., & Forder, R. E. A. (2018). Correlations between intestinal innate immune genes and cecal microbiota highlight potential for probiotic development for immune modulation in poultry. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, *102*, 9317-9329. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9281-1 EDN: https://elibrary.ru/VJIVQO

47. Xi, Y., Shuling, N., Kunyuan, T., Qiuyang, Z., Hewen, D., ChenCheng, G., Tianhe, Y., Liancheng, L., & Xin, F. (2019). Characteristics of the intestinal flora of specific pathogen free chickens with age. *Microb. Pathog*, *132*, 325-334. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.05.014 EDN: https://elibrary.ru/FZDTAH
48. Xu, S. Y., Aweya, J. J., Li, N., Deng, R. Y., Chen, W. Y., Tang, J., & Cheong, K. L. (2019). Microbial catabolism of porphyra haitanensis polysaccharides by human gut microbiota. *Food Chem*, *289*, 177-186. https://doi.org/10.1016/j.food-chem.2019.03.050
49. Yang, J., Li, Y., Wen, Z., Liu, W., Meng, L., & Huang, H. (2021). Oscillospira - a candidate for the next-generation probiotics. *Gut Microbes*, *13*(1), 1987783. https://doi.org/10.1080/19490976.2021.1987783 EDN: https://elibrary.ru/IDUYRW
50. Yildirim, E. A., Laptev, G. Y., Tiurina, D. G., Gorfunkel, E. P., Ilina, L. A., Filippova, V. A., Dubrovin, A. V., Brazhnik, E. A., Novikova, N. I., Melikidi, V. K., Kalitkina, K. A., Ponomareva, E. S., Griffin, D. K., & Romanov, M. N. (2024). Investigating adverse effects of chronic dietary exposure to herbicide glyphosate on zootechnical characteristics and clinical, biochemical and immunological blood parameters in broiler chickens. *Vet Res Commun*, *48*(1), 153-164. https://doi.org/10.1007/s11259-023-10195-x EDN: https://elibrary.ru/PUTFZG
51. Zhang, J., Jin, W., Jiang, Y., Xie, F., & Mao, S. (2022). Response of milk performance, rumen and hindgut microbiome to dietary supplementation with Aspergillus oryzae fermentation extracts in dairy cows. *Curr. Microbiol*, *79*, 113.
52. Zhang, K., Wang, C., Li, Y., He, J., Wang, M., & Wang, X. (2020). Rat two-generation reproductive toxicity and teratogenicity studies of a novel coccidiostat - Ethanamizuril. *Regul. Toxicol. Pharmacol*, *113*, 104623. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104623 EDN: https://elibrary.ru/BUZXEZ
53. Zhang, Z., Tang, H., Chen, P., Xie, H., & Tao, Y. (2019). Demystifying the manipulation of host immunity, metabolism, and extraintestinal tumors by the gut microbiome. *Signal Transduct. Target. Ther*, *4*, 41. https://doi.org/10.1038/s41392-019-0074-5 EDN: https://elibrary.ru/FJSSIY
54. Zheng, D., Liwinski, T., & Elinav, E. (2020). Interaction between microbiota and immunity in health and disease. *Cell Res*, *30*, 492-506. https://doi.org/10.1038/s41422-020-0332-7 EDN: https://elibrary.ru/POIHUF
55. Zhou, S., Wang, F., Wong, E. T., Fonkem, E., Hsieh, T. C., Wu, J. M., & Wu, E. (2013). Salinomycin: a novel anti-cancer agent with known anti-coccidial activities. *Current medicinal chemistry*, *20*(33), 4095-4101. https://doi.org/10.2174/15672050113109990199

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Тюрина Дарья Геогриевна, кандидат экономических наук, главный биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
tiurina@biotrof.ru

Йылдырым Елена Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства; главный биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
deniz@biotrof.ru

Лаптев Георгий Юрьевич, доктор биологических наук, директор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
georg-laptev@rambler.ru

Новикова Наталья Ивановна, кандидат биологических наук, первый заместитель директора
Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
novikova@biotrof.ru

Ильина Лариса Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства; начальник молекулярно-генетической лаборатории
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
ilina@biotrof.ru

Филиппова Валентина Анатольевна, старший преподаватель кафедры крупного животноводства, старший биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
filippova@biotrof.ru

Дубровин Андрей Валерьевич, кандидат ветеринарных наук, биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
dubrovin@biotrof.ru

Калиткина Ксения Андреевна, ассистент кафедры крупного животноводства, биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
kalitkina.xeniya@gmail.com

Пономарева Екатерина Сергеевна, биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
kate@biotrof.ru

Ключникова Ирина Александровна, магистр, биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
Петербургское шоссе 2, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196601, Российская Федерация; ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
klyuchnikova.irinaa@yandex.ru

Заикин Василий Александрович, биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории
Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»
ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
dfcx@biotrof.ru

Горфункель Елена Павловна, контролер по качеству
Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»

ул. Малиновская, 8 лит. А, пом. 7-Н, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, 196602, Российская Федерация
elena@biotrof.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Daria G. Tyurina, Candidate of Economic Sciences, Deputy Director for Finance, Chief Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory
BIOTROF Limited Liability Company
8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
tiurina@biotrof.ru
SPIN-code: 9917-5118
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9001-2432
Scopus author ID: 57219196023

Elena A. Yildirim, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large Livestock, Chief Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory
St. Petersburg State Agrarian University; BIOTROF Limited Liability Company
building 2, Peterburgskoe highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation; 8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
deniz@biotrof.ru
SPIN-code: 4479-7509
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5846-5105
Researcher ID: C-3770-2014
Scopus author ID: 57059948100

Georgy Y. Laptev, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large Livestock, director
St. Petersburg State Agrarian University; BIOTROF Limited Liability Company
building 2, Peterburgskoe highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation; 8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
georg-laptev@rambler.ru
SPIN-code: 3600-5295

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8795-6659
Researcher ID: A-9395-2019
Scopus author ID: 54414368800

Natalia I. Novikova, Candidate of Biological Sciences, First Deputy Director
BIOTROF Limited Liability Company
8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
novikova@biotrof.ru

Larisa A. Ilyina, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large Livestock, Chief of the Molecular Genetics Laboratory
St. Petersburg State Agrarian University; BIOTROF Limited Liability Company
building 2, Peterburgskoe highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation; 8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
ilina@biotrof.ru
SPIN-code: 5826-7525
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2789-4844
Researcher ID: C-3772-2014
Scopus author ID: 57060452100

Valentina A. Filippova, Senior Lecturer at the Department of Large Livestock, Senior Biotechnologist at the Molecular Genetics Laboratory
St. Petersburg State Agrarian University; BIOTROF Limited Liability Company
building 2, Peterburgskoe highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation; 8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
filippova@biotrof.ru
SPIN-code: 4398-5340
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8789-9837
Researcher ID: AAE-2402-2022
Scopus author ID: 57060101800

Andrey V. Dubrovin, Candidate of Veterinary Sciences, Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory

BIOTROF Limited Liability Company
8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
dubrovin@biotrof.ru

Kseniya A. Kalitkina, Assistant of the Department of Large Livestock, Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory
St. Petersburg State Agrarian University; BIOTROF Limited Liability Company
building 2, Peterburgskoe highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation; 8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
kalitkina.xeniya@gmail.com
SPIN-code: 7893-2670
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9541-6839
Researcher ID: ADD-4706-2022
Scopus author ID: 57280455100

Ekaterina S. Ponomareva, Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory
BIOTROF Limited Liability Company
8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
kate@biotrof.ru
SPIN-code: 4260-6755
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4336-8273
Researcher ID: AGB-6728-2022
Scopus author ID: 57262828600

Irina A. Klyuchnikova, master's student, Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory
St. Petersburg State Agrarian University; BIOTROF Limited Liability Company
building 2, Peterburgskoe highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation; 8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
klyuchnikova.irinaa@yandex.ru
SPIN-code: 8822-5738
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6484-1235

Vasiliy A. Zaikin, Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory
BIOTROF Limited Liability Company
8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
dfcx@biotrof.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8029-9955

Elena P. Gorfunkel, Quality controller
BIOTROF Limited Liability Company
8, Malinovskaya Str., St. Petersburg, Pushkin, 196602, Russian Federation
elena@biotrof.ru
SPIN-code: 2958-6204
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6843-8733

Поступила 05.08.2024
После рецензирования 03.09.2024
Принята 24.09.2024

Received 05.08.2024
Revised 03.09.2024
Accepted 24.09.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1121 **EDN: PJYJXI**
УДК 577.151+579.66+ 579.258

CC BY NC ND

Научная статья

«PROBABLE ACETYLTRANSFERASE» TTHA1209 БАКТЕРИИ *THERMUS THERMOPHILUS*: КЛОНИРОВАНИЕ ГЕНА, СТРУКТУРНЫЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЕРМЕНТА

Т.А. Кудряшов, Е.В. Локтюшов, М.В. Трунилина, В.В. Быков, А.С. Соколов, Ю.С. Лаптева

Аннотация

Обоснование. За последнюю декаду N-ацетилтрансферазы (АТ) бактерий стали объектами интенсивного изучения, поскольку участвуют в биосинтезе/инактивации антибиотиков; образуют систему «токсин-антитоксин»; а статус ацетилирования белков и пептидов оказывает влияние на их вирулентность и патогенность. Ферменты АТ обладают низким процентом идентичности аминокислотных последовательностей, что затрудняет их идентификацию и аннотацию в геномах. В этой связи **цель данной работы** заключалась в структурном и функциональном анализе новой «предполагаемой» ацетилтрансферазы («probable acetyltransferase»), кодируемой открытой рамкой считывания (ОРС) *TTHA1209* бактерии *T. thermophilus*.

Материалы и методы. Структурный анализ фермента проводили методами биоинформатики. Для клонирования ОРС *TTHA1209* использовали методы генной инженерии. Для очистки белка применяли аффинную хроматографию. Проверку активности белка проводили в реакции *in vitro* ацетилирования модельного белка парвальбумина (ПА). Оценку включения ацетильной группы на N-конец парвальбумина проводили при помощи масс-спектрометрии.

Результаты. Установлено, что TTHA1209 содержит в своей структуре единственный GNAT-домен и обладает характерным для N-концевых АТ (NAT) чередованием элементов вторичных структур и трёхмерной укладкой. Исследовано сходство структуры фермента TTHA1209 с белками-ортологами из *E.coli*. Наибольший процент идентичности TTHA1209 наблюдается с ферментом RimI (27%). Показано, что фермент TTHA1209 ацетилирует парвальбумин, т.е. проявляет специфическую Nα-ацетилтрансферазную активность.

Заключение. Новый фермент TTHA1209 бактерии *T. thermophilus* на всех уровнях организации проявляет свойства, характерные для NAT, обладает специфической активностью, и может быть аннотирован в геноме как N-концевая ацетилтрансфераза. Полученные результаты создают предпосылки для дальнейшего исследования субстратной специфичности и биохимических свойств новой NAT TTHA1209, что откроет перспективы его использования в биотехнологии для ацетилирования белков и пептидов.

Ключевые слова: N-концевые ацетилтрансферазы; GNAT-токсин; микроцин С; антибиотикорезистентность; спермидин; серотонин

Для цитирования. Кудряшов, Т. А., Локтюшов, Е. В., Трунилина, М. В., Быков, В. В., Соколов, А. С., & Лаптева, Ю. С. (2025). «Probable acetyltransferase» TTHA1209 бактерии *Thermus thermophilus*: клонирование гена, структурный и функциональный анализ фермента. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 295-314. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1121

Original article

"PROBABLE ACETYLTRANSFERASE" TTHA1209 *THERMUS THERMOPHILUS* BACTERIA: GENE CLONING, STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF THE ENZYME

T.A. Kudryashov, E.V. Loktyushov, M.V. Trunilina, V.V. Bykov, A.S. Sokolov, Yu.S. Lapteva

Abstract

Background. In the last decade, bacterial N-acetyltransferases (ATs) have been intensively studied because they are involved in the biosynthesis/inactivation of antibiotics, form the "toxin-antitoxin" system and the acetylation status of proteins and peptides influences their virulence and pathogenicity. AT enzymes have a low percentage of amino acid sequence identity, which complicates their identification and annotation in genomes. In this regard, **the aim of this work** was the structural and functional analysis of a new "probable" acetyltransferase encoded by the open reading frame (ORF) *TTHA1209* of the bacterium *T. thermophilus.*

Materials and methods. Structural analysis of the enzyme was carried out using bioinformatics methods. Genetic engineering methods were used to clone the TTHA1209 gene. Affinity chromatography was used to purify the protein. The protein activity was tested in an *in vitro* reaction of acetylation of the model protein

parvalbumin (PA). The incorporation of an acetyl group at the N-terminus of PA was evaluated by mass spectrometry.

Results. It was found that TTHA1209 share single GNAT domain in its structure and exhibits the alternation of secondary structure elements and three-dimensional folding characteristic of N-terminal At (NAT). The similarity of the structure of the TTHA1209 enzyme with orthologous proteins from *E. coli* was investigated. The highest percentage identity of TTHA1209 is observed with the RimI enzyme (27%). It has been shown that the TTHA1209 enzyme acetylates parvalbumin, i.e. has a specific Nα-acetyltransferase activity.

Conclusion. The new enzyme TTHA1209 from the bacterium *T. thermophilus* exhibits properties characteristic of NAT at all levels of organization, has a specific activity and can be annotated in the genome as an N-terminal acetyltransferase. The results obtained create the prerequisites for further investigation of the substrate specificity and biochemical properties of the new NAT TTHA1209, which will open up prospects for its use in biotechnology for the acetylation of proteins and peptides.

Keywords: N-terminal acetyltransferases; GNAT-toxin; microcin C; antibiotic resistance; spermidine; serotonin

For citation. Kudryashov, T. A., Loktyushov, E. V., Trunilina, M. V., Bykov, V. V., Sokolov, A. S., & Lapteva, Yu. S. (2025). “Probable acetyltransferase” TTHA1209 Thermus thermophilus bacteria: Gene cloning, structural and functional analysis of the enzyme. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 295-314. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1121

Введение

N-концевые ацетилтрансферазы (NAT) – внутриклеточные ферменты, которые катализируют перенос ацетильной группы от ацетил-коэнзима А на Nα-аминогруппу различных субстратов [10]. Nα-ацетилирование (Nα-Ац) затрагивает до 28% протеома бактерий и архей. За последнюю декаду NAT бактерий стали объектами интенсивного изучения, ввиду их вовлеченности в различные клеточные процессы [12; 25; 32]. Ферменты NAT участвуют как в биосинтезе, так и инактивации антибиотиков [13; 15], N-ацетилирование полиаминов (спермин, кадаверин, путресцин) является начальной стадией их деградации [18], Nα-ацетилирование белков (в том числе факторов патогенности) и пептидов (в том числе антимикробных) оказывает влияние на их активность, структуру и функции [7; 8; 20; 22]. NAT бактерий рассматривают в качестве ферментов, вовлеченных в адаптацию бактерий к экстремальным условиям обитания [29]. Ферменты NAT *E.coli* находят применение в биотехнологии и лабораторной практике для

направленного Nα-ацетилирования рекомбинантных белков и пептидов [11; 17; 30].

Геномы бактерий содержат до 72 открытых рамок считывания (ОРС), предположительно кодирующих различные ацетилтрансферазы (АТ), однако функция большинства из них не подтверждена. Так, например, из 29 ОРС АТ бактерии *E.coli* функция восьми АТ не установлена [3]. Наиболее изученными на сегодняшний день NAT из *E.coli* являются RimJ, RimL и RimI.

Фермент RimJ *E.coli* участвует в ацетилировании белков преимущественно с Ser и Thr, реже с Ala на N-конце [1; 32]. Помимо ацетилирования белков RimJ участвует в сборке рибосомы, а также выступает в качестве транскрипционного регулятора *pap*-оперона в уропатогенных штаммах *E. coli* [1; 2; 31; 36; 37].

Для фермента RimL предпочтительнее белки с Ser N-конце, тогда как замена Ser на Ala приводит к снижению эффективности ацетилирования белка на 25-50% [21; 34]. Помимо ацетилирования белков, RimL *E. coli* участвует в ацетилировании микроцина С, что обеспечивает клеткам устойчивость к последнему [15].

RimI в *E.coli* специфично ацетилирует N-концевой Ala рибосомального белка S18 [38], N-концевой Ser фактора элонгации Tu [29], серотонин и 5-метокситриптамин [19]. Работы последних лет показывают, что фермент RimI *E. coli* участвует в ацетилировании боковых лизинов, т.е. является лизин-ацетитрансферазой (KAT) (KAT) [6; 29; 33; 38]. Фермент RimI из *M. tuberculosis* проявляет широкую субстратную специфичность, схожую с эукариотическими NatA, NatC, and NatE [26]. Мутанты по *rimI* в *M. smegmatis* проявляют в 16 раз повышенную устойчивость к антибиотику изониазиду [25].

Ферменты NAT относятся к суперсемейству GNAT-ацетилтрансфераз (GNAT-AT). GNAT-AT представляют собой белки, характеризующиеся низкой идентичностью аминокислотных последовательностей, но высоко консервативной пространственной укладкой элементов вторичных структур (GNAT-fold). GNAT-укладка организована из 4 альфа-спиралей и 7 β-листов следующим образом β0-β1-α1-α2-β2-β3-β4-α3-β5-α4-β6. Активный сайт ферментов имеет V-образную конфигурацию, образованную двумя параллельными складками β4-β5. За связывание ацетил-КоА отвечает консервативный мотив, называемый «P-петлей», который состоит из шести аминокислот, амиды которых образуют водородные связи с атомами кислорода фосфата ацетил-КоА. Мотив имеет вид Q/R-*X*-*X*-G-*X*-G/A и локализован в петле между β4-складкой и α3-спиралью [35].

GNAT-AT могут содержать только GNAT-домен (N-концевые AT и лизин-AT); могут содержать более чем один GNAT-домен (аминогликозид-AT) [5], а также ряд других доменов [9]. Архитектура GNAT-домена может несколько меняться от фермента к ферменту, обеспечивая тем самым то великое разнообразие субстратов, подвергающихся ацетилированию [4]. На сегодняшний день, однако, нет четкого понимания молекулярных основ субстратной специфичности и возможности предсказания активности фермента на основании его последовательности или структуры.

Ранее нами были разработаны критерии идентификации NAT в геномах, что позволило выявить в геноме бактерии *T. thermophilus* HB8 шесть «предполагаемых» NAT из 14 аннотированных «ацетилтрансфераз» [16]. Для одной из них, а именно продукта гена *TTHA1209,* решена кристаллическая структура (https://doi.org/10.2210/pdb2CY2/pdb), на основании которой белок и был аннотирован как «probable acetyltransferases». Однако отсутствуют данные о возможной функциональной активности фермента и его дальнейшей классификации.

Цель данного исследования заключалась в анализе структурной организации фермента TTHA1209 и подтверждении его Nα-ацетилтрансферазной активности.

Материалы и методы

Штаммы бактерий, плазмиды и условия культивирования. В качестве источника гена *TTHA1209* использовали геномную ДНК бактерии *T. thermophilus* HB8 Всероссийской коллекции микроорганизмов (ВКМ B-1605). *T. thermophilus* выращивали при 60°C при интенсивной аэрации со скоростью 180 об/мин в шейкере-инкубаторе или на чашках со средой Thermus ruber (5,0 г пептона, 1,0 г дрожжевого экстракта, 1,0 г крахмала), агаризованной 1,2% бакто-агаром в течение 16 часов. Геномную ДНК *T. thermophilus* HB8 (идентификатор генома GenBank: AP008226.1 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/AP008226.1) получали при помощи коммерческого набора для выделения геномной ДНК (Евроген).

Штаммы *E.coli* E.cloni (F-mcrA Δ(mrr-hsdRMS-mcrBC) endA1 recA1 Φ80dlacZΔM15 ΔlacX74 araD139 Δ(ara,leu)7697 galU galK rpsL nupG λ-tonA (StrR)) и BL21(DE3) (fhuA2 [lon] ompT gal (λ DE3) [dcm] ΔhsdS λ DE3 = λ sBamHIo ΔEcoRI-B int::(lacI::PlacUV5::T7 ген1) i21 Δnin5) использовали в качестве хозяев для генетических манипуляций с плазмидами и для сверхэкспрессии белка, соответственно. Штаммы *E. coli* выращивали при 37°C в среде LB с добавлением канамицина (25 мг/л) для селекции в течение 16 часов.

Плазмиду pET-29 использовали для клонирования и экспрессии в *E.coli* BL21(DE3) ОРС *TTHA1209 T. thermophilus*.

Биоинформатический анализ TTHA1209. Анализ аминокислотной последовательности с целью определения параметров белка TTHA1209 (изо-электрическая точка, молекулярный вес и прочее) проводили при помощи программы ProtParam https://www.protparam.net/index.html. Множественное выравнивание аминокислотной последовательности TTHA1209 с белками-ортологами из других микроорганизмов осуществляли при помощи программы Clustal Omega (www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalo/).

Клонирование гена TTHA1209. Ген *TTHA1209* (идентификатор гена NCBI: 3169039) был амплифицирован из геномной ДНК *T. thermophilus* с помощью ПЦР с использованием праймеров 5-T AAGGGTAACATATG GTGCGGATCCGTAGGGC-3 и 5- TTTATTCTCGAGCCACTTATGCCCC CCTAGGTC-3 на приборе MJ Mini thermal cycler (Bio-Rad Laboratories, Inc.,США). Ген был клонирован под контроль промотора фага T7 в вектор pET-29 между сайтами рестрикции *Nde*I и *Xho*I. Нуклеотидные последовательности плазмид подтверждали рестрикционным анализом и автоматическим секвенированием ДНК вставок. Полученная плазмида pET-1209 кодирует белок (предположительно ацетилтрансферазу), соответствующую UniProt ID: **Q5SJ05** (с заменой Ala76Thr, что соответствует штаммовой вариабельности) с дополнительной С-концевой аминокислотной последовательностью His-tag (LEHHHHHH).

Наработка в клетках E.coli и очистка рекомбинантного фермента TTHA1209. Клетки *E. coli* BL21(DE3) трансформировали плазмидой pET-1209 при помощи метода электропорации с использованием 0.1 см кювет BioRad (BioRad Laboratories, Inc., США) и электропоратора ПЭП-2006 (ИБП РАН, Россия), и высевали на питательную среду LB с селективным антибиотиком канамицином 25 мкг/мл. Для наработки фермента в препаративных количествах, клетки нарабатывали в объеме 1 Л среды 2YT с канамицином 25 мкг/мл. Когда культура достигала оптической плотности ($ОД_{600нм}$) 0.8-1.0 ОЕ проводили индукцию синтеза белка путем добавления индуктора ИПТГ в концентрации 0.5 мМ, и далее растили при температуре 37°C в течение 4 часов. Оптическую плотность культуры измеряли на приборе NanoPhotometer NP80 (IMPLEN, Германия). Биомассу осаждали при помощи центрифугирования при 5 тыс. *g* в течение 15 минут при температуре 4°C на центрифуге Beckman Coulter Avanti J-26XP (Beckman Coulter, США) и хранили при -70°C или же сразу использовали для выделения фермента.

Для очистки фермента TTHA1209 использовали аффинную металл-хелатную хроматографию на Ni-NTA агарозе (QIAGEN) с использованием хроматографической системы низкого давления AKTA (GE Healthcare, США). Для выделения использовали буферы следующего состава: буфер А - 50 мМ натрий-фосфатный буфер pH=8.0, 300 мМ NaCl, 10 мМ имидазол; буфер В - 50 мМ натрий-фосфатный буфер pH=8.0, 300 мМ NaCl, 20 мМ имидазол; С - 50 мМ натрий-фосфатный буфер pH=8.0, 300 мМ NaCl, 250 мМ имидазол. Биомассу клеток ресуспендировали в 40 мл буфера А, с добавлением ингибитора сериновых протеаз ПМСФ, ДНКазы и лизоцима. Клетки разрушали при помощи ультразвукового гомогенизатора Sonicator Q125 (Qsonica 125, США). Растворимую фракцию белков отделяли от клеточного дебриса при помощи центрифугирования при 10 тыс. *g* в течение 1 часа. Супернатант наносили на колонку с сорбентом Ni-NTA (5 мл), промывали 5 объемами буфера А, затем 5 объемами буфера В, белок элюировали буфером С. Анализ индукции и белковый состав хроматографических фракций анализировали при помощи электрофореза в 15% ПААГ в трис-глициновом буфере с использованием электрофоретического оборудования (Bio-Rad Laboratories, Inc., США). ПААГ сканировалои при помощи системы гель-документирования Pharos FX Plus (Bio-Rad Laboratories, Inc., США). Фракции, содержащие целевой белок, диализовали от имидазола против буфера 20 мМ Трис-HCl, 150 мМ NaCl, pH 8.5, 50% глицерин и хранили при -20°C. Концентрацию белка TTHA1209 измеряли спектрофотометрически с использованием аналитический спектрофотометра Cary 100 (Agilent Technologies, США). Концентрацию высчитывали с учетом молекулярной массы 20672 Да и молярного коэффициента экстинкции белка 54480 $M^{-1}см^{-1}$, рассчитанных на основе аминокислотной последовательности согласно [24] и при помощи программы ProtParam https://www.protparam.net/index.html.

In vitro ацетилирование рекомбинантного альфа-парвальбумина крысы ферментом TTHA1209. Для проверки N-ацетилтрансферазной активности рекомбинантного фермента TTHA1209 проводили *in vitro* ацетилирование рекомбинантного альфа-парвальбумина крысы (ПА), наработанного в клетках *E.coli* и очищенного согласно методике опубликованной ранее [28]. Реакцию проводили в течение 16 часов при 37°C в 50 мкл реакционной смеси следующего состава: 5 мМ HEPES pH 8.1, 20-25 мкМ ПА, 2.5 мкМ TTHA1209, 100 мкМ Ac-CoA, 1 мМ ЭДТА (для поддержания ПА в апо-форме). После реакции образцы подвергали диализу в дистиллирован-

ной воде и оценивали уровень N-концевого ацетилирования при помощи метода масс-спектрометрии. В качестве отрицательного контроля использовали ПА, не подвергавшийся реакции ацетилирования.

Анализ уровня ацетилирования ПА проводили на масс-спектрометрическом детекторе с электрораспылительной ионизацией (ESI-MS) Shimadzu Corporation, LCMS-2010EV (Shimadzu Co., Япония). Образцы 0,1–0,5 мкМ ПА в смеси деионизированной воды и ацетонитрила (10 мМ муравьиной кислоты) в соотношении 40:60 (по объему) вводили непосредственно со скоростью 40 мкл/мин в масс-детектор LCMS-2010EV МС-спектры снимали в положительном режиме от 500 до 1500 м/з при скорости сканирования 125 а.е.м./с, напряжении детектора 1,5 кВ и расходе распыляющего азота 1,2 л/мин. Калибровку прибора проводили с использованием миоглобина сердца лошади (Sigma-Aldrich Co., США). Молекулярные массы белковых фракций анализировали при помощи программного обеспечения GPMAW 9.02 [27].

Результаты исследования и их обсуждение

По данным базы NCBI ген *TTHA1209* аннотирован в геноме бактерии *T. thermophilus* как «probable acetyltransferase». В наших предыдущих исследованиях мы предположили, что *TTHA1209* кодирует фермент, который можно отнести к N-концевым ацетилтрансферазам (NAT), осуществляющих перенос ацетильной группы на Nα-аминогруппу субстратов (Nα-ацетилирование).

NAT бактерий имеют размеры от 140 до 205 аминокислот, и их молекулярная масса значительно меньше эукариотических ортологов. NAT бактерий характеризуются наличием в своей структуре единственного GNAT-домена, присутствием P-петли в области между β4 складкой и α3 спиралью, а также наличием консервативного (для NAT бактерий) аспарагин (Asn) в начале спирали α3. Так, например, наиболее изученные на сегодняшний день NAT RimI, RimJ и RimL бактерии *E.coli* состоят из 148 а.о., 194 а.о. и 174 а.о., соответственно [14; 38]. Анализ аминокислотной последовательности TTHA1209 и множественное выравнивание с NAT из *E.coli* показал, что 175 а.о. фермент TTHA1209 проявляет 27 %, 13 % и 16 % идентичности с ферментами RimI, RimJ и RimL, соответственно (Рис.1). Наибольший процент идентичности (27 %) TTHA1209 наблюдается с ферментом RimI, что считается достаточно высокой для ферментов данного типа. Идентичность самих RimI, RimJ и RimL составляет от 19 до 23 % [23].

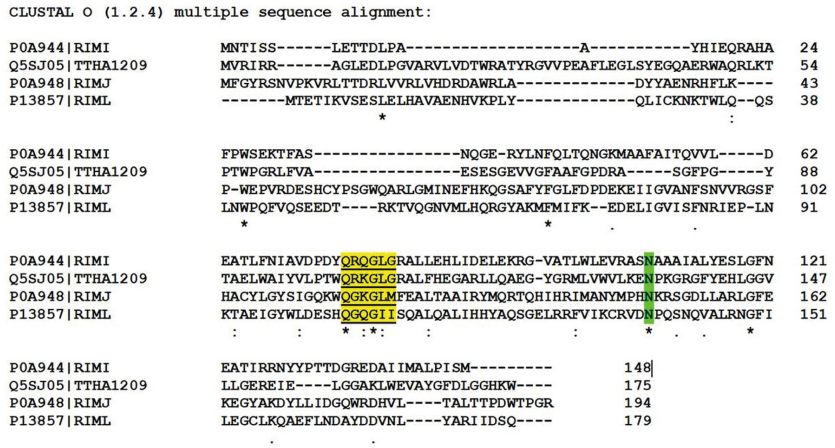


Рис. 1. Множественное выравнивание аминокислотных последовательностей TTHA1209 и ферментов-ортологов (RimI, RimJ и RimL) из *E.coli*. Слева от названия белка указаны их номера базы данных Uniprot. Анализ предсказывает наличие консенсусной последовательности (отмечена желтым и подчеркнута) и консервативного аспарагина (N, отмечен зеленым), отвечающих за связывание ацетил-КоА.

Выравнивание аминокислотных последовательностей показывает, что TTHA1209, как и NAT *E.coli,* содержит консервативный аспарагин (отмечен зеленым) и высоко консервативную область P-петли (отмечена желтым и подчеркнута). Последовательность P-петли TTHA1209 проявляет наибольший процент идентичности с ферментом RimI *E.coli*, и имеет общий консенсус «Q-R-X-G-L-G». Кроме того, выравнивание последовательностей позволило нам идентифицировать ряд консервативных остатков (отмечены звездочкой и двумя точками на Рис. 1), функция которых не известна и ее предстоит установить.

Ферменты NAT имеют низкий процент идентичности на уровне аминокислотных последовательностей, но высокое сходство в топологии элементов вторичных структур и третичной укладки. В базе данных RCSB PDB депонирована кристаллическая структура TTHA1209 *T. thermophilus* (PDB: 2CY2), анализ которой позволяет отнести данный фермент к GNAT-ацетилтрансферазам (рис. 2A).

Фермент имеет V-образный активный центр, образованный параллельными β4-β5 складками. В области между β4 складкой и α3 спиралью располагается P-петля (последовательность Q-R-K-G-L-G), а в начале

спирали α3 располагается консервативный (для NAT бактерий) аспарагин (Asn). В совокупности все это позволяет отнести TTHA1209 к NAT. С использованием кристаллической структуры TTHA1209 (PDB: 2CY2) и сервера PDBsum мы провели анализ топологии элементов вторичных структур. Анализ показал, что топология TTHA1209 имеет вид β1-α1-α2-β2-β3-β4-α3-β5-α4-β6-β7 (Рис. 2Б), характерный для NAT, однако область спиралей α1-α2 у TTHA1209 несколько длинней, чем у ортологов *E.coli*. К сожалению, в настоящее время в литературе отсутствуют критерии для предсказания специфичности NAT на основе молекулярных структур, поэтому оценить роль этой дополнительной вставки в ферменте TTHA1209 пока сложно.

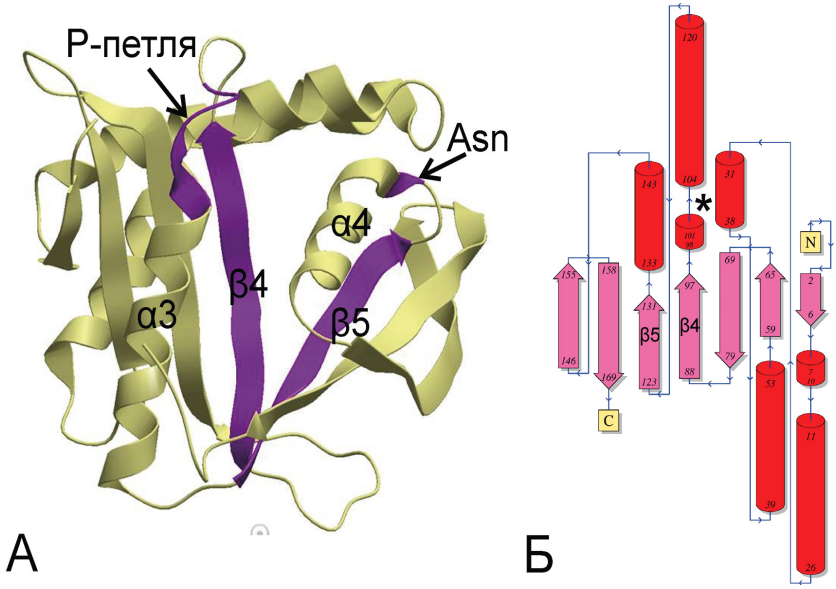


Рис. 2. А - ленточная диаграмма третичной структуры фермента TTHA1209 (PDB: 2CY2). Отмечены основные элементы вторичных структур: фиолетовым отмечен V-образный активный центр, образованный параллельными β4-β5 складками; область P-петли и аспарагина (Asn) отмечены стрелками; Б – топология элементов вторичных структур фермента TTHA1209, рассчитанная на основе 3D кристаллической структуры PDB: 2CY2 при помощи сервера https://www.ebi.ac.uk/thornton-srv/databases/pdbsum/. Красными цилиндрами отмечены позиции α-спиралей, розовыми стрелками отмечены β-складки. Желтые квадраты с символами N и C указывают на N- и C- конец белка, соответственно. Звездочкой отмечено положение P – петли.

В целом, фермент TTHA1209 проявляет структурные особенности, характерные для NAT, однако схожую укладку имеют также ферменты полиамин-ацетилтрансферазы (PAT), лизин-ацетилтрансферазы (KAT) и др. AT, имеющие в своей структуре единичный GNAT-домен. Учитывая широкий спектр ацетилируемых субстратов NAT, их низкий процент идентичности и отсутствие четких критериев для предсказания их субстратной специфичности, актуальным представляется экспериментальная проверка активности TTHA1209. Для проверки активности TTHA1209 как предполагаемой NAT, ее ген был клонирован, а рекомбинантный фермент наработан в *E.coli*.

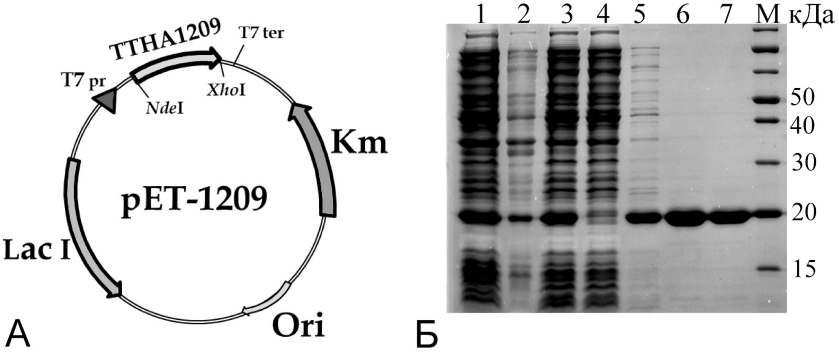


Рис. 3. Экспрессия и очистка рекомбинантного фермента TTHA1209: А - Схема плазмидной конструкции pET-1209, показывающая область TTHA1209 (серая стрелка), промотор РНК-полимеразы T7 (темно-серый треугольник) и другие области (серые стрелки), включая ColE1 ориджин репликации (Ori), ген репрессора LacI (LacI) и ген устойчивости к канамицину (Km). Стрелки указывают направление транскрипции. Показаны сайты рестрикции NdeI/XhoI, использованные для клонирования гена TTHA1209; Б - Экспрессия в штамме E. coli BL21(DE3) и очистка TTHA1209, отслеживаемая при помощи электрофореза в 15% ПААГ в денатурирующих условиях (окраска Кумасси бриллиантовым синим R-250). Дорожка 1 - растворимый экстракт клеток после 4 часов индукции; 2- осадок клеточного дебриса после разрушения биомассы клеток; 3 – растворимая фракция белков перед хромтографией; 4 – проскок через Ni-NTA; 5 – промывка буфером B; 6-7 – фракции элюции, содержащие белок TTHA1209; M - маркеры молекулярной массы в кДа.

Выделение и очистка предполагаемой N-ацетилтрансферазы TTHA1209. Рекомбинантный фермент TTHA1209 был наработан в клетках *E.coli* BL21(DE3), содержащих плазмиду pET-1209 (Рис. 3А), в виде растворимого белка, слитого с шестью остатками гистидина на С-конце белка, и очищен при помощи аффинной металл-хелатной хроматографии.

Этапы очистки представлены на рисунке 3Б). Как видно из рисунка нарабатываемый белок имеет чистоту свыше 95%, а его электрофоретическая подвижность соответствует расчетной массе ~ 20 кДа. Выход фермента составляет примерно 30 мг с 1 Л культуры.

Проверка N-ацетилтрансферазной активности TTHA1209. Ранее нами было показано, что рекомбинантный парвальбумин крысы (ПА) является удобным модельным объектом для тестирования у ферментов ацетилтрансферазной активности и была исследована активность NAT из *E.coli* [17]. По данным базы UniProt, для ПА, как и многих белков эукариот, характерно наличие такой пост-трансляционной модификации как N-концевое (Nα-) ацетилирование (https://www.uniprot.org/uniprotkb/P02625/entry#ptm_processing). Для проверки ацетилтрансферазной активности фермента TTHA1209 мы использовали апо-форму ПА, поскольку она не обладает жесткой третичной структурой, что способствуетацетилированию. Поскольку в настоящее время отсутствуют данные о термостабильности и оптимуме работы фермента TTHA1209, то реакцию проводили при температуре 37 ºС. В результате масс-спектрометрического анализа образцов было установлено, что 10 % препарата ПА имеет массу 11924 Да, что соответствует фракции белка с N-концевым инициаторным метионином (iMet). Видимо, при наработке белка в клетках *E.coli* метионин аминопептидаза не полностью удалила инициаторный метионин (iMet). 24% препарата имеет массу 11793, что соответствует ПА без iMet, и дополнительных модификаций. По сравнению с контрольным образцом ПА (не обработанного ферментом), 45% препарата имеет массу 11834 Да (+41 Да), что соответствует ПА с одной ацетильной группой. Что свидетельствует о наличии у фермента TTHA1209 Nα- ацетилтрансферазной активности. Хочется отметить, что 5 % препарата имеет массу 11875 Да (+82 Да), что может соответствовать ПА с двумя ацетильными группами. Возможно, фермент TTHA1209, как RimI из *E.coli*, обладает Nε-ацетилтрансферазной активностью и является лизин ацетилтрансферазой (KAT). В настоящее время в литературе отсутствуют данные об ацетилировании лизинов ПА. Для проверки KAT активности фермента требуются дополнительные исследования.

Заключение

Исследование субстратной специфичности АТ является ключевым этапом их классификации. В настоящей работе впервые продемонстрирована характерная для NAT специфическая активность у фермента TTHA1209,

который до выполнения данного исследования был аннотирован в геноме *T. thermophilus* как «probable acetyltransferase». Нами была клонирована ОРС и разработана методика очистки рекомбинантного фермента. Результаты анализа реакции *in vitro* ацетилирования ПА, полученные при помощи метода масс-спектрометрии, свидетельствуют о наличии у фермента TTHA1209 Nα- ацетилтрансферазной активности. Вопрос в отношении наличия у фермента TTHA1209 KAT активности остается открытыми и требует дальнейшего изучения. Полученные данные расширяют наши представления о структурных особенностях NAT бактерий, их субстратной специфичности, и вносят вклад в понимание механизмов функционирования NAT и молекулярных основ их субстратной специфичности. Полученные результаты создают предпосылки для дальнейшего исследования субстратной специфичности и биохимических свойств новой NAT TTHA1209 бактерии *Thermus thermophilus,* что откроет перспективы его использования в биотехнологии для ацетилирования белков и пептидов.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-24-00478, https://rscf.ru/project/23-24-00478/.

Список литературы / References

1. Bernal-Perez, L. F., & Ryu, Y. (2015). RimJ-Catalyzed Sequence-Specific Protein N-Terminal Acetylation in Escherichia coli. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, *6*, 12. https://doi.org/10.4236/abb.2015.63018
2. Bernal-Perez, L. F., Sahyouni, F., Prokai, L., & Ryu, Y. (2012). RimJ-mediated context-dependent N-terminal acetylation of the recombinant Z-domain protein in Escherichia coli. *Mol Biosyst*, *8*, 1128-1130. https://doi.org/10.1039/c2mb05499j
3. Bienvenut, W. V., Giglione, C., & Meinnel, T. (2015). Proteome-wide analysis of the amino terminal status of Escherichia coli proteins at the steady-state and upon deformylation inhibition. *Proteomics*, *15*, 2503-2518. https://doi.org/10.1002/pmic.201500027
4. Burckhardt, R. M., & Escalante-Semerena, J. C. (2020). Small-Molecule Acetylation by GCN5-Related N-Acetyltransferases in Bacteria. *Microbiol Mol Biol Rev*, *84*. https://doi.org/10.1128/MMBR.00090-19 EDN: https://elibrary.ru/ATYYYZ

5. Chen, W., Biswas, T., Porter, V. R., Tsodikov, O. V., & Garneau-Tsodikova, S. (2011). Unusual regioversatility of acetyltransferase Eis, a cause of drug resistance in XDR-TB. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *108*, 9804-9808. https://doi.org/10.1073/pnas.1105379108
6. Christensen, D. G., Meyer, J. G., Baumgartner, J. T., D'Souza, A. K., Nelson, W. C., Payne, S. H., Kuhn, M. L., Schilling, B., & Wolfe, A. J. (2018). Identification of Novel Protein Lysine Acetyltransferases in Escherichia coli. *mBio*, *9*. https://doi.org/10.1128/mBio.01905-18
7. Collars, O. A., Jones, B. S., Hu, D. D., Weaver, S. D., Sherman, T. A., Champion, M. M., & Champion, P. A. (2023). An N-acetyltransferase required for ESAT-6 N-terminal acetylation and virulence in Mycobacterium marinum. *mBio*, *14*, e0098723. https://doi.org/10.1128/mbio.00987-23 EDN: https://elibrary.ru/TZOYBZ
8. D'Accolti, M., Bellotti, D., Dzien, E., Leonetti, C., Leveraro, S., Albanese, V., Marzola, E., Guerrini, R., Caselli, E., Rowinska-Zyrek, M., & Remelli, M. (2023). Impact of C- and N-terminal protection on the stability, metal chelation and antimicrobial properties of calcitermin. *Sci Rep*, *13*, 18228. https://doi.org/10.1038/s41598-023-45437-0 EDN: https://elibrary.ru/MTBIVO
9. Dash, A., & Modak, R. (2021). Protein Acetyltransferases Mediate Bacterial Adaptation to a Diverse Environment. *J Bacteriol*, *203*, e0023121. https://doi.org/10.1128/JB.00231-21 EDN: https://elibrary.ru/DSNGDE
10. Deng, S., & Marmorstein, R. (2021). Protein N-Terminal Acetylation: Structural Basis, Mechanism, Versatility, and Regulation. *Trends Biochem Sci*, *46*, 15-27. https://doi.org/10.1016/j.tibs.2020.08.005 EDN: https://elibrary.ru/HVAAQD
11. Esipov, R. S., Makarov, D. A., Stepanenko, V. N., & Miroshnikov, A. I. (2016). Development of the intein-mediated method for production of recombinant thymosin beta4 from the acetylated in vivo fusion protein. *J Biotechnol*, *228*, 73-81. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.02.021 EDN: https://elibrary.ru/WWJBLJ
12. Favrot, L., Blanchard, J. S., & Vergnolle, O. (2016). Bacterial GCN5-Related N-Acetyltransferases: From Resistance to Regulation. *Biochemistry*, *23*, 989-1002. https://doi.org/10.1021/acs.biochem.5b01269 EDN: https://elibrary.ru/WVMSQP
13. Huang, E., & Yousef, A. E. (2015). Biosynthesis of paenibacillin, a lantibiotic with N-terminal acetylation, by Paenibacillus polymyxa. *Microbiol Res*, *181*, 15-21. https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.08.001 EDN: https://elibrary.ru/YECKUW
14. Isono, K., & Isono, S. (1980). Ribosomal protein modification in Escherichia coli. II. Studies of a mutant lacking the N-terminal acetylation of protein S18.

Mol. Gen. Genet, *177*, 645-651. https://doi.org/10.1007/bf00272675 EDN: https://elibrary.ru/IFVGVY

15. Kazakov, T., Kuznedelov, K., Semenova, E., Mukhamedyarov, D., Datsenko, K. A., Metlitskaya, A., Vondenhoff, G. H., Tikhonov, A., Agarwal, V., Nair, S., Van Aerschot, A., & Severinov, K. (2014). The RimL transacetylase provides resistance to translation inhibitor microcin C. *J Bacteriology*, *196*, 3377-3385. https://doi.org/10.1128/JB.01584-14 EDN: https://elibrary.ru/UEYGQT
16. Kudryashov, T. A., Trunilina, M. V., Bykov, V. V., Boldaevsky, I. S., Sokolov, A. S., & Lapteva, Y. S. (2023). Development of an algorithm for N-terminal acetyltransferases identification and verification of their functional activity. *JOURNAL BIOMED*, *19*, 43-46. https://doi.org/10.33647/2713-0428-19-3 EDN: https://elibrary.ru/BJNZTF
17. Lapteva, Y. S., Vologzhannikova, A. A., Sokolov, A. S., Ismailov, R. G., Uversky, V. N., & Permyakov, S. E. (2021). In Vitro N-Terminal Acetylation of Bacterially Expressed Parvalbumins by N-Terminal Acetyltransferases from Escherichia coli. *Appl Biochem Biotechnol*. https://doi.org/10.1007/s12010-020-03324-8 EDN: https://elibrary.ru/CZOUMS
18. Le, V. T. B., Tsimbalyuk, S., Lim, E. Q., Solis, A., Gawat, D., Boeck, P., Lim, E. Q., Renolo, R., Forwood, J. K., & Kuhn, M. L. (2021). The Vibrio cholerae SpeG Spermidine/Spermine N-Acetyltransferase Allosteric Loop and beta6-beta7 Structural Elements Are Critical for Kinetic Activity. *Front Mol Biosci*, *8*, 645768. https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.645768 EDN: https://elibrary.ru/HFGLJF
19. Lee, K., & Back, K. (2023). Escherichia coli RimI Encodes Serotonin N-Acetyltransferase Activity and Its Overexpression Leads to Enhanced Growth and Melatonin Biosynthesis. *Biomolecules*, *13*, 908. https://doi.org/10.3390/biom13060908 EDN: https://elibrary.ru/KUBTTZ
20. Li, D., Yang, Y., Li, R., Huang, L., Wang, Z., Deng, Q., & Dong, S. (2021). N-terminal acetylation of antimicrobial peptide L163 improves its stability against protease degradation. *J Pept Sci*, *27*, e3337. https://doi.org/10.1002/psc.3337 EDN: https://elibrary.ru/HPPSFL
21. Miao, L., Fang, H., Li, Y., & Chen, H. (2007). Studies of the in vitro Nalpha-acetyltransferase activities of E. coli RimL protein. *Biochem Biophys Res Commun*, *357*, 641-647. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2007.03.171
22. Miasaki, K. M. F., Wilke, N., Neto, J. R., & Alvares, D. S. (2020). N-terminal acetylation of a mastoparan-like peptide enhances PE/PG segregation in model membranes. *Chem Phys Lipids*, *232*, 104975. https://doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2020.104975 EDN: https://elibrary.ru/TSXNWP

23. Nesterchuk, M. V., Sergiev, P. V., & Dontsova, O. A. (2011). Posttranslational Modifications of Ribosomal Proteins in Escherichia coli. *Acta Naturae*, *3*, 22-33. https://doi.org/10.32607/20758251-2011-3-2-22-33 EDN: https://elibrary.ru/OXKWAZ
24. Pace, C. N., Vajdos, F., Fee, L., Grimsley, G., & Gray, T. (1995). How to measure and predict the molar absorption coefficient of a protein. *Protein Sci.*, *4*, 2411-2423. https://doi.org/10.1002/pro.5560041120 EDN: https://elibrary.ru/XZNIPR
25. Pal, M., Yadav, V. K., Pal, P., Agarwal, N., & Rao, A. (2023). The physiological effect of rimI/rimJ silencing by CRISPR interference in Mycobacterium smegmatis mc(2)155. *Arch Microbiol*, *205*, 211. https://doi.org/10.1007/s00203-023-03561-5 EDN: https://elibrary.ru/WNBFRF
26. Pathak, D., Bhat, A. H., Sapehia, V., Rai, J., & Rao, A. (2016). Biochemical evidence for relaxed substrate specificity of Na-acetyltransferase (Rv3420c/rimI) of Mycobacterium tuberculosis. *Scientific reports*, *6*, 12.
27. Peri, S., Steen, H., & Pandey, A. (2001). GPMAW-a software tool for analyzing proteins and peptides. *Trends Biochem Sci*, *26*, 687-689. https://doi.org/10.1016/s0968-0004(01)01954-5 EDN: https://elibrary.ru/AQGWYS
28. Permyakov, S. E., Vologzhannikova, A. A., Emelyanenko, V. I., Knyazeva, E. L., Kazakov, A. S., Lapteva, Y. S., Permyakova, M. E., Zhadan, A. P., & Permyakov, E. A. (2012). The impact of alpha-N-acetylation on structural and functional status of parvalbumin. *Cell Calcium*, *52*, 366-376. https://doi.org/10.1016/j.ceca.2012.06.002 EDN: https://elibrary.ru/SOHVBX
29. Pletnev, P. I., Shulenina, O., Evfratov, S., Treshin, V., Subach, M. F., Serebryakova, M. V., Osterman, I. A., Paleskava, A., Bogdanov, A. A., Dontsova, O. A., Konevega, A. L., & Sergiev, P. V. (2022). Ribosomal protein S18 acetyltransferase RimI is responsible for the acetylation of elongation factor Tu. *J Biol Chem*, *298*, 101914. https://doi.org/10.1016/j.jbc.2022.101914 EDN: https://elibrary.ru/PJSPCV
30. Ren, Y., Yao, X., Dai, H., Li, S., Fang, H., Chen, H., & Zhou, C. (2011). Production of Na-acetylated thymosin a1 in Escherichia coli. *Microbial Cell Factories*, *10*, 2-8. https://doi.org/10.1186/1475-2859-10-26 EDN: https://elibrary.ru/ONECBZ
31. Roy-Chaudhuri, B., Kirthi, N., Kelley, T., & Culver, G. M. (2008). Suppression of a cold-sensitive mutation in ribosomal protein S5 reveals a role for RimJ in ribosome biogenesis. *Mol Microbiol*, *68*, 1547-1559. https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2008.06252.x
32. Schmidt, A., Kochanowski, K., Vedelaar, S., Ahrne, E., Volkmer, B., Callipo, L., Knoops, K., Bauer, M., Aebersold, R., & Heinemann, M. (2016). The quantitative

and condition-dependent Escherichia coli proteome. *Nat Biotechnol*, *34*, 104-110. https://doi.org/10.1038/nbt.3418 EDN: https://elibrary.ru/BUYYEB

33. Vetting, M. W., Bareich, D. C., Yu, M., & Blanchard, J. S. (2008). Crystal structure of RimI from Salmonella typhimurium LT2, the GNAT responsible for N(alpha)-acetylation of ribosomal protein S18. *Protein Sci*, *17*, 1781-1790. https://doi.org/10.1110/ps.035899.108
34. Vetting, M. W., Carvalho, L. P. S., Roderick, S. L., & Blanchard, J. S. (2005). A Novel Dimeric Structure of the RimL Nα-acetyltransferase from Salmonella typhimurium. *J Biol Chem*, *280*, 22108-22114. https://doi.org/10.1074/jbc.M502401200 EDN: https://elibrary.ru/MINOZH
35. Vetting, M. W., Carvalho, L. P. S., Yu, M., Hegde, S. S., Magnet, S., Roderick, S. L., & Blanchard, J. S. (2005). Structure and functions of the GNAT superfamily of acetyltransferases. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *433*, 212-226. https://doi.org/10.1016/j.abb.2004.09.003
36. White-Ziegler, C. A., Black, A. M., Eliades, S. H., Young, S., & Porter, K. (2002). The N-acetyltransferase RimJ responds to environmental stimuli to repress pap fimbrial transcription in Escherichia coli. *J Bacteriol*, *184*, 4334-4342. https://doi.org/10.1128/JB.184.16.4334-4342.2002
37. White-Ziegler, C. A., & Low, D. A. (1992). Thermoregulation of the pap operon: evidence for the involvement of RimJ, the N-terminal acetylase of ribosomal protein S5. *J Bacteriol*, *174*, 7003-7012. https://doi.org/10.1128/jb.174.21.7003-7012.1992
38. Yoshikawa, A., Isono, S., Sheback, A., & Isono, K. (1987). Cloning and nucleotide sequencing of the genes rimI and rimJ which encode enzymes acetylating ribosomal proteins S18 and S5 of Escherichia coli K12. *Mol. Gen. Genet.*, *209*, 481-488. https://doi.org/10.1007/BF00331153 EDN: https://elibrary.ru/SZGZVG

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кудряшов Тимофей Андреевич, младший научный сотрудник Лаборатории новых методов в биологии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований» Российской академии наук, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН
пр-т Науки, 3, г. Пущино, Московская область, 142290, Российская Федерация
kudryashovtimm@gmail.com

Локтюшов Евгений Владимирович, научный сотрудник Лаборатории новых методов в биологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований» Российской академии наук, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН
пр-т Науки, 3, г. Пущино, Московская область, 142290, Российская Федерация
zhenyaloktushov@gmail.com

Трунилина Мария Викторовна, инженер-биотехнолог Лаборатории новых методов в биологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований» Российской академии наук, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН
пр-т Науки, 3, г. Пущино, Московская область, 142290, Российская Федерация
masha.trunilina@mail.ru

Быков Вячеслав Владимирович, техник Лаборатории новых методов в биологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований» Российской академии наук, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН
пр-т Науки, 3, г. Пущино, Московская область, 142290, Российская Федерация
naggilan88@gmail.com

Соколов Андрей Сергеевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Лаборатории новых методов в биологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований» Российской академии наук, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН
пр-т Науки, 3, г. Пущино, Московская область, 142290, Российская Федерация
212sok@gmail.com

Лаптева Юлия Сергеевна, кандидат биологических наук, доцент ФИЦ ПНЦБИ РАН, старший научный сотрудник Лаборатории новых методов в биологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований» Российской академии наук, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН
пр-т Науки, 3, г. Пущино, Московская область, 142290, Российская Федерация
yulia.s.lapteva@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Timofey A. Kudryashov, Junior Researcher at the Laboratory of New Methods in Biology
Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences", Institute for Biological Instrumentation
3, Nauki Ave., Pushchino, Moscow region, 142290, Russian Federation
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2092-7028
kudryashovtimm@gmail.com

Eugene V. Loktyushov, Research Fellow at the Laboratory of New Methods in Biology
Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences", Institute for Biological Instrumentation
3, Nauki Ave., Pushchino, Moscow region, 142290, Russian Federation
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2028-1789
zhenyaloktushov@gmail.com

Maria V. Trunilina, Biotechnologist at the Laboratory of New Methods in Biology
Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences", Institute for Biological Instrumentation
3, Nauki Ave., Pushchino, Moscow region, 142290, Russian Federation
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9171-3083
masha.trunilina@mail.ru

Vyacheslav V. Bykov, Technician at the Laboratory of New Methods in Biology
Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences", Institute for Biological Instrumentation
3, Nauki Ave., Pushchino, Moscow region, 142290, Russian Federation
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3978-7862
naggilan88@gmail.com

Andrey S. Sokolov, Cand. of Bio. Sc., Senior Research at the Laboratory of New Methods in Biology
Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences", Institute for Biological Instrumentation
3, Nauki Ave., Pushchino, Moscow region, 142290, Russian Federation
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7145-251X
212sok@gmail.com

Yulia S. Lapteva, Cand. of Bio. Sc., Assistant professor, Senior Research at the Laboratory of New Methods in Biology
Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences", Institute for Biological Instrumentation
3, Nauki Ave., Pushchino, Moscow region, 142290, Russian Federation
SPIN-code: 9441-3917
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6607-9861
ResearcherID: D-7227-2012
Scopus Author ID: 55257828600
yulia.s.lapteva@gmail.com

Поступила 26.07.2024
После рецензирования 05.09.2024
Принята 28.09.2024

Received 26.07.2024
Revised 05.09.2024
Accepted 28.09.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1178 **EDN: PSCOZR**
УДК 619:616.98:579.852.13-076:636.22/.28

CC BY NC ND

Научная статья

ВИДОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ БАКТЕРИЙ РОДА CLOSTRIDIUM, ВЫДЕЛЕННЫХ ОТ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА, ПРИ ПОМОЩИ МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ПЦР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А.В. Нефедченко, Т.Е. Судоргина, Т.И. Глотова, С.В. Котенева, А.Г. Глотов

Аннотация

Обоснование. Болезни, вызываемые клостридиями, широко распространены у крупного рогатого скота. В организме животных помимо патогенных клостридий, постоянно обитают непатогенные виды и для постановки правильного диагноза необходимо дифференцировать выделенные культуры этих бактерий. Перспективным направлением для решения этой задачи является поиск высоко специфичных и чувствительных методов генетического анализа. Основанных на применении полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени, которые дают возможность в короткие сроки выявлять и определять видовую принадлежность микроорганизмов.

Цель. Разработать мультиплексную полимеразную цепную реакцию в реальном времени, позволяющую выявлять токсигенные виды клостридий: *Clostridium sporogenes, Clostridium perfringens* и *Clostridium sordellii* в смешанных и чистых бактериальных культурах, определить ее чувствительность и специфичность.

Материалы и методы. В своих исследованиях использовали пробы биологического материала от больных животных, из которых выделяли культуры клостридий на искусственных питательных средах с последующей их идентификацией по результатам изучения культуральных и биохимических свойств. Праймеры и зонды разрабатывали с использованием инструмента PrimerQuest, затем определяли чувствительность и специфичность ПЦР с использованием референтных штаммов и изолятов бактерий.

Результаты. В период с 2023 г. по 2024 г. исследовали 90 проб биоматериала от крупного рогатого скота, отобранных в животноводческих хозяйствах Новосибирской области. В результате бактериологических исследований было получено

44 изолята клостридий девяти видов рода *Clostridium*. Для осуществления подбора праймеров и зондов провели анализ, в результате которого выбрали три пары праймеров и зондов, которые использовали для обнаружения у *C. sporogenes* гена **gerKA**, *C. perfringens* – plc, *C. sordelli* – **NanS**. Кроме того в работе использовали пару праймеров для выявления видов рода *Clostridium* по гену 16S РНК. С целью определения рабочих концентраций праймеров и зондов, обеспечивающих необходимую чувствительность анализа, была проведена серия исследований, которые позволили оптимизировать условия его проведения. Анализируя результаты исследований, определили чувствительность реакции, которая составила для чистых культур бактерий видов *C. sporogenes, C. perfringens* и *C. sordelli* не менее 10^2 КОЕ/мл, а для других видов *Clostridia spp.* 10^1 КОЕ/мл.

Заключение. Разработанная мультиплексная ПЦР в реальном времени позволяет в короткие сроки проводить диагностику клостридиозов крупного рогатого скота и видовую идентификацию возбудителей. В этиологии клостридиозов крупного рогатого скота помимо *C. perfringens*, C. *sporogenes, C. sordellii* могут принимать участие и другие виды *Clostridium spp.* Необходимо совершенствовать методы диагностики клостридиозов и расширять спектр выявляемых видов клостридий.

Ключевые слова: крупный рогатый скот; клостридии; изолят; полимеразная цепная реакция

Для цитирования. Нефедченко, А. В., Судоргина, Т. Е., Глотова, Т. И., Котенева, С. В., & Глотов, А. Г. (2025). Видовая идентификация бактерий рода *Clostridium*, выделенных от крупного рогатого скота, при помощи мультиплексной ПЦР в режиме реального времени. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 315-333. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1178

Original article

SPECIES IDENTIFICATION OF BACTERIA OF THE GENUS CLOSTRIDIUM, ISOLATED FROM CATTLE, BY MULTIPLEX REAL-TIME PCR

A.V. Nefedchenko, T.E. Sudorgina, T.I. Glotova, S.V. Koteneva, A.G. Glotov

Abstract

Background. Diseases caused by clostridia are widespread in cattle. In addition to pathogenic clostridia, non-pathogenic species are constantly living in the organism

of animals, and to make a correct diagnosis it is necessary to differentiate isolated cultures of these bacteria. A promising direction for solving this problem is the search for highly specific and sensitive methods of genetic analysis. Based on the application of real-time polymerase chain reaction (PCR), which makes it possible to detect and determine the species affiliation of microorganisms in a short period of time.

Purpose. To develop a multiplex real-time polymerase chain reaction for the detection of toxigenic Clostridium species: *Clostridium sporogenes*, *Clostridium perfringen*s and *Clostridium sordellii* in mixed and pure bacterial cultures, to determine its sensitivity and specificity.

Materials and methods. In our studies we used samples of biological material from sick animals, from which clostridia cultures were isolated on artificial nutrient media with their subsequent identification based on the results of culture and biochemical properties. Primers and probes were designed using the PrimerQuest tool, and then the sensitivity and specificity of PCR were determined using reference strains and bacterial isolates.

Results. In the period from 2023 to 2024, 90 samples of biomaterial from cattle collected in livestock farms of the Novosibirsk Region were investigated. As a result of bacteriological studies, 44 isolates of clostridia of nine species of the genus *Clostridium* were obtained. For the selection of primers and probes, we analysed three pairs of primers and probes, which were used to detect the gerKA gene in *C. sporogenes, C. perfringens* - plc, *C. sordelli* - NanS. In addition, a pair of primers was used to detect species of the genus Clostridium by the 16S RNA gene. In order to determine the working concentrations of primers and probes that would provide the necessary sensitivity of the analysis, a series of studies were carried out to optimise the conditions of the analysis. Analysing the results of the studies, we determined the sensitivity of the reaction, which was not less than 102 CFU/ml for pure bacterial cultures of *C. sporogenes*, *C. perfringens* and *C. sordelli* species, and for other species of Clostridia spp. 101 CFU/ml.

Conclusion. The developed multiplex real-time PCR allows short-term diagnosis of bovine clostridiosis and species identification of pathogens. In addition to *C. perfringens*, *C. sporogenes*, *C. sordellii*, other species of *Clostridium spp.* may be involved in the etiology of bovine clostridiosis. It is necessary to improve diagnostic methods of clostridiosis and expand the range of detectable clostridium species.

Keywords: cattle; clostridia; isolate; polymerase chain reaction

For citation. Nefedchenko, A. V., Sudorgina, T. E., Glotova, T. I., Koteneva, S. V., & Glotov, A. G. (2025). Species identification of bacteria of the genus *Clostridium* isolated from cattle by multiplex real-time PCR. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 315-333. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1178

Введение

Инфекционные болезни крупного рогатого скота широко распространены и являются одной из важных причин экономического ущерба в животноводстве [11]. Патогенными видами клостридий, оказывающими наибольший ущерб животноводству являются: *C. chauvoei* (эмфизематозный карбункул), *C. novyi (C. oedematiens)* тип A, *C. septicum, C. sordellii* (злокачественный отек), *C. haemolyticum* (*C. novyi* тип D) (бациллярная гемоглобинурия), *C. perfringens* тип A и D (злокачественный отек, газовая гангрена, некротизирующие энтериты, метриты, маститы), *C. septicum, C. oedematiens (C. novyi), C. histolyticum* (злокачественный отек, брадзотоподобные инфекции) и *C. difficile* (некротические энтериты, диареи) [3; 7; 8; 10; 19]. Эти бактерии вызывают болезни, которые широко распространены в мире и часто приводят к гибели, снижению скорости роста, привесов и молочной продуктивности животных. Их роль возрастает в связи с интенсификацией молочного животноводства. Установлено, что наиболее восприимчивыми к заболеванию являются высокопродуктивные коровы после первого-второго отелов, а также телята [8; 9].

Установлено, что в разных отделах кишечника животных могут присутствовать десятки видов клостридий. Поэтому, достаточно сложно при вспышке клостридиозов в хозяйстве установить этиологическую структуру заболевания. Кроме того, некоторые клинические формы клостридиозов могут быть вызваны несколькими видами бактерий. Так, в этиологии злокачественного отека могут участвовать одновременно *C. perfringens, C. oedematiens, C. septicum, C. sordellii*, *C. histolyticum* и другие виды. Заболевания, вызванные несколькими видами бактерий, обычно клинически протекают в более сложных формах, чаще всего в острых и, как правило, заканчиваются летально [5; 6].

Известно, что *C. perfringens* – патоген, наиболее распространенный среди крупного рогатого скота. Эту бактерию могут выделять из содержимого кишечника здоровых животных [11], но при определенных условиях, она способна вызывать энтерит и абомазит у КРС [12; 14]. *C. sordellii* – причина синдрома внезапной гибели овец всех возрастов, острого абомазита телят и ягнят, геморрагического энтерита, гангренозных поражений органов репродуктивного тракта новотельных коров. Она часто присутствует в ранах вместе с анаэробными и аэробными бактериями других видов [18]. *C. sporogenes* – близкий родственник *C. botulinum*, широко распространенная патогенная бактерия, часто выделяемая от здоровых людей и животных, но также способная вызывать в редких случаях сепсис [14].

Определение распространения и частоты клинических форм клостридиозов у крупного рогатого скота является актуальным в настоящее время в связи интенсификацией животноводства. В этой связи большое значение имеет идентификация и определение токсигенности возбудителей. Традиционно основным методом видовой идентификации выделенных культур клостридий является определение их фенотипических свойств [15; 16] и определение их токсигенных свойств в биологической пробе на лабораторных животных или культурах клеток [2; 4].

Молекулярно-генетические методы предлагают широкий спектр для изучения клостридий. К ним относятся: секвенирование маркерных генов, 16SrRNA, полногеномный анализ бактерии и изучение специфических участков ДНК, поиск мутаций, связанных с антибиотик устойчивостью, филогенетический анализ микроорганизмов [17], выявление генов токсинов [2, 22].

Безусловно, перспективным направлением является разработка высокочувствительных и специфичных методов выявления бактерий *Clostridium spp*. с использованием полимеразной цепной реакции в реальном времени. Она позволит в короткие сроки выявлять и идентифицировать клостридии [20-23].

Целью исследования являлась разработка мультиплексной полимеразной цепной реакции в реальном времени для выявления клостридий: *Clostridium sporogenes, Clostridium perfringens* и *Clostridium sordellii* в смешанных и чистых бактериальных культурах и определение ее специфичности и чувствительности.

Материалы и методы

Работа выполнена в лаборатории биотехнологии-диагностический центр СФНЦА РАН в период с 2023 г. по 2024 г. с использованием проб биоматериала, которые отбирали не позднее 3-5 часов с момента гибели или вынужденного убоя животных, для лечения которых не использовали антибиотики, а также культур бактерий, полученных в ходе наших исследований.

Комплексные бактериологические исследования. Бактериологические исследования проб биоматериала от животных проводили в соответствии ГОСТу 26503-85 «Методы лабораторной диагностики клостридиозов». Изучение биохимических свойств выделенных бактерий проводили с помощью «Набора для идентификации анаэробных бактерий АНАЭРОтест 23», производства Erba Mannheim (Чехия) в соответствии с инструкцией по его применению. Методы выделения клостридий не будут полностью отражены в рамках данной статьи, а лишь обозначено, что они были выделены на

агаре Шедлера и тиогликолевой среде, при инкубировании в термостате при 37 ^{0}C в анаэробных условиях в течение 48-72 часов.

Референтные штаммы для оценки чувствительности и специфичности ПЦР

В качестве положительных контролей применяли вакцины против клостридиозов крупного рогатого скота: Ван Шот Ультра 8 (Zoetis, США, содержащая штаммы *C. chauvoi, C. septicum, C. novyi, C. sordellii, C. perfringens* типов C и D, *C. haemolyticum*) и *Клостбовак-8 (*Ветбиохим, Россия, содержащая штаммы *C. chauvoei, C. septicum,C. novyi* тип B, *Cl. perfringens* типов A, C D, *C. tetani*). Использовали также культуры бактерий, имеющиеся в нашем распоряжении: *C. sordellii* (Т2308), *C. perfringens* (Т2304) и *C. sporogenes* (К2301), идентифицированные бактериологическим и биохимическим методами, подтвержденные секвенированием по 16S рРНК. Также использовали штаммы *Clostridium perfringens* ATCC 13124, *Clostridium sporogenes* ATCC 19404, *Clostridium sordellii* AM370, *Salmonella typhimurium* ATCC 14028, *Proteus vulgaris* ATCC 6380, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Bacillus cereus* ATCC 11778, полученные из коллекции микроорганизмов ГНЦ ВБ «Вектор».

Выделение ДНК

Для выделения ДНК использовали бактериальную суспензию, прогретую в течение 10 минут при 100°C, набор «Рибо-преп» (Amplisens, ФБУН «ЦНИИЭ»). Для ПЦР использовали 5 мкл полученного супернатанта.

Конструирование праймеров и зондов

Специфические прямые и обратные праймеры и зонды, нацеленные на консервативные фрагменты геномов клостридий, были разработаны с использованием инструмента PrimerQuest компании IDT (https://www.idtdna.com/Primerquest/home/Index) из последовательностей базы данных нуклеотидов GenBank (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/). Специфичность праймеров и зондов была дополнительно проверена in silico с использованием инструмента поиска базовых локальных связей NCBI (BLAST;https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi?PROGRAM=blastn&PAGE_TYPE=BlastSearch&LINK_LOC=blasthome). Сайты само отжига, образование шпилек и 3’-комплементарность были проверены с использованием инструмента OligoAnalyzer от IDT (https://www.idtdna.com/calc/analyzer).

Таким образом, были подобраны род специфичные праймеры и зонды, которые использовали для постановки ПЦР в реальном времени с целью выявления токсигенных для крупного рогатого скота видов рода *Clostridium* по гену 16S РНК, а также для выявления клостридий трех

видов: *C. sporogenes, C. perfringens* и *C. sordellii* по генам токсигенности. Праймеры и зонды представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Структура праймеров и зондов для выявления бактерий *Clostridium spp.* и трех видов: *C. sporogenes,* C. *perfringens* и *C. sordellii*

Бактерия	Названия прай-меров и зондов	Последовательность (5' → 3')	Ген ми-шень	Размер амп-ли-кона (п.н.)
Clostridium spp.	ClosppF	CGGTGAAATGCGTAGATATTAGG	16S РНК	273
	ClosppR	GAATTAAACCACATGCTCCGCT		
	ClosppZ	5(Cy5) -TAGATACCCTGGTAGTCCACGC-CG-3(BHQ2)		
C perfringens	ClperfF	5- GCTAGATATGAATGGCAAAGAGG -3	plc	115
	ClperfR	5- CGGCAGTAACATTAGCAGGA -3		
	ClperfZ	5(FAM)-AGCTACATTCTATCTTGGAGAGGCTATGCA -3(BHQ1)		
C sporogenes	ClsporF	5- CAGTGTGGTGGGTGGTATTAT -3	gerKA	96
	ClsporR	5- GCCACTGTAGAAACACCTACT -3		
	ClsporZ	5(HEX)- TAGGTGATGCAGCCATAAGGG-CAA -3(BHQ1)		
C. sordellii	ClsordF	5- TCAGACTTTGGCAGATGGTACTATG -3	NanS	119
	ClsordR	5- AGTCCCATGTTTGTCCATTATCAGT -3		
	ClsordZ	5(ROX)- TGGAGCAGMRGATCATGCATA-CAT -3(BHQ2)		

Постановка ПЦР

Реакцию проводили на приборе CFX96(BioRad, США) с использованием набора реактивов БиоМастер ПЦР РВ(2Х) (Биолабмикс, Россия) в объеме 30 мкл в соответствии с инструкцией производителя с добавлением 0,1 мкл 100 мкМ раствора каждого праймера и зонда и 5 мкл выделенной ДНК.

Температурный режим проведения ПЦР: 95 ^{0}C – 5 мин - 1 цикл; 95 ^{0}C – 15 сек., 60^{0}C – 60 сек. - 45 циклов. Измерение флуоресценции осуществляли при температуре 60^{o}C на всех каналах. Положительными считали образцы со значением Ct (пороговый цикл), не превышающим 35. При значении Ct выше 35 или не определенном – реакцию считали отрицательной.

Результаты исследований и их обсуждение

Специфичность ПЦР в реальном времени определяли с использованием панели контрольных образцов. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты определения специфичности разработанной ПЦР

Контрольный образец	Результат исследования (значение Ct)			
	C. perfringens	C. sporogenes	C. sordellii	Clostridium spp
C. perfringens (изолят Т2304)	16,28	-	-	15,11
C. sporogenes (изолят К2301)	-	15,37	-	14,17
C. sordellii (изолят Т2308)	-	-	13,35	12,03
C. perfringens (ATCC 13124)	18,03	-	-	17,22
C. sporogenes (ATCC 19404)	-	19,25	-	18,13
C.sordellii (АМ370)	-	-	17,10	16,18
Ван шот ультра 8	24,54	-	30,30	20, 18
Клостбовак-8	27,2	-	-	25,13
S.typhimurium (ATCC 14028)	-	-	-	-
P. vulgaris (ATCC 6380)	-	-	-	-
E.coli (ATCC 25922)	-	-	-	-
B. cereus (ATCC 11778)	-	-	-	-

Примечание: «16, 28» - значение порогового цикла (Ct) положительного образца; «-» - отрицательная реакция

Результаты показали, что разработанная ПЦР является высоко специфичной к соответствующим мишеням, а праймеры и зонды не вступают в перекрестные реакции друг с другом.

Особенно важно было определить специфичность праймеров и зондов для выявления *Clostridium spp.* Батаева Д.С. с соавт. [1] сообщали, что разработанная ими реал-тайм ПЦР на основе алкилирующего красителя для выявления *Clostridium spp*. с род специфическими праймерами на ген 16S РНК давала положительную реакцию с культурами *E. coli, B. cereus, P. vulgaris и S. typhimurium*. Поэтому мы провели исследования разработанной ПЦР на специфичность с референтными штаммами этих бактерий и получили отрицательные результаты. Таким образом, разработанная мультиплексная ПЦР в реальном времени является специфичной и выявляет только искомые мишени.

Для определения диагностической чувствительности использовали суспензии суточных культур *C. sporogenes, C. perfringens* и *C. sordellii* с определенной в них концентрацией бактерий. Из суспензий выделили

ДНК и готовили ряд последовательных 10-кратных разведений, которые исследовали в ПЦР. Эффективность амплификации оценивали в трех повторах. Расчет эффективности реакции, коэффициента детерминации и коэффициента вариации проводили автоматически с использованием программного обеспечения амплификатора CFX96 (таблица 3, рисунок 1).

Таблица 3.

Показатели эффективности амплификации анализируемых образцов

Анализируемый образец	Эффективность реакции (E)	Коэффициент детерминации (R^2)	Минимально кол-во выявляемое в реакции (КОЕ/мл)	Коэффициент вариации (CV), %
C. perfringens	105,2	0,995	10^3	1,48
C. sporogenes	97,95	0,998	10^3	1,91
C. sordellii	103,89	0,993	10^2	1,71
Clostridium spp	86,97	0,986,7	10^1	2,71

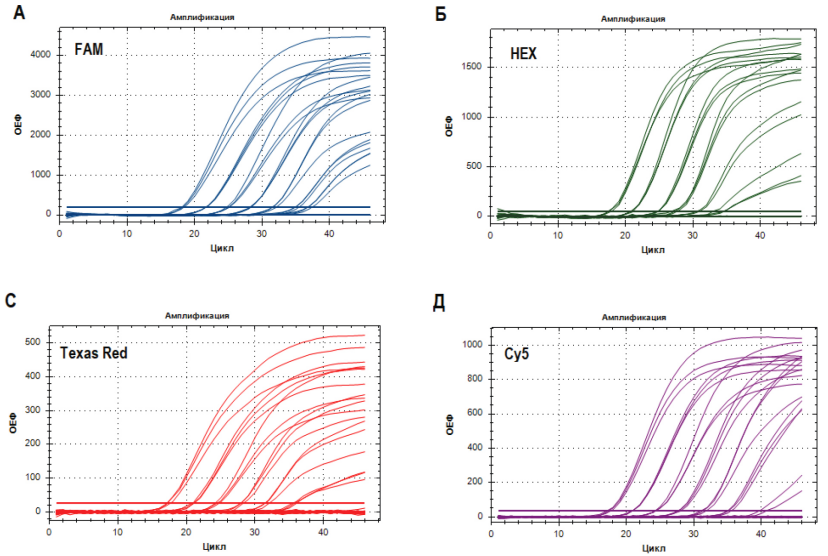


Рис. 1. Результаты амплификации серийных разведений анализируемых образцов в трех повторах – А - *C. perfringens*, Б - С. *sporogenes, C - C. sordellii*, Д - *Clostridium spp.*

В результате проведенных исследований установили, что эффективность реакции составила 86,97-105,20, коэффициент вариации при

тестировании минимально выявляемой концентрации клостридий составил 1,48-2,71, а коэффициент детерминированности (r^2) при этом - от 0,986 до 0,998 для разных образцов.

Полученные результаты исследований свидетельствуют о высокой аналитической чувствительности разработанной ПЦР при использовании в мультиплексных условиях для выявления клостридий трех видов.

Последующие исследования были направлены на определение сравнительной эффективности ПЦР при выявлении клостридий непосредственно в пробах биоматериала от животных, бактериальных культурах, а также их анализ с результатами выделения бактерий на искусственных питательных средах и идентификации по результатам изучения биохимических свойств.

Таблица 4.

Сравнение эффективности выявления клостридий при помощи ПЦР и бактериологических методов

Метод типирования	Всего исследовано проб	Результаты исследований в ПЦР/%			
		Clostridium spp.	*C. perfringens*	*C. sporogenes*	*C. sordellii*
Органы животных (ПЦР)	90	47/52,2	14/15,5	13/14,4	10/11,1
Бактериальные культуры (ПЦР)	90	65/72,2	34/37,8	27/30,0	21/23,3
Идентифицированные культуры клостридий	44	44/100,0	13/29,5	14/31,8	10/22,7

С помощью бактериологического метода из 90 исследованных проб биоматериала от больных животных было выделено и типировано 44 изолята клостридий, из которых 13 принадлежали к *C. perfringens*, 14 – *C. sporogenes*, 10 – *C. sordellii.* Все выделенные изоляты оказались положительными в тесте на *Clostridium spp*. При этом 9 из них отнесены к видам *C. histolyticum, C. haemolyticum*, *C. novyi, C. oedematiens,* что подтверждено секвенированием по 16S рРНК.

При помощи ПЦР в бактериальных культурах чаще всего выявляли *C. perfringens* (*37,8%)*, *C. sporogenes* (30,0%) и реже *C. sordellii* (23,3%). В бактериальных культурах чаще всего выявляли ассоциации клостридий, а при исследовании органов – только одного возбудителя.

При этом в тесте на *Clostridium spp.* были положительны 25,2% проб органов животных и 72,2% бактериальных культур, выделенных из этих органов, что выше количества проб, в которых были выявлены три вида

клостридий. Такое различие, вероятно, связано с присутствием в исследуемых пробах биоматериала других видов клостридий.

Заключение

Разработана мультиплексная полимеразная цепная реакция в реальном времени, которая позволяет в короткие сроки эффективно проводить диагностику клостридиозов крупного рогатого скота. Для ее постановки необходимо предварительно проводить бактериологические исследования проб биоматериала. Наши исследования показали, что в этиологии клостридиозов крупного рогатого скота помимо *C. perfringens*, C. *sporogenes, C. sordellii* могут принимать участие и другие виды *Clostridium spp.* В связи с этим, необходимо совершенствовать методы диагностики клостридиозов и расширять спектр выявляемых видов клостридий.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту 23-26-00009 «Видовой состав и токсигенные свойства клостридий у крупного рогатого скота в Западно-Сибирском регионе и разработка тест-системы для их быстрой идентификации».

Sponsorship information. This work was financially supported by the Russian Science Foundation under the project 23-26-00009 “Species composition and toxigenic properties of clostridia in cattle in the West Siberian region and development of a test system for their rapid identification”.

Список литературы

1. Батаева, Д. С., Махова, А. А., Зайко, Е. В., & Сатабаева, Д. М. (2020). Ускоренная диагностика клостридий в пищевых продуктах с использованием ПЦР в реальном времени. *Все о мясе, 2*, 50-53. https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-2-50-53. EDN: https://elibrary.ru/TRLXAC
2. Безбородова, Н. А. (2020). Современный подход к проблеме клостридиозов в животноводстве: отбор проб, лабораторная диагностика, профилактика. *Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии», 3*(35), 392-402. https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202003016. EDN: https://elibrary.ru/JHUVAH
3. Глотова, Т. И., Судоргина, Т. И., Котенева, С. В., Глотов, А. Г., Велькер, Д. А., & Нефедченко, А. В. (2023). Патогенные виды анаэробных бактерий и их роль в патологии крупного рогатого скота. *Успехи медицинской микологии, XXV*, 14-19. EDN: https://elibrary.ru/NTPITW

4. Данилюк, А. В., & Капустин, А. В. (2019). Распространенность и видовое разнообразие клостридий — возбудителей анаэробных инфекций крупного рогатого скота. *Труды всероссийского НИИ экспериментальной ветеринарии им. Я. Р. Коваленко, 81*, 19-26. https://doi.org/10.30917/ATT-PRINT-2019-10(3)
5. Колесникова, Ю. Н., Пименов, Н. В., & Капустин, А. В. (2016). Этиология анаэробных инфекций крупного рогатого скота и сравнительная характеристика выделенных штаммов клостридий. *Российский журнал сельскохозяйственных и социально-экономических наук, 8*, 39-48. https://doi.org/10.18551/rjoas.2016-08.07. EDN: https://elibrary.ru/WIBLWP
6. Наумова, Н. Б., Батурина, О. А., Локтева, А. С., Плешакова, В. И., Лешева, Н. А., Лоренгель, Т. И., Золотова, Н. С., Алексеева, И. Г., & Кабилов, М. Р. (2023). Влияние декстраналя на бактериобиом кишечника телят. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 15*(6), 197-221. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-6-956. EDN: https://elibrary.ru/UVVYIJ
7. Нефедченко, А. В., Глотов, А. Г., Глотова, Т. И., Судоргина, Т. Е., & Котенева, С. В. (2023). Использование молекулярно-генетических методов для типирования клостридий видов C. sporogenes, C. perfringens и C. sordellii. В *Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции «Молекулярная диагностика»* (с. 354-355). Москва. EDN: https://elibrary.ru/DTRHTW
8. Судоргина, Т. Е., Глотова, Т. И., Нефедченко, А. В., Котенева, С. В., Велькер, Д. А., & Глотов, А. Г. (2024). Частота выделения бактерий Clostridium spp. и их ассоциаций при различных формах клостридиоза крупного рогатого скота. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки, 54*(3), 55-62. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-3-6. EDN: https://elibrary.ru/ZZVDGV
9. Судоргина, Т. Е., Глотова, Т. И., Котенева, С. В., Нефедченко, А. В., & Глотов, А. Г. (2023). Современные представления о возбудителях клостридиальной анаэробной инфекции крупного рогатого скота. В *Актуальные проблемы инфекционной патологии животных и пути их решения: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной Дню Белорусской науки и 95-летию кафедры эпизоотологии и инфекционных болезней* (с. 109-111). Витебск. EDN: https://elibrary.ru/ELNBCW
10. Судоргина, Т. Е., Глотова, Т. И., Котенева, С. В., Нефедченко, А. В., Велькер, Д. А., & Глотов, А. Г. (2023). Клостридиозы крупного рогатого скота: характеристика основных возбудителей, меры профилактики и борьбы. Часть 1. *Ветеринария, 5*, 3-9. https://doi.org/10.30896/0042-4846.2023.26.5.03-09. EDN: https://elibrary.ru/QLUFXE

11. Сунцова, О. В., Рар, В. А., Лисак, О. В., Мельцов, И. В., Дорощенко, Е. К., Савинова, Ю. С., Тикунов, А. Ю., & Козлова, И. В. (2023). Эпизоотическая ситуация в отношении гемопаразитарных заболеваний сельскохозяйственных животных в Иркутской области. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 15*(4), 210-235. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-210-235. EDN: https://elibrary.ru/RFJMLR
12. Abreu, C. C., Edwards, E. E., Edwards, J. F., Gibbons, P. M., Leal de Araújo, J., Rech, R. R., & Uzal, F. A. (2017). Blackleg in cattle: A case report of fetal infection and a literature review. *Journal of veterinary diagnostic investigation, 29*(5), 612-621. https://doi.org/10.1177/1040638717713796
13. Abusnina, W., Shehata, M., Karem, E., Koc, Z., & Khalil, E. (2019). Clostridium sporogenes bacteremia in an immunocompetent patient. *IDCases, 15*, e00481. https://doi.org/10.1016/j.idcr.2019.e00481
14. Awad, M. M., Singleton, J., & Lyras, D. (2016). The Sialidase NanS Enhances Non-TcsL Mediated Cytotoxicity of Clostridium sordellii. *Toxins (Basel), 8*(6), 189. https://doi.org/10.3390/toxins8060189
15. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Volume 3: The Firmicutes* (2nd ed.). (2009). New York: Springer-Verlag. pp. 1309-1329. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68489-5_2
16. Chean, R., Kotsanas, D., Francis, M. J., Palombo, E. A., Jadhav, S. R., Awad, M. M., Lyras, D., Korman, T. M., & Jenkin, G. A. (2014). Comparing the identification of Clostridium spp. by two Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization-Time of Flight (MALDI-TOF) mass spectrometry platforms to 16S rRNA PCR sequencing as a reference standard: a detailed analysis of age of culture and sample preparation. *Anaerobe, 30*, 85-89. https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2014.09.007
17. Goossens, E., Valgaeren, B. R., Pardon, B., Haesebrouck, F., Ducatelle, R., Deprez, P. R., & Van Immerseel, F. (2017). Rethinking the role of alpha toxin in Clostridium perfringens-associated enteric diseases: a review on bovine necrohaemorrhagic enteritis. *Veterinary research, 48*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s13567-017-0413-x. EDN: https://elibrary.ru/KMLWKY
18. Moore, R. J., & Lacey, J. A. (2019). Genomics of the Pathogenic Clostridia. *Microbiol Spectr, 7*(3). https://doi.org/10.1128/microbiolspec
19. Rodriguez-Palacios, A., Stämpfli, H. R., Duffield, T., Peregrine, A. S., Trotz-Williams, L. A., Arroyo, L. G., Brazier, J. S., & Weese, J. S. (2006). Clostridium difficile PCR ribotypes in calves, Canada. *Emerg. Infect. Dis, 12*(11), 1730-1736. https://doi.org/10.3201/eid1211.051581
20. Seise, B., Pollok, S., Seyboldt, C., & Weber, K. (2013). Dry-reagent-based PCR as a novel tool for the rapid detection of Clostridium spp. *J. Med. Microbiol, 62*(Pt 10), 1588-1591. https://doi.org/10.1099/jmm.0.060061-0

21. Silva, R. O. S., Uzal, F. A., Oliveira Jr, C. A., & Lobato, F. C. F. (2016). Clostridial Diseases of Animal. In *John Wiley & Sons, Ltd.* (pp. 243-254). Hoboken, NJ, USA. https://doi.org/10.1002/9781118728291.ch20
22. Morandi, S., Cremonesi, P., Silvetti, T., Castiglioni, B., & Brasca, M. (2015). Development of a triplex real-time PCR assay for the simultaneous detection of Clostridium beijerinckii, Clostridium sporogenes and Clostridium tyrobutyricum in milk. *Anaerobe, 34*, 44-49. https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2015.04.005
23. Uzal, A., & Songer, J. G. (2019). Clostridial Diseases (pp. 792-806). https://doi.org/10.1002/9781119350927.ch51

References

1. Bataeva, D. S., Makhova, A. A., Zayko, E. V., & Satabaeva, D. M. (2020). Rapid diagnosis of Clostridium in food products using real-time PCR. *All About Meat*, *2*, 50-53. https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-2-50-53. EDN: https://elibrary.ru/TRLXAC
2. Bezbordova, N. A. (2020). Modern approach to the problem of clostridiosis in animal husbandry: sampling, laboratory diagnostics, prevention. *Russian Journal "Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology"*, *3(35)*, 392-402. https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202003016. EDN: https://elibrary.ru/JHUVAH
3. Glotova, T. I., Sudorgina, T. I., Koteneva, S. V., Glotov, A. G., Velker, D. A., & Nefedchenko, A. V. (2023). Pathogenic species of anaerobic bacteria and their role in the pathology of cattle. *Advances in Medical Mycology*, *XXV*, 14-19. EDN: https://elibrary.ru/NTPITW
4. Danilyuk, A. V., & Kapustin, A. V. (2019). Prevalence and species diversity of Clostridium — causative agents of anaerobic infections in cattle. *Proceedings of the All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary Medicine named after Ya. R. Kovalenko*, *81*, 19-26. https://doi.org/10.30917/ATT-PRINT-2019-10(3)
5. Kolesnikova, Yu. N., Pimenov, N. V., & Kapustin, A. V. (2016). Etiology of anaerobic infections in cattle and comparative characteristics of isolated Clostridium strains. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, *8*, 39-48. https://doi.org/10.18551/rjoas.2016-08.07. EDN: https://elibrary.ru/WIBLWP
6. Naumova, N.B., Baturina, O.A., Lokteva, A.S., Pleshakova, V.I., Lesheva, N.A., Lorengel, T.I., Zolotova, N.S., Alekseeva, I.G., & Kabilov, M.R. (2023). Effect of dextranol on calves' intestinal bacteriome. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 15*(6), 197-221. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-6-956. EDN: https://elibrary.ru/UVVYIJ

7. Nefedchenko, A. V., Glotov, A. G., Glotova, T. I., Sudorgina, T. E., & Koteneva, S. V. (2023). Use of molecular genetic methods for typing Clostridium species C. sporogenes, C. perfringens and C. sordellii. In *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Molecular Diagnostics"* (pp. 354-355). Moscow. EDN: https://elibrary.ru/DTRHTW
8. Sudorgina, T. E., Glotova, T. I., Nefedchenko, A. V., Koteneva, S. V., Velker, D. A., & Glotov, A. G. (2024). Frequency of isolation of Clostridium spp. bacteria and their associations in various forms of clostridiosis in cattle. *Siberian Herald of Agricultural Science*, *54(3)*, 55-62. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-3-6. EDN: https://elibrary.ru/ZZVDGV
9. Sudorgina, T. E., Glotova, T. I., Koteneva, S. V., Nefedchenko, A. V., & Glotov, A. G. (2023). Current views on the causative agents of clostridial anaerobic infection in cattle. In *Actual problems of infectious pathology of animals and ways to solve them: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the Day of Belarusian Science and the 95th anniversary of the Department of Epizootology and Infectious Diseases* (pp. 109-111). Vitebsk. EDN: https://elibrary.ru/ELNBCW
10. Sudorgina, T. E., Glotova, T. I., Koteneva, S. V., Nefedchenko, A. V., Velker, D. A., & Glotov, A. G. (2023). Clostridiosis in cattle: characterization of the main causative agents, preventive measures and control. Part 1. *Veterinary Medicine*, *5*, 3-9. https://doi.org/10.30896/0042-4846.2023.26.5.03-09. EDN: https://elibrary.ru/QLUFXE
11. Suntsova, O. V., Rar, V. A., Lisak, O. V., Meltsov, I. V., Doroshenko, E. K., Savinova, Yu. S., Tikunov, A. Yu., & Kozlova, I. V. (2023). Epidemiological situation regarding hemoparasitic diseases of farm animals in the Irkutsk region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15(4)*, 210-235. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-210-235. EDN: https://elibrary.ru/RFJMLR
12. Abreu, C. C., Edwards, E. E., Edwards, J. F., Gibbons, P. M., Leal de Araújo, J., Rech, R. R., & Uzal, F. A. (2017). Blackleg in cattle: A case report of fetal infection and a literature review. *Journal of veterinary diagnostic investigation, 29*(5), 612-621. https://doi.org/10.1177/1040638717713796
13. Abusnina, W., Shehata, M., Karem, E., Koc, Z., & Khalil, E. (2019). Clostridium sporogenes bacteremia in an immunocompetent patient. *IDCases, 15*, e00481. https://doi.org/10.1016/j.idcr.2019.e00481
14. Awad, M. M., Singleton, J., & Lyras, D. (2016). The Sialidase NanS Enhances Non-TcsL Mediated Cytotoxicity of Clostridium sordellii. *Toxins (Basel), 8*(6), 189. https://doi.org/10.3390/toxins8060189

15. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Volume 3: The Firmicutes* (2nd ed.). (2009). New York: Springer-Verlag. pp. 1309-1329. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68489-5_2
16. Chean, R., Kotsanas, D., Francis, M. J., Palombo, E. A., Jadhav, S. R., Awad, M. M., Lyras, D., Korman, T. M., & Jenkin, G. A. (2014). Comparing the identification of Clostridium spp. by two Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization-Time of Flight (MALDI-TOF) mass spectrometry platforms to 16S rRNA PCR sequencing as a reference standard: a detailed analysis of age of culture and sample preparation. *Anaerobe, 30*, 85-89. https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2014.09.007
17. Goossens, E., Valgaeren, B. R., Pardon, B., Haesebrouck, F., Ducatelle, R., Deprez, P. R., & Van Immerseel, F. (2017). Rethinking the role of alpha toxin in Clostridium perfringens-associated enteric diseases: a review on bovine necrohaemorrhagic enteritis. *Veterinary research, 48*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s13567-017-0413-x. EDN: https://elibrary.ru/KMLWKY
18. Moore, R. J., & Lacey, J. A. (2019). Genomics of the Pathogenic Clostridia. *Microbiol Spectr, 7*(3). https://doi.org/10.1128/microbiolspec
19. Rodriguez-Palacios, A., Stämpfli, H. R., Duffield, T., Peregrine, A. S., Trotz-Williams, L. A., Arroyo, L. G., Brazier, J. S., & Weese, J. S. (2006). Clostridium difficile PCR ribotypes in calves, Canada. *Emerg. Infect. Dis, 12*(11), 1730-1736. https://doi.org/10.3201/eid1211.051581
20. Seise, B., Pollok, S., Seyboldt, C., & Weber, K. (2013). Dry-reagent-based PCR as a novel tool for the rapid detection of Clostridium spp. *J. Med. Microbiol, 62*(Pt 10), 1588-1591. https://doi.org/10.1099/jmm.0.060061-0
21. Silva, R. O. S., Uzal, F. A., Oliveira Jr, C. A., & Lobato, F. C. F. (2016). Clostridial Diseases of Animal. In *John Wiley & Sons, Ltd.* (pp. 243-254). Hoboken, NJ, USA. https://doi.org/10.1002/9781118728291.ch20
22. Morandi, S., Cremonesi, P., Silvetti, T., Castiglioni, B., & Brasca, M. (2015). Development of a triplex real-time PCR assay for the simultaneous detection of Clostridium beijerinckii, Clostridium sporogenes and Clostridium tyrobutyricum in milk. *Anaerobe, 34*, 44-49. https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2015.04.005
23. Uzal, A., & Songer, J. G. (2019). Clostridial Diseases (pp. 792-806). https://doi.org/10.1002/9781119350927.ch51

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Нефедченко Алексей Васильевич, д.в.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биотехнологии-диагностический центр ИЭВСиДВ
СФНЦА РАН

р.п. Краснообск, Новосибирская область, 630501, Российская Федерация
nefedchenkoav@sfsca.ru

Судоргина Татьяна Евгеньевна, к.в.н., старший научный сотрудник лаборатории биотехнологии-диагностический центр ИЭВСиДВ
СФНЦА РАН
р.п. Краснообск, Новосибирская область, 630501, Российская Федерация
tatjana177@mail.ru

Глотова Татьяна Ивановна, д.б.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории биотехнологии-диагностический центр ИЭВСиДВ
СФНЦА РАН
р.п. Краснообск, Новосибирская область, 630501, Российская Федерация
t-glotova@mail.ru

Котенева Светлана Владимировна, к.в.н., ведущий научный сотрудник лаборатории биотехнологии-диагностический центр ИЭВСиДВ
СФНЦА РАН
р.п. Краснообск, Новосибирская область, 630501, Российская Федерация
koteneva-sv@mail.ru

Глотов Александр Гаврилович, д.в.н., профессор, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник лаборатории биотехнологии-диагностический центр ИЭВСиДВ
СФНЦА РАН
р.п. Краснообск, Новосибирская область, 630501, Российская Федерация
glotov_vet@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Nefedchenko, Doctor of Veterinary Science, Associate Professor, Leading Research Assistant
Siberian Federal Research Center for Agro-BioTechnologies Russian Academy of Science, Institute of Experimental Veterinary Science of Siberia and the Far East

Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation
nefedchenkoav@sfsca.ru
SPIN-code: 1583-5776
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4181-4268
ResearcherID: Q-2568-2016
Scopus Author ID: 56662231300

Tatiana E. Sudorgina, Candidate of Veterinary Science, Senior Research Assistant
Siberian Federal Research Center for Agro-BioTechnologies Russian Academy of Science, Institute of Experimental Veterinary Science of Siberia and the Far East
Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation
tatjana177@mail.ru
SPIN-code: 3697-6010
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4226-5421
Researcher ID: LIF-9100-2024

Tatiana I. Glotova, Doctor of **Biological** Science, Professor, Chief Research Assistant
Siberian Federal Research Center for Agro-BioTechnologies Russian Academy of Science, Institute of Experimental Veterinary Science of Siberia and the Far East
Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation
t-glotova@mail.ru
SPIN-code: 7488-5915
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3538-8749
ResearcherID: A-5596-2014
Scopus Author ID: 7003677877

Svetlana V. Koteneva, Candidate of Veterinary Science, Leading Research Assistant
Siberian Federal Research Center for Agro-BioTechnologies Russian Academy of Science, Institute of Experimental Veterinary Science of Siberia and the Far East
Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation
koteneva-sv@mail.ru
SPIN-code: 7545-7206

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2649-7505
ResearcherID: Q-7924-2016
Scopus Author ID: 57191955208

Alexander G. Glotov, Doctor of Veterinary Science, Professor, Chief Research Assistant, Head of Laboratory
Siberian Federal Research Center for Agro-BioTechnologies Russian Academy of Science, Institute of Experimental Veterinary Science of Siberia and the Far East
Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russian Federation
glotov_vet@mail.ru
SPIN-code: 5020-6503
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2006-0196
ResearcherID: L-7720-2017
Scopus Author ID: 7004340265

Поступила 16.10.2024
После рецензирования 25.10.2024
Принята 07.11.2024

Received 16.10.2024
Revised 25.10.2024
Accepted 07.11.2024

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

SOIL FERTILITY AND PLANT PROTECTION

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1158 **EDN: PTWHNI**
UDC 579.2:631.52:631.527.5:579.8

CC BY NC ND

Original article

ANALYSIS OF GENE EXPRESSION CHANGES IN CANOLA IN RESPONSE TO INOCULATION WITH BIOTIC AND ABIOTIC ELICITORS TO *ALTERNARIA BRASSICAE*

J.T. Alkooranee

Abstract

Background. *Alternaria brassicae* is one of the most destructive pathogens of oilseed rape growth and production. Oilseed rape roots treated with biotic and abiotic elicitors have shown resistance to *A. brassicae* as a result of induced systemic resistance (ISR). In this experiment, we aimed to identify resistance genes in two rapeseed genotypes (*Raphanus brassica* and *Brassica napus*).

Methods. *Pseudomonas fluorescens* PF83 as a biotic elicitor and with Salicylic acid (SA) as an abiotic elicitors were used induced systemic resistance in rapeseed. The expression levels of six defense-related genes (*VSP2*, *MYC2*, *PR-2*, *PR-3*, *PR-4* and *PR-5*) by Quantitative real-time PCR (qRT-PCR) at three times 24, 48 and 120 hpi.

Results. *VSP2*, *MYC2*, *PR-3* and *PR-4* gene expression levels increased in infected leaves by *A. brassicae* and in oilseed genotypes treated by PF83, while the expression levels of PR-2 and PR-5 were increased in leaves treated with SA. The results indicate that the induction of resistance genes depends on the type of elicitor, the biotic and abiotic elicitors interferes with phytohormones SA- and JA-pathways to *A. brassicae*, through the increase in the transcription of resistance-related genes. The abiotic elicitor is key to inducing resistance genes associated with SA-pathways, while the biotic elicitor is key to inducing resistance genes associated with JA-pathways. The results of our study provide a new understanding of the control mechanisms of *A. brassica*.

Conclusion. This study provides a new understanding of the control mechanisms of *A. brassica*. The abiotic elicitor is key to inducing resistance genes associated with SA-pathways, while the biotic elicitor is key to inducing resistance genes associated with JA-pathways. This study explained, that the RR genome is responsible for disease resistance in oilseed *R. brassica* (AARR) to infection processes of *A. brassicae*, so we recommend that using R. brassica as resistance genotype to produce oilseed.

Keywords: *Alternaria brassica; Brassica napus* L; *Raphanus brassica; Pseudomonas fluorescens* PF83; Salicylic acid

For citation. Alkooranee, J. T. (2025). Analysis of gene expression changes in canola in response to inoculation with biotic and abiotic elicitors to Alternaria brassicae. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 334-349. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1158

Introduction

Oilseed crop is one of the important sources of oil upon which the industry has grown in many countries such as China, Canada, Australia and others, the researchers continually trying to find varieties capable of producing the largest amount of oil compared to previous varieties, which are considered as source for animal feed, nutrition of humans, soil conditioners, biofuels and other significant socioeconomic importance [1].

*Brassica napus (*AACC, 2n= 4*x* =38) is formed through hybridisation between *B. oleracea* (CC, 2n = 2 *x* = 18) and *B. rapa* (AA, 2n = 2 *x* = 20), and is one of the most important oilseed crops in the world as it provides oils for human consumption along with soybean oil and palm oil [2]. *B. rapa/ Raphanus sativus* (AARR, 2*n* = 38) is called Rapa radish, amphidiploid between *B. rapa* and *R. sativus* is a good seed produce and used as new fodder crop additionally is resist to the beet cyst nematode [3].

Alternaria brassicae is a necrotrophic fungal pathogen that causes major damage to aerial plant parts at all the stages of growth in oilseed rape, to leading to various losses in production and yield worldwide [4]. Although synthetic chemical pesticides are widely used by farmers and have been successful in controlling various plant diseases, their excessive use has caused numerous environmental and health problems for humans. Therefore, specialists in plant disease management and those concerned have sought to find alternative methods.

In recent years, several successful methods for control of plant diseases have emerged, including the application of systemic resistance, there are

varieties of induced resistances which vary according to the different signaling. Induced Systemic Resistance (ISR) and Systemic Acquired Resistance (SAR) are two forms of systemic resistance; in both SAR and ISR, plant defenses are released by previous infection or treatment that lead to systemic resistance against subsequent challenge by a pathogens or the application of biotic and abiotic elicitors, with most agents urged to reduce disease in plants infected by between 20 and 85%, this resistance can be using as an alternative to chemical pesticides [2; 5; 6].

Many defensive compounds used to induce systemic resistance in plants against both pathogens and herbivores and the SA pathway dependent can be activated when the plants are treated with chemical/abiotic inducers such as salicylic acid (SA), quinolizidine alkaloids, gossypol, nonproteinogenic amino acids, glucosinolates, furanocoumarins andβ_ aminobutyric acid [7].

Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) directly or indirectly stimulate local or systemic resistance in plants against a wide range of different pathogens. This depends on their establishment, survival and continuity, in addition to the network of interactions in plant roots [8]. There are two types of beneficial interactions between rhizo-microbiomes and plant roots, i.e. symbiotic alliances where microbes and plants share costs and benefits [9]. There are many bacterial genera that form the PGPR, such as: *Acinetobacter*, *Arthobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Bradyrhizobium*, *Frankia*, *Pseudomonads*, *Rhizobium*, *Serratia* and *Thiobacillus* [10]. PGPR strains such as *Pseudomonas fluorescens* have been reported to activate systemic protection by induced systemic resistance in plant such as in radish against *Fusarium oxysporum* [11], rice against *Rhizoctonia solani* [12], Tomato against *Alternaria solani* [13], grapevine against *Botrytis cinerea* [14], *Arabidopsis thaliana* against *Pseudomonas syringae* pv. *Tomato* [15], maize against *Rhizoctonia solani* [16]. Hence the present experiment was conducted to evaluate the induced systemic resistance ability of *P. fluorescens* and Salicylic acid in oilseed rape to *Alternaria brassicae* by studying the gene expression of resistance genes associated with hormonal pathways in two genotypes of oilseed rape.

Materials and methods

1. The Pathogen and the elicitors

The *Alternaria brassicae* is used as a pathogen and *P. fluorescens* PF 83 and salicylic acid were used as biotic and abiotic elicitors in this experiment were obtained from the Plant Protection department, College of Agriculture,

Wasit University, Wasit, Iraq. *A. brassicae* was maintained and cultured on PDA medium (200 g peeled potato, 20 g dextrose, 15 g agar, and 1 L distilled water) in the dark at 20 ± 2°C, and 5-mm-diameter mycelia agar plugs were punched from the growing margin after 4 days. For leaves inoculation, ascospores were harvested in sterile distilled water using a sterile brush and filtered through four layers of cheesecloth to remove the mycelia of the culture. The resulting spore suspension was adjusted to 1×10^4 spores/ml.

Fluorescent *Pseudomonas* was grown in King's broth medium and incubated at 30± 1°C [17]. Salicylic acid was dissolved in ethanol for use in subsequent experiments.

2. Plant Materials and Growth

Two spring-type genotypes *Brassica napus* (AACC) and *B. raphanus* (AARR) were used in this research and were obtained from the Field crop department, College of Agriculture, Wasit University, Wasit, Iraq. Oilseed rape seeds were surface-sterilized in 70% ethanol for 1, 10 min in 10% v/v sodium hypochlorite, and rinsed 5 times with sterile distilled water. The seeds were sown and grown in a growth chamber under 12 h of light at 25°Cand 12 h of dark conditions at 22°C. Each genotype independent line of oilseed rape was grown in one of conjoined pots (9 × 12 cm, height × diameter) containing 1 kg a mixture of peat moss and sand at a ratio of 1:1, that had been autoclaved twice for 1 h with a 24 h interval. Each pot was planted with 8 seedlings, each pot was covered with transparent film for 4 days to avoid rapid water loss. After germination, only five plants were allowed to grow in each pot. Irrigation was applied by drenching twice a week.

3. Screening of elicitors based on ISR-eliciting potential and effects on plant growth

For screening the biotic and abiotic elicitors capable of eliciting ISR on thirty days old oilseed plants root of genotypes were treated with suspensions separately by 100 ml / pot (*P. fluorescens* suspension, salicylic acid (200 ppm) by mixing the upper soil surface of each pot in the greenhouse experiments. After 24 hours of treatment, the leaves and stems of plants were inoculated by suspension of *A. brassicae* were separated in 100 ml / pot (reported in 2.1). Each treatment consisted of three replicates.

4. Gene Expression Assay of *A. brassicae* growth

The total RNA from the leaves of genotypes treated or non-treated with elicitors at different incubation times (24, 72 and 120 hpi) with pathogen and first-strand cDNA synthesis and quantitative real-time polymerase chain reaction (qRT-PCR) were used as described in detail previously [5]. Six primers

(Table 1) were used for AACC and AARR, including the *PR-2* and *PR-5* genes were used as markers for SA pathways, whereas *VSP2* and *MYC2* were used as marker JA signaling pathways, whereas for the ETH signaling pathway used the *PR-3* and *PR-4*, in addition to the GAPDH gene.

Table 1.

PCR primers used in the present study

Gene	Gene description	Pathway	Plant	Primer sequence (5′-3′)
PR-2	Beta 1,3 glucanase	SA	AACC AARR	GCTCTGCGAGGCTCTAAC TTGACCCATCATTGACTACA
PR-5	Pathogenesis-related protein 5	SA	AACC	ACCGCCACCATCTTCGTT GCCAGGGCAAATCTCGTT
			AARR	CGGCAACAGCACCACCACA GCAATCTCCAGTTCCTCCC
VSP2	Vegetative storage protein 2	JA	AACC AARR	TACCTCACTTCCGACCAG TTCTCAGTCCCGTATCCA
MYC2	Hypothetical protein	JA	AARR AACC	GTAATCACTTTCTCACCCTCG CGTTTGTCCCTTCAATCAG
PR-3	Basic chitinase	ET	AACC AARR	CCTCAGCCGAGCAATGTG CCGAAGCCAGGGAAAGAC
PR-4	Hevein-like protein	ET	AACC AARR	GCCACCTACCATTACTACAAC TCCAAATCCAATCCTCCA
GAPDH	Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase	-	AACC AARR	CGCTTCCTTCAACATCATTCCCA TCAGATTCCTCCTTGATAGCCTT

5. Statistical analysis

The experimental design of the greenhouse was completely randomized, with three replicates for all treatments. Data of the results were subjected to analysis of variance using GenStat software, and the means ($P < 0.05$) were compared between treatments of oilseed genotypes, biotic, abiotic treatments and alternria leaf spot disease using least significant difference tests [18].

Results

Plants respond actively to different pathogen attacks by deploying a range of defense-response mechanisms that eventually result in plant resistance. To determine the ability of *B. napus* and *R. brassica* genotypes treated or non-treated with biotic (PF83) and abiotic (SA) elicitors to *A. brassica* infection

during different time periods (24, 48 and 120 hpi), by qRT-PCR we investigated the expression profile of resistance defense-related genes in all genotypes. Six primers for each genotype were used (Table 1), including *PR-2*, *PR-3*, *PR-4, PR-5 VSP2* and *MYC2* genes.

1. Expression levels of gene-related pathogen of healthy and infected *B. napus* and *R. brassica* leaves by *A. brassicae* fungi

The qRT-PCR results showed that the *PR-2* and *PR-5* expression levels increased in *A. brassicae* infected leaves, but the expression levels of *PR-3, PR-4*, *VSP2* and *MYC2* decrease.

The expression of the *PR-2* gene was found to be more and peaked at 120 hpi in infected *B. napus* (AACC) and 48 hpi in infected *R. brassica* (AARR) genotypes, which were up-regulated by 2.34-fold (from 1.00- to 2.34-fold), 6.32-fold (from 1.24- to 4.69-fold), respectively (Fig. 1-A).

The expression levels of *PR-5* gene increased clearly with time and reached its peak at 120 hpi in *B. napus* and at 48 hpi in *R. brassica* infected compared with the non-infected (healthy) ones; the expression levels were up-regulated by 2.41 -fold (from 1.37- to 3.31-fold) and 5.58-fold (from 1.63- to 9.11-fold), respectively (Fig. 1-B).

Thus, the response of defense was late in AACC, where the pathogenic fungus can grow quickly before activation of resistance unlike in AARR, where the response of defense is very quick.

VSP2 and *MYC2* are anti-pathogenic genes. Thus, the expression levels of the *VSP2* genes increased in *B. napus* infected than the non-infected (healthy) ones, which was up-regulated by 7.16-fold (from 0.85-fold to 6.09 -fold), but in *R. brassica* was up-regulated at 48 hpi by 22.46-fold (from 1.00-fold to 22.46 -fold) (Fig. 1-C). The *MYC2* gene expression levels increased in infected both genotypes than in the non-infected ones, which was up-regulated by 6.13-fold (from 1.12- to 6.87-fold) and peaked at 120 hpi in *B. napus*, whereas up-regulated by 47.62-fold (from 1.20- to 57.17-fold) and peaked at 24 hpi in *R. brassica* (Fig. 1-D).

The expression of the *PR-3* gene increased and peaked at 120 hpi in infected *B. napus* and 24 hpi in infected *R. brassica* genotype, which were up-regulated by 5.51-fold (from 1.15- to 6.34-fold) and 13.05-fold (from 1.10- to 14.35-fold), respectively (Fig. 1-E).

The expression levels of the *PR-4* gene showed significant differences between infected and non-infected *B. napus* and were up-regulated by 2.60-fold (from 1.20- to 3.13-fold) at 120 dpi, and reached in infected *R. brassica* genotype 2.94-fold (from 1.45- to 4.27-fold) at 120 dpi (Fig. 1-F).

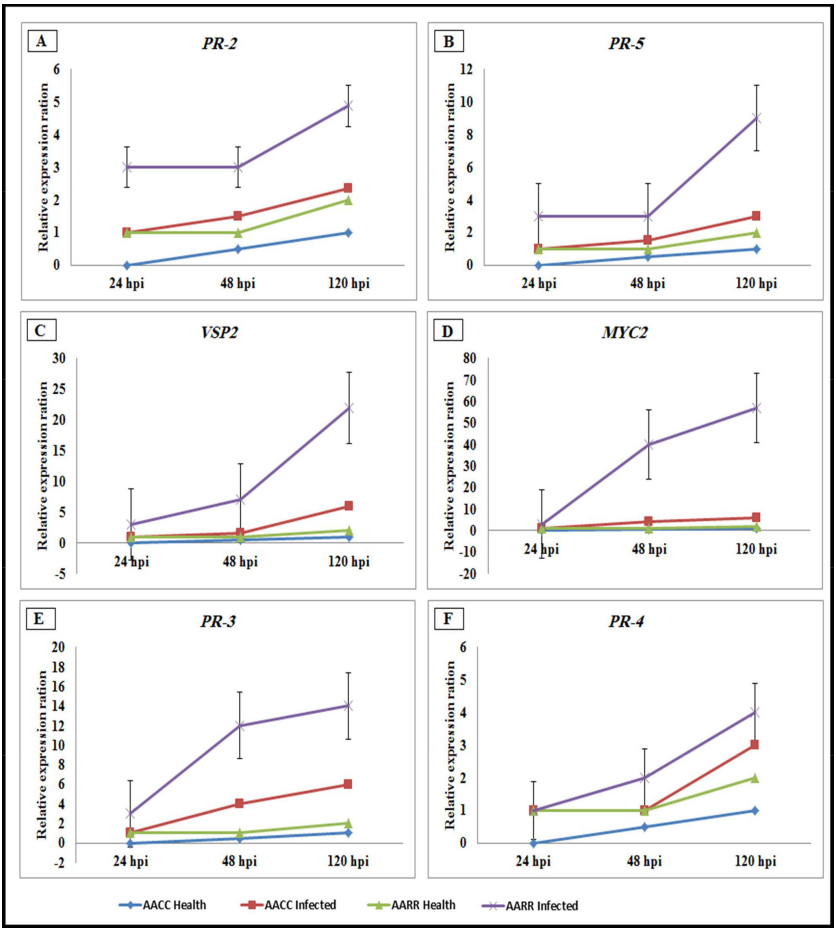


Fig. 1. The expression of defense-related genes in three potted for each time of *B. napus* and *R. brassica* genotypes of fifteen days old inoculated by suspension of *A. brassicae* onto leaves. Leaves were collected 24, 48 and 120 hour post infection. Total RNA was extracted, and cDNA was synthesized. Expression levels of the *PR-2*, *PR-3*, *PR-4, PR-5 VSP2* and *MYC2* genes were monitored by RT q- PCR.

2. P. fluorescens PF83 mounts ISR in genotypes to A. brassicae

The expression levels of *VSP2, MYC2, PR-3* and *PR-4* increased in leaves that were treated with PF83 compared with non-treated without infection of the pathogen.

The expression level of the *PR-2* genes in *B. napus* peaked at 120 hpi and up-regulated by 23.83 -fold (from 0.85- to 20.26-fold) and in *R. brassica* which peaked at 48 hpi and up-regulated by 28.91-fold (from 1.21- to 34.99-fold) (Fig. 2-A).

The expression level of the *PR-5* genes reached in *B. napus* which peaked at 120 hpi and up-regulated by 19.22 -fold (from 1.22- to 23.45-fold), whereas in *R. brassica* which peaked at 48 hpi and was up-regulated by 36.07-fold (from 1.14- to 41.13-fold) (Fig. 2-B).

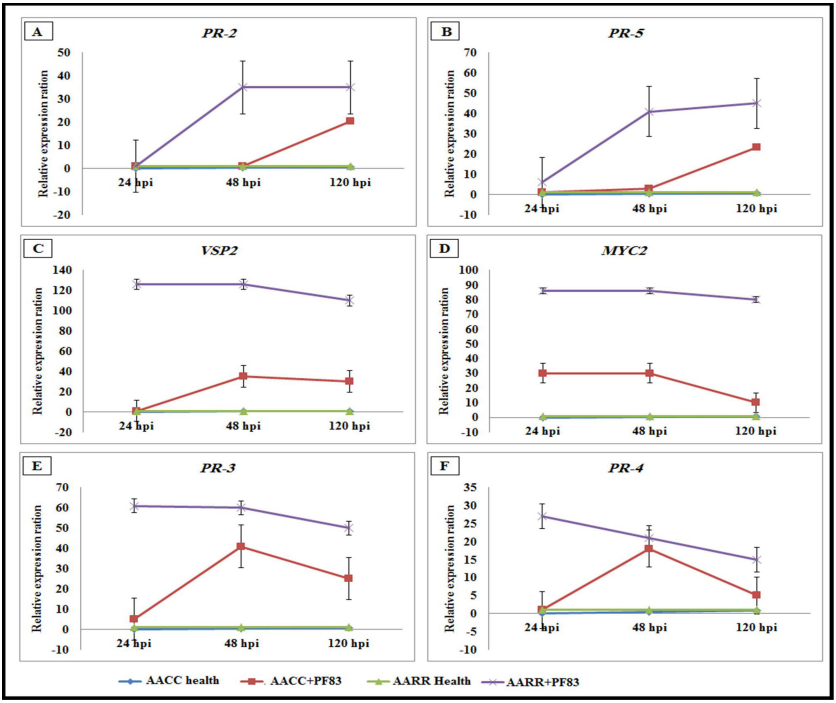


Fig. 2. Expression of defense-related genes in three potted for each time of *B. napus* and *R. brassica* genotypes of 30 days old were drenched about 100 ml / pot of *P. fluorescens* PF83 suspensions and after 1 day inoculated by 5 mm mycelium disk of *A. brassicae* onto leaves. Leaves were collected 24, 48 and 120 hpi. Total RNA was extracted, and cDNA was synthesized. Expression levels of the *PR-2*, *PR-5, Vsp2,* MYS3, *PR-3* and *PR-4* genes were monitored by RT q- PCR.

The expression level of *VSP2* gene peaked at 48 hpi in *B. napus*, and 24 hpi in *R. brassica* respectively, which were up-regulated by 34.52 -fold (from 1.02- to 35.22-fold) and 112.34-fold (from 1.13- to 126.94-fold), respectively (Fig. 2-C).

The expression level of the *MYC2* genes also increased in *B. napus* and *R. brassica* which peaked at 24 hpi and up-regulated by 27.26 -fold (from 1.13- to 30.80-fold) and 52.76-fold (from 1.63- to 86.00-fold), respectively (Fig. 2-D).

The expression level of the *PR-3* genes in *B. napus* which peaked at 48 hpi was up-regulated by 40.44 -fold (from 1.02- to 41.25-fold) and in *R. brassica* which peaked at 24 hpi was up-regulated by 55.45-fold (from 1.10- to 61.10-fold) (Fig. 2-E).

The expression level of *PR-4* gene peaked at 48 hpi in *B. napus*, and 24 hpi in *R. brassica*, which were up-regulated by 12.74 -fold (from 1.02- to 18.10-fold), and 21.34-fold (from 1.27- to 27.10-fold), respectively (Fig. 2-F).

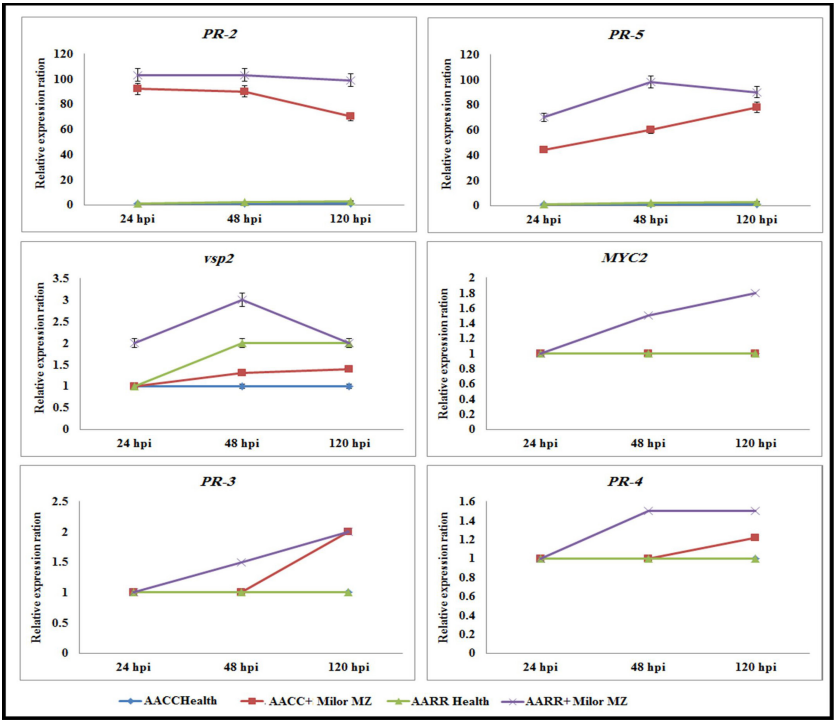


Fig. 3. Expression of defense-related genes in three potted for each time of *B. napus* and *R. brassica* genotypes of 30 days old were drenched about 100 ml / pot of Salicylic acid SA after 1 day from inoculated by 5 mm mycelium disk of *A. brassicae* onto leaves. Leaves were collected 24, 48 and 120 hpi. Total RNA was extracted, and cDNA was synthesized. Expression levels of the *PR-2*, *PR-5, Vsp2,* MYS3, *PR-3* and *PR-4* genes were monitored by RTq- PCR.

The expression level of the *PR-2* gene in plants treated with SA at 24 hpi were up-regulated by 64.83-fold (from 1.42- to 92.05-fold) in *B. napus*, 90.57-fold (from 1.14- to 103.24-fold) in *R. brassica*, compared with the non-treated plants (Fig. 3-A).

The expression level of *PR-5* gene in *R. brassica* was up-regulated at 24 hpi by 51.20-fold (from 1.93- to 98.83-fold), in *B. napus* was up-regulated at 48 hpi by 65.91-fold (from 1.10- to 72.50-fold) compared with the non-treated plants (Fig. 3-B).

The expression levels of *VSP2* and *MYC2* (related with JA) and *PR-3* and *PR-4* (related with ET pathway) were non-increased or slight increase when the plants treated with salicylic acid (SA) in both genotypes.

Dissection

The quantitative real time-polymerase chain reaction (qRT-PCR) results showed that the *PR-2* and *PR-5* expression levels increased in *A. brassicae* infected leaves of AARR, but the expression levels of *PR-3, PR-4*, *VSP2* and *MYC2* decreased. Low and delayed levels of expression of*, PR-3*, *PR-4*, *VSP2* and *MYC2* genes as well as being affected by JA/ET pathway and the fact that *A. brassicae* is saprophytic does not stimulate this pathway, and the high level of gene expression of *PR.1* and *PR.2* may be due to being linked to SA pathway which is motivated by pathogenic micro-organisms and in turn stimulates the so-called systemic acquired resistance (SAR) in host, whereas SAR is accompanied by the induction of pathogenesis-related proteins [19].

Several studies have shown the ability of some of the varieties canola to resist different types of pathogens by the induction of pathogenesis related proteins, and its resistance to diseases may be attributed to the presence of various plant antifungal proteins that are believed to be involved in plant protection through growth inhibition of pathogens, such as *Rs-AFP1* and *Rs-AFP2* in *R. sativus* (RR) [20; 21] and through the production of high peroxidases, which have important roles in plant protection because they reduce pathogenic attack [22].

The expression levels of some genes resistance were increased in *B. napus* and *R. alboglabra* infected compared with non-infected plants, the qRT-PCR results were showed that the *PDF 1.2, AOC3* and *ERF2* genes (marker for the JA/ET signal pathway) expression levels increased in early in plants infected, additionally to *PR-1* gene, but the expression levels were decreased of *TGA5* and *TGA6* (marker for the SA signal pathway) [23]. The resistance gene expression increased over time in *B. napus* and *R. alboglabra* genotypes inoculated with the fungus pathogen *E. curciferarium* caused by powdery mildew disease compared

with non-inoculated plants. It showed that the *PR1* and *PR2* gene expression levels increased early, but the *PR-3* and *PDF1.2* resistance genes which were used as markers for the JA/ET pathway increased later, the reason was due to the lifestyle of a pathogenic fungus in obligate parasite [5].

The results indicated that most of the amplified genes were affected by a combined inoculation with PF83, SA. This result indicates the ability of the biotic and abiotic elicitor to induce systemic resistance in all genotypes against a pathogen.

Through these results we can deduce the success of PF83 to induce systemic resistance in inoculated and infected with pathogen. The results showed that the PF83 depended on JA and ET pathways and are independent from SA pathway because the resistance genes related with JA/ET pathway *VSP2, MYC2, PR3* and *PR-4* were up-regulated in plants treated with biotic elicitors and genes resistance related with SA-accumulation as *PR-2* and *PR-5* were down-regulated, these results lead to knowledge about the PF83 elicitors to ISR, no SAR, the reason may be due to the fact that PF83 from the plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) group that leads to activation of the ISR, which in turn depends on JA pathway and ET pathway. Results also showed that there is a slight increase in genes associated with SA-pathway; this discrepancy suggests that PF87 produced SA not exuded into the rhizosphere of genotypes.

In a previous study has shown that bacterial *P. fluorescens* is able to produce some of the materials capable of stimulating the systemic resistance, such as SA, pseudobactin, pseudomonine and a siderophore containing SA [24].

Psedomonas spp. was capable of inducing resistance to *Botrytis cinerea* in grapevine by inducing low phytoalexin host levels in cells, as SA, pyochelin, DAPG and/or pyoverdin are potentially effective in inducing or priming defence responses in grapevine cells [25].

These results indicate the ability of PF83 to elicited ISR in some cases by dependent of SA pathway and the regulatory gene *PR-1* and *PR-2,* These results were consistent with the Kloepper et al [26]. The mechanisms of the bacteria associated with the roots (PGPR) to stimulate systemic resistance to the output of compounds able to induce resistance in treatment plants, some reports that point to a cooperative than antagonist activity of JA/ET and SA pathways in plant protection treated with bacteria [27; 28].

The expression levels of *PR-2* and *PR-5* were related with SA pathway which increased when the plants treated with salicylic acid (SA) in all genotypes. Salicylic acid (SA) plays an important role to stimulating systemic resistance in plants to different pathogens attack by activating some genes associated with

resistance, there are many studies have pointed to this topic, on peanut against *Alternaria alternata* [29], in *B. napus* cv. GSC 5 and *B. juncea* cv. ELM 079 against alternaria blight disease caused by *Alternaria brassicae* [30].

SA plays an important role to development of systemic acquired resistance (SAR) in hosts to defend themselves to pathogens; the SAR response causes rapid accumulation of several pathogenesis related proteins (*PR-Protein*).

Through these results we can note the success of SA to induce systemic resistance in inoculated and infected with pathogen. The results showed that the SA depended on SA pathway and is independent from JA/ET pathway because the resistance gene related with SA pathway as *PR-2* and *PR-5* was up-regulated in plants treated with SA and gene resistance related with SA-accumulation as *VSPE, MYC2, PR3* and *PR-4* were down-regulated, the reason may be due to the fact that SA as abiotic elicitors that lead to activate the SAR, which in turn depends on SA pathway.

PR-1, PR-2 and *PR-5* genes considered as markers for systemic acquired resistance (SAR) dependent on salicylic acid (SA) were examined in the shoots and roots of tomato plants infected by root-knot nematodes (RKNs) and, the results showed the expression of genes was up-regulated in plants pre-treated with SA and increased the resistance to pathogen [31].

Conclusion

This study explained, that the RR genome is responsible for disease resistance in oilseed *R. brassica* (AARR) to infection processes of *A. brassicae*, so we recommend that using *R. brassica* as resistance genotype to produce oilseed, and we recommend application of useful resistance biotic and abiotic elicitors for protection and increasing oilseed production is now under the practice of agriculture.

Our study showed that the signaling pathways in oilseed were depended on the type of elicitor. The SA signaling hormonal pathway was activated in the early stage of *R. brassica* after being treated with biotic elicitors, but the JA and ET signaling hormonal pathways were activated in the early stage after treatment with abiotic elicitors.

References

1. Borges, C. E., Von dos Santos Veloso, R., da Conceição, C. A., Mendes, D. S., Ramirez-Cabral, N. Y. Z., Shabani, F., Shafapourtehrany, M., Nery, M. C., & da Silva, R. S. (2023). Forecasting Brassica napus production under climate change with a mechanistic species distribution model. *Sci Rep, 13*, 12656. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38910-3. EDN: https://elibrary.ru/DHJJCL

2. Lu, K., Wei, L., Li, X., et al. (2019). Whole-genome resequencing reveals Brassica napus origin and genetic loci involved in its improvement. *Nature Communications, 10*, 1154. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09134-9. EDN: https://elibrary.ru/ISGZFQ
3. Lange, W. H., Toxopeus, J. H., Lubberts, Dolstra, O., & Harrewijn, J. L. (1989). The development of raparadish Brassica raphanus 2n equals 38, a new crop in Agriculture. *Euphytica, 40*, 1-14.
4. Mandal, S., Rajarammohan, S., & Kaur, J. (2018). Alternaria brassicae interactions with the model Brassicaceae member Arabidopsis thaliana closely resembles those with Mustard (Brassica juncea). *Physiol Mol Biol Plants, 24*(1), 51-59. https://doi.org/10.1007/s12298-017-0486-z
5. Alkooranee, J. T., Yin, Y., Aledan, T. R., Jiang, Y., Lu, G., Wu, J., & Li, M. (2015). Systemic Resistance to Powdery Mildew in Brassica napus (AACC) and Raphanus alboglabra (RRCC) by Trichoderma harzianum TH12. *PLoS ONE, 10*(11). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142177
6. Salwan, R., Sharma, M., Sharma, A., & Sharma, V. (2023). Insights into plant beneficial microorganism-triggered induced systemic resistance. *Plant Stress, 7*, 100140. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100140. EDN: https://elibrary.ru/BALPVT
7. Vicente, M., & Plasencia, J. (2011). Salicylic acid beyond defence: its role in plant growth and development. *Journal of Experimental Botany*, 1-18.
8. Khoso, M. A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T. R., Manghwar, H., & Liu, F. (2024). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress, 11*, 100341. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100341. EDN: https://elibrary.ru/HMMVHH
9. Astapati, A. D., & Nath, S. (2023). The complex interplay between plant-microbe and virus interactions in sustainable agriculture: Harnessing phytomicrobiomes for enhanced soil health, designer plants, resource use efficiency, and food security. *Crop Design, 2*, 100028. https://doi.org/10.1016/j.cropd.2023.100028. EDN: https://elibrary.ru/XJUXCS
10. Cordero, A. P., Vergara, D. E. M., & Mendoza, Y. A. (2023). Production of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase (ACC) by Burkholderia cepacia as an indicator of cadmium contamination. *J. Posit. Sch. Psychol, 7*(1), 1008-1016.
11. Leeman, M., Van Pelt, J. A., Hendrickx, M. J., Scheffer, R. J., Bakker, P. A. H. M., & Schippers, B. (1995). Biocontrol of Fusarium wilt of radish in commercial greenhouse trials by seed treatment with P. fluorescens WCS374. *Phytopathology, 85*, 1301-1305. https://doi.org/10.1094/Phyto-85-1301

12. Nandakumar, R., Babu, S., Viswanathan, R., Raguchander, T., & Samiyappan, R. (2001). Induction of systemic resistance in rice against sheath blight disease by Pseudomonas fluorescens. *Soil Biology and Biochemistry, 33*(4-5), 603-612. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00202-9. EDN: https://elibrary.ru/ZBAFOP
13. Anand, T., Chandrasekaran, A., Kuttalam, S., Raguchander, T., Prakasam, V., & Samiyappan, R. (2007). Association of some plant defense enzyme activities with systemic resistance to early leaf blight and leaf spot induced in tomato plants by azoxystrobin and Pseudomonas fluorescens. *Journal of Plant Interactions, 2*(4), 233-244. https://doi.org/10.1080/17429140701708985
14. Bas, W. M. V., Trotel-Aziz, P., Couderchet, M., Höfte, M., & Aziz, A. (2010). Pseudomonas spp.-induced systemic resistance to Botrytis cinerea is associated with induction and priming of defence responses in grapevine. *Journal of Experimental Botany, 61*(1), 249-260. https://doi.org/10.1093/jxb/erp295. EDN: https://elibrary.ru/NZOCVJ
15. Weller, D. M., Mavrodi, D. V., van Pelt, J. A., Pieterse, C. M., van Loon, L. C., & Bakker, P. A. (2012). Induced systemic resistance in Arabidopsis thaliana against Pseudomonas syringae pv. tomato by 2,4-diacetylphloroglucinol-producing Pseudomonas fluorescens. *Phytopathology, 102*(4), 403-412. PMID: 22409433. https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-11-0222
16. Madhavi, G. B., Devi, G. U., Kumar, K. V. K., Babu, T. R., & Naidu, T. C. M. (2018). Evaluation of Pseudomonas fluorescens and Trichoderma harzianum isolates in inducing systemic resistance (ISR) in maize against Rhizoctonia solani f. sp. Sasakii. *International Journal of Chemical Studies, 6*(2), 628-632.
17. King, E. O., Word, M. K., & Raney, D. E. (1954). To simple media for the demonstration of pyocyamin and fluorescin. *J. Lab. Clin. Med., 414*, 301-307.
18. Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. John Wiley and sons, Inc., London, UK (2nd ed.), pp. 13-175.
19. Ross, A. F. (1961). Systemic acquired resistance induced by localized virus infections in plants. *Virology, 14*, 340-358. https://doi.org/10.1016/0042-6822(61)90319-1
20. Terras, F. R. G., Schoofs, H. M. E., & De Bolle, M. F. C. (1992). Analysis of two novel classes of plant antifungal proteins from radish (Raphanus sativus L.) seeds. *J Biol Chem, 267*, 15301-15309. https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)49534-3
21. De Samblanx, G. W., Goderis, I. J., Thevissen, K., Raemaekers, R., Fant, F., Borremans, F., Acland, D. P., Osborn, R. W., Patel, S., & Broekaert, W. F. (1997). Mutational Analysis of a Plant Defensin from Radish (Raphanus sativus L.) Re-

veals Two Adjacent Sites Important for Antifungal Activity. *The journal of Biological Chemistry, 272*(2), 1171-1179. https://doi.org/10.1074/jbc.272.2.1171

22. Pudjiraharti, S., & Karossi, A. T. A. (2009). Purification and characterization of white radish (Raphanus sativus L. var Long White) peroxidase from culture extract. *Teknologi Indonesia, 32*(2), 91-98.
23. Alkooranee, J. T., Aledan, T. R., Ali, A. K., Lu, G., Zhang, X., Wu, J., Fu, C., & Li, M. (2017). Detecting the Hormonal Pathways in Oilseed Rape behind Induced Systemic Resistance by Trichoderma harzianum TH12 to Sclerotinia sclerotiorum. *PLoS ONE, 12*(1), e0168850. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168850. EDN: https://elibrary.ru/YXMKMN
24. Mercado-Blanco, J., van der Drift, K. M. G. M., Olsson, P. E., Thomas-Oates, J. E., van Loon, L. C., & Bakker, P. A. H. M. (2001). Analysis of the pmsCEAB gene cluster involved in biosynthesis of salicylic acid and the siderophore pseudomonine in the biocontrol strain Pseudomonas fluorescens WCS374. *J. Bacteriol, 183*(6), 1909-1920. https://doi.org/10.1128/JB.183.6.1909-1920.2001
25. Verhagen, B. W., Trotel-Aziz, P., Couderchet, M., Höfte, M., & Aziz, A. (2010). Pseudomonas spp.-induced systemic resistance to Botrytis cinerea is associated with induction and priming of defence responses in grapevine. *J Exp Bot, 61*(1), 249-260. https://doi.org/10.1093/jxb/erp295. EDN: https://elibrary.ru/NZOCVJ
26. Kloepper, J. W., Ryu, C. M., & Zhang, S. (2004). Induced systemic resistance and promotion of plant growth by Bacillus spp. *Phytopathology, 94*, 1259-1266. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1259
27. Leon-Reyes, A., Van der Does, D., De Lange, E. S., Delker, C., Wasternack, C., Van Wees, S. C., Ritsema, T., & Pieterse, C. M. (2010). Salicylate-mediated suppression of jasmonate-responsive gene expression in Arabidopsis is targeted downstream of the jasmonate biosynthesis pathway. *Planta, 232*, 1423-1432. https://doi.org/10.1007/s00425-010-1265-z. EDN: https://elibrary.ru/DCNCRT
28. Niu, D. D., Liu, H. X., Jiang, C. H., Wang, Y. P., Wang, Q. Y., Jin, H. L., & Guo, J. H. (2011). The plant growth-promoting rhizobacteria Bacillus cereus AR156 induces systemic resistance in Arabidopsis thaliana by simultaneously activating salicylate and jasmonate/ethylene-dependent signalling pathways. *Mol Plant Microbe Interact, 24*, 533-542. https://doi.org/10.1094/MPMI-09-10-0213
29. Chitra, K., Ragupathi, N., Dhanalakshmi, K., Mareeshwari, P., Indra, N., Kamalakannan, A., Sankaralingam, A., & Rabindran, R. (2008). Salicylic acid induced systemic resistance on peanut against Alternaria alternata. *Archives of Phytopathology and Plant Protection, 41*(1), 50-56.
30. Sangha, M. K., Atwal, A. K., Sandhu, P. S., Bal, R. S., & Banga, S. S. (2007). Salicylic acid induces resistance to Alternaria blight in crop Brassica species. *Plant protection: Diseases*, 137.

31. Molinari, S., Fanelli, E., & Leonetti, P. (2014). Expression of tomato salicylic acid (SA)-responsive pathogenesis-related genes in Mi-1-mediated and SA-induced resistance to root-knot nematodes. *Mol Plant Pathol, 15*(3), 255-264. https://doi.org/10.1111/mpp.12085. EDN: https://elibrary.ru/WQZBLT

DATA ABOUT THEAUTHOR

Jawadayn Talib Alkooranee

Plant Department, College of Agriculture, Wasit University
Wasit, Iraq
jalkooranee@uowasit.edu.iq
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2997-4637
ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Jawadayn-Alkooranee
Scopus Author ID: 56951124900

Поступила 15.10.2024 Received 15.10.2024
После рецензирования 17.11.2024 Revised 17.11.2024
Принята 30.11.2024 Accepted 30.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1434 **EDN: NAASHI**
УДК 635.044:635.63

CC BY NC ND

Научная статья

КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ РАЗНЫХ ГИБРИДОВ ОГУРЦА (*CUCUMIS SATIVUS* L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРОКА ПЛОДОНОШЕНИЯ И СРОКА ПОСЕВА В ЗАКРЫТОМ ГРУНТЕ

В.А. Гулидова, Р.В. Щучка, В.Л. Захаров, Ю.В. Попов, Б.А. Сотников

Аннотация

Обоснование. В теплицах на территории Липецкой области выращивают огурец, томаты, салат, но огурец является основным овощем в зимнее время, занимая 70-80% площади. В условиях Липецкой области для теплиц 5 поколения недостаточно проведена работа по определению лучшего гибрида, сроков посева и качественных показателей продукции с целью повышения их рентабельности. Современная технология промышленного производства огурца предусматривает выращивание высокоурожайных сортов и гибридов, к которым надо применять передовые инновационные технологии, учитывающие полноту использования всех ресурсов при одновременном снижении материальных затрат, высоком количестве и качестве производимой продукции.

Цель. Целью исследования являлось изучение сравнительной характеристики разных гибридов огурца для теплиц с круглогодичным циклом выращивания по выходу качественной и более дешевой продукции в зависимости от сроков посева в условиях средней полосы России (Липецкая область).

Материалы и методы. Исследования проводили в тепличном комбинате «Елецкие овощи» (Липецкая область). Это современный комплекс теплиц 5 поколения, который строился с учетом самых последних технологических новшеств. Весь технологический процесс выращивания огурца в тепличном комплексе управляется компьютерной системой создания искусственного климата. Выращивали огурец в теплице методом малообъемной гидропоники на минеральной вате с периодической подачей питательного раствора в условиях зимне-весенней культуры. Объектами исследований были перспективные партенокарпические гибриды: длинноплодный гладкий огурец Лоэнгрин, среднеплодный гладкий огурец Мева. В течение 13 недель плодоношения проводили еженедельный учет качественных и количественных показателей урожая. Отмечали плоды высшего, первого, второго, третьего сорта и не кондицию. Ста-

тистическая обработка в опыте проводилась методом дисперсионного анализа по Б.А. Доспехову.

Результаты. Впервые установлено для условий Липецкой области, находящейся в средней полосе России, выращивание современных партенокарпических гибридов огурцов в зимне-весеннем обороте лучше всего высевать в первой десятидневке февраля (6 февраля). Это оптимальный срок посева. За весь период плодоношения (13 недель) сортность продукции огурца сорта Мева (Mewa F_1) наилучшей была при этом сроке посева. Гибрид Лоэнгрин (Lohengrin) имеет свойство в условиях Липецкой области резко ухудшать продукцию к 13 неделе плодоношения, начиная с 10 недели. В сравнении с гибридом Мева высшего качества огурцов было получено меньше на 40,5%, а второго и третьего сорта больше на 37,4 и 3,1%. Выращивание гибрида Мева в сравнении с гибридом Лоэнгрин приводит к увеличению продуктивности теплиц на 3,57 кг/м^2 и удешевлению зеленцов на 1,09 руб/кг.

Заключение. Показана возможность получения продукции защищенного грунта на примере огурца с разным соотношением количества, качества и цены в зависимости от срока плодоношения, срока посева и гибрида. Экономическая результативность показала целесообразность увеличения площади для выращивания среднеплодного гибрида огурца Мева (Mewa F_1), что поспособствует увеличению продуктивности современных теплиц.

Ключевые слова: огурец; закрытый грунт; срок плодоношения; срок посева; сортность; урожайность; гибрид; качество; экономические показатели

Для цитирования. Гулидова, В. А., Щучка, Р. В., Захаров, В. Л., Попов, Ю. В., & Сотников, Б. А. (2025). Качество продукции разных гибридов огурца (*Cucumis sativus* L.) в зависимости от срока плодоношения и срока посева в закрытом грунте. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 350-369. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1434

Original article

PRODUCT QUALITY OF DIFFERENT CUCUMBER HYBRIDS (*CUCUMIS SATIVUS* L.) DEPENDING ON THE FRUITING PERIOD AND SOWING TIME IN GREENHOUSES

V.A. Gulidova, R.V. Schuchka, V.L. Zakharov, Yu.V. Popov, B.A. Sotnikov

Abstract

Background. In greenhouses in the Lipetsk region they grow cucumbers, tomatoes, lettuce, but cucumber is the main vegetable in winter, occupying 70-80%

of the area. In the conditions of the Lipetsk region, for 5th generation greenhouses, insufficient work has been done to determine the best hybrid, sowing dates and quality indicators of products in order to increase their profitability. Modern technology for industrial production of cucumbers involves growing high-yielding varieties and hybrids, to which advanced innovative technologies must be applied, taking into account the full use of all resources while simultaneously reducing material costs, high quantity and quality of manufactured products.

Purpose. The objective of the study was to study the comparative characteristics of different cucumber hybrids for greenhouses with a year-round cultivation cycle in terms of the yield of high-quality and cheaper products depending on the sowing dates in the conditions of central Russia (Lipetsk Region).

Materials and methods. The research was conducted in the greenhouse complex "Eletskie Ovoshi" (Lipetsk region). This is a modern complex of 5th generation greenhouses, which was built taking into account the latest technological innovations. The entire technological process of growing cucumbers in the greenhouse complex is controlled by a computer system for creating an artificial climate. The cucumber was grown in a greenhouse using low-volume hydroponics on mineral wool with periodic supply of nutrient solution in winter-spring crop conditions. The objects of the research were promising parthenocarpic hybrids: long-fruited smooth cucumber Lohengrin, medium-fruited smooth cucumber Meva. During 13 weeks of fruiting, weekly accounting of qualitative and quantitative indicators of the harvest was carried out. Fruits of the highest, first, second, third grade and substandard were noted. Statistical processing in the experiment was carried out by the method of dispersion analysis according to B.A. Dospekhov.

Results. For the first time, it has been established for the conditions of the Lipetsk region, located in the central zone of Russia, that the cultivation of modern parthenocarpic cucumber hybrids in winter-spring rotation is best sown in the first ten days of February (February 6). This is the optimal sowing period. Over the entire fruiting period (13 weeks), the quality of the cucumber variety Mewa (Mewa F1) was the best at this sowing time. The hybrid Lohengrin has a property in the conditions of the Lipetsk region to sharply worsen the production by the 13th week of fruiting, starting from the 10th week. In comparison with the hybrid Meva, 40.5% less top-quality cucumbers were obtained, and 37.4 and 3.1% more of the second and third grades. Growing the hybrid Meva in comparison with the hybrid Lohengrin leads to an increase in greenhouse productivity by 3.57 kg/m2 and a decrease in the price of cucumbers by 1.09 rubles/kg.

Conclusion. The possibility of obtaining protected soil products is shown using cucumber as an example with different ratios of quantity, quality and price depending

on the fruiting period, sowing period and hybrid. Economic efficiency showed the feasibility of increasing the area for growing the medium-fruited cucumber hybrid Mewa (Mewa F1), which will contribute to increasing the productivity of modern greenhouses.

Keywords: Cucumis sativus L.; indoor soil; fruiting period; sowing period; grade; yield; hybrid; quality; economic indicators; Mewa; Lohengrin

For citation. Gulidova, V. A., Schuchka, R. V., Zakharov, V. L., Popov, Yu. V., & Sotnikov, B. A. (2025). Product quality of different cucumber hybrids (*Cucumis sativus* L.) depending on the fruiting period and sowing time in greenhouses. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 350-369. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1434

Введение

В питании человека овощная продукция является необходимой. Как утверждает медицина, овощи человек должен употреблять ежедневно. Согласно рекомендациям Института питания, в России человек должен употреблять 140 кг овощей, а по факту выходит гораздо меньше (92 кг) [1]. Из этого количества не менее 13 кг свежих овощной продукции должно поступать из защищенного грунта [7; 13]. Затраты на покупку овощей в потребительской корзине россиянина незначительные и составляет не более 2,5%, при доли в структуре стоимости питания около 10% [19; 22].

В России, где зимний период занимает много времени, овощи выращивают в теплицах. В закрытом грунте в средней полосе России в основном выращивают огурец, томаты, салат, но огурец, благодаря высокой урожайности и экологической пластичности, является основной овощной культурой в зимнее время [5; 11; 15; 17], который занимает 70-80% зимних теплиц в России [2]. В мире огурец находится на четвертом месте по объему производства овощей [3]. Выращивание огурца в промышленных масштабах определяется многими факторами, и в первую очередь - высокая питательная ценность продукта, хорошие вкусовые качества и лечебные свойства [18], которые благотворно влияют на ЖКТ и сердечно-сосудистую систему. И это не отрицается медицинской наукой [4].

В настоящее время огурец в рацион питания человека в России попадает двумя путями - импорт из Турции, Испании, Нидерландов, Китая [16] и выращивание в местном закрытом грунте, то есть в зимних теплицах. Для того чтобы перейти на самообеспечение, отказавшись от импорта, по данным Минсельхоза, в России нужно дополнительно построить 1576 га современных теплиц с урожайностью не менее 50 кг/м^2 [20].

В Липецкой области тепличный огурец пользуется большим спросом, но помимо этого продукта тепличные комбинаты региона выращивают

и другие овощи – томаты, салат, баклажаны, выгонка лука на зелень. Тепличные комбинаты функционируют в Елецком, Хлевенском, Усманском и Данковском районах. Общая площадь под теплицами с круглогодичным циклом выращивания в этих зонах занимает более 260 гектаров. Катализатором развития тепличного хозяйства в регионе послужили внутренние проблемы в масштабах области и страны (пандемия коронавируса, санкции и торговое эмбарго в отношении враждебных стран) [12].

Современная технология промышленного производства огурца предусматривает выращивание высокоурожайных сортов и гибридов, к которым надо применять передовые инновационные технологии. Эти инновации должны распространяться на сферу достаточного ресурсного использования, при одновременном сокращении материальных затрат, увеличения количества и улучшения качества производимой продукции [23]. При этих слагаемых производство овощей в теплицах будет конкурировать с открытым грунтом, а сами теплицы будут рентабельно развиваться. Пример тому функционирование теплиц в Нидерландах [21; 24].

В настоящее время товаропроизводители тепличной продукции во всех регионах России имеют возможность широкого выбора сортов и гибридов, чтобы выращивать в теплицах. Этот выбор огромен и каждый год пополняется все новыми сортами и гибридами. Урожайность огурцов в зависимости от сорта и условий выращивания, даже в странах с развитым тепличным производством в современных теплицах имеет сильную вариацию от 3-6 до 10-30 кг/м^2 при оптимальных показателях микроклимата [25]. Это указывает на то, что сорт не потерял свою актуальность и является основным элементом интенсификации технологии в защищенном грунте, поэтому необходимо проводить сортоиспытание как отечественных гибридов, так и иностранных, чтобы выявить, какие гибриды показывают лучшие результаты [8; 16].

Целью настоящего исследования являлось изучение сравнительной характеристики разных гибридов огурца для теплиц с круглогодичным циклом выращивания по выходу качественной и более дешевой продукции в зависимости от сроков посева в условиях средней полосы России (Липецкая область).

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на базе тепличного комбината «Елецкие овощи», находящегося в Елецком районе Липецкой области в течении 2022-2023 гг. Это современный комплекс теплиц 5 поколения, ориентированный на получение высокой урожайности с минимальными энергозатратами. Весь технологический процесс выращивания огурца в тепличном ком-

плексе управляется компьютерной системой создания искусственного климата. Выращивали огурец в теплице методом малообъемной гидропоники на минеральной вате в условиях зимне-весенней культуры. Практика показала, что она идеально подходит для всех современных технологий гидропонного выращивания культур. В кубиках из минеральной ваты выращивали рассаду, а блоки и маты идеально подходят для дальнейшего роста растений до самого сбора урожая.

Площадь теплиц комбината «Елецкие овощи» составляет 60 га. В эту площадь входят производственные блоки по выращиванию огурца, рассадное отделение. В теплице имеются специализированные рукава, направленные на подачу воздуха внутрь теплицы, что способствует идеальному микроклимату, который необходим для получения дополнительного высокого урожая (до 15%), так как растения развиваются в требуемой среде.

В «Елецких овощах» выращивают три коммерческие культуры: огурец, томаты, салат. Для стимулирования роста и развития растений в зимний период на комбинате используется система искусственного освещения. Освещенность составляет 230W на $м^2$, что равнозначно приблизительно 30 тыс. lux.

Все необходимые показатели датчиков и работы автоматизированных систем отображаются на мониторах в операторской, где под контролем температура, влажность, уровень CO_2, уровень освещенность и тепла, также показатели EC растворов, которые поступают для питания растений.

Объектами исследований были гибриды огурца первого поколения: длинноплодный гладкий огурец Лоэнгрин *(Lohengrin F_1),* среднеплодный гладкий огурец Мева (*Mewa F_1*) [10]. Ниже приводится их краткая характеристика. Учеты и наблюдения проводили в соответствии с принятыми методиками в современном овощеводстве [9]. В течение 13 недель плодоношения проводили еженедельный учет качественных показателей урожая. Отмечали плоды высшего, первого, второго, третьего сорта и не кондицию. Статистическая обработка в опыте проводилась методом дисперсионного анализа по Б.А. Доспехову [6].

Результаты исследований и их обсуждение

Огурец (*Cucumis sativus L.*) – однолетнее овощное растение семейства Тыквенные [10,14]. Главный корень-стержневой, стебель длиной 8-10м, листья очередные. Цветки мужские и женские, пазушные, одиночные или собранные в соцветие щиток. Плоды - многосемянная сочная тыква, разнообразны по величине и форме, семена удлиненные, с толстой кожурой. Гибридные сорта Мева и Лоэнгрин принадлежат к группе партенокарпических и не прихотли-

вы в выращивании. Для получения плодов не нужно использовать пчел для опыления растений. Даже в этих условиях оба гибрида отличаются хорошей урожайностью и интенсивным образованием плодов на протяжении периода вегетации в 13 недель плодоношения, принятых на «Елецких овощах».

Окраска листьев у огурца Мева интенсивно зеленая и сами листья крупные. Плоды цилиндрической формы, темно-зеленые и массой, варьирующей от 180 до 250 г (табл. 1). Назначение огурца - употребление в свежем виде. Это превосходный огурец для салата. Включен в Госреестр по 1-ой и 3-ей световым зонам для выращивания в теплицах.

Таблица 1.

Характеристика гибрида огурца Мева (*Mewa F1*)

Созревание	Раннее
Масса, окраска и форма плода	Зеленец длинный, цилиндрический, гладкий, темно-зеленый, массой 180-210 г
Срок вступления в плодоношение	На 55-61 день после полных всходов
Размеры плода	Длина плода меняется в течение плодоношения: в начале вегетации 17-20 см, в конце 20-25см
Подтип, назначение	Партенокарпический, салатный
Основные недостатки	Огурец Мева имеет среднюю устойчивость к мучнистой росе.
Конкурентоспособность	Включен Госреестр селекционных достижений в 2011 году по 1-ой и 3-ей световым зонам для выращивания в зимне-весеннем обороте
Основные достоинства	Высокоурожайный, теневыносливый гибрид для выращивания на светокультуре. Обладает высокой регенеративной способностью. Устойчив к кладоспориозу и вирусу огуречной мозаики (ВОМ).
Оборот	Летне-осенний

Если гибрид Мева хорошо ветвится, то Лоэнгрин слабоветвистое растение, у которого в основном присутствуют женские цветки. В сравнении с гибридом Мева у Лоэнгрин лист более маленький и меньше женских цветков в узле (1 против 2). Но для этого гибрида характерно более раннее плодоношение, которое начинается уже в среднем на 40-й день (38-50) после полных всходов (табл. 2). Плоды длиннее на 10 см, чем у гибрида Мева и составляют в среднем 30-35 см (рис. 1)**.** Лоэнгрин предназначен для светокультуры с освещенностью более 15.000 Люкс. Благодаря высокой товарности, отличным вкусовым качествам и хорошей транспортабельности гибридные сорта Мева и Лоэнгрин успешно используются для коммерческого выращивания.

Таблица 2.

Характеристика гибрида огурца Лоэнгрин (*Lohengrin F1*)

Созревание	Среднераннее
Масса, окраска и форма плода	Плод удлиненно-цилиндрический, темно-зеленого цвета, с очень маленькими полосами, гладкий слегка ребристый. Масса зеленца 240 г.
Срок вступления в плодоношение	На 38-50 день после полных всходов
Размеры плода	Плоды одинаковой длины (30-35 см), которая в течение всего срока плодоношения остается постоянной
Подтип, назначение	Партенокарпический, салатный
Конкурентоспособность	Гибрид включен в Госреестр для выращивания в зимнем обороте на светокультуре в зимних стеклянных теплицах в 2015 году во всех регионах России
Основные достоинства	Высокий выход стандартных зеленцов, хорошая завязываемость, практически отсутствует сброс завязи, высокая устойчивость к мучнистой росе, низкая повреждается ВЗКМО.
Оборот	Зимне-весенний, летне-осенний





Рис. 1. Слева гибрид Лоэнгрин, справа – Мева

В плодоношение сорт Мева в наших условиях вступает на 55-60 день после полных всходов. Общий период плодоношения составляет 13 недель. На первой неделе плодоношения были получены зеленцы самого высокого качества: высший сорт составил 97,2%, первый сорт отсутствовал, второй сорт - 2,4% и третий сорт – 0,4% (табл. 3).

Таблица 3.

Сортность продукции огурца сорта Мева в зависимости от срока плодоношения и срока посева (06.02-05.05)

Неделя плодоношения	Сортность продукции,%			
	Высший сорт	Первый сорт	Второй сорт	Третий сорт
Первая	97,2	0	2,4	0,4
Вторая	93,4	0	3,2	3,4
Третья	95,2	0	4,2	0,6
Четвертая	95,2	0	4,5	0,3
Пятая	93,2	0	6,5	0,3
Шестая	92,0	0	7,4	0,6
Седьмая	87,3	0	12,0	0,7
Восьмая	88,5	0	10,8	0,7
Девятая	91,3	0	8,2	0,5
Десятая	90,3	0	9,2	0,5
Одиннадцатая	89,2	0	9,5	1,3
Двенадцатая	85,9	0	12,9	1,2
Тринадцатая	85,6	0	13,1	1,3
$НСР_{05}$	2,4	0	2,6	0,9
В среднем за 13 недель плодоношения	91,1	0	8,0	0,9

В течение первых 6 недель плодоношения сбор плодов высшего качества был самый высокий и варьировал в интервале от 97,2 до 92,0%. Но начиная с седьмой неделе плодоношения наблюдалось снижение качества плодов, особенно уменьшилась продукция высшего сорта (87,3%) и значительно возросла продукция второго сорта (12,0%). В последующие недели плодоношения продукция высшего сорта постепенно уменьшалась, причем плавно, без резких скачков. В конце 13 недели плодоношения зеленцов высшего сорта было получено на 11,6%, второго сорта – на 10,7% и третьего сорта – на 0,9% меньше в сравнении с первой неделей плодоношения. В среднем за весь период плодоношения сортность продукции огурца сорта

Мева в зависимости от срока плодоношения и срока посева (06.02-05.05) составила: высшего сорта – 91,1% второго – 8,0%, третьего сорт – 0,9%. Длина плода составила 18-20 см в начале вегетации и 20-24 см – в конце вегетации. Во второй половине периода выращивания у гибридного сорта Мева сохранялась высокая стандартность плодов. Они были одинакового объема по всей длине плода с ярко выраженной зеленой окраской.

Сортность продукции огурца сорта Мева в зависимости от срока посева (25.01-30,04) показана в табл. 4. Отмечаем, что продукция более высоко качества была получена также на первой неделе плодоношения и составила 99,5%. Первый и второй сорт практически отсутствовал и третий сорт был в незначительном количестве 0,47%.

Таблица 4.

Сортность продукции огурца сорта Мева в зависимости от срока плодоношения и срок посева (25.01-30.04)

Неделя плодоношения	Сортность продукции, %			
	Высший сорт	Первый сорт	Второй сорт	Третий сорт
Первая	99,5	0	0,02	0,47
Вторая	93,5	0	2,9	3,6
Третья	95,0	0	4,3	0,7
Четвертая	93,7	0	5,4	0,9
Пятая	96,2	0	3,4	0,4
Шестая	91,7	0	7,4	0,9
Седьмая	86,5	0	12,2	1,3
Восьмая	82,9	0	15,3	1,8
Девятая	89,4	0	9,1	1,5
Десятая	86,8	0	11,3	1,9
Одиннадцатая	84,9	0	12,8	2,3
Двенадцатая	81,3	0	16,6	2,1
Тринадцатая	73,4	0	24,0	2,6
$НСР_{05}$	2,7	0	3,1	1,3
В среднем за 13 недель плодоношения	88,8	0	9,6	1,6

При посеве огурца в третьей десятидневке (25 января) в наших условиях в сравнении со сроком посева 6 февраля, начиная с 7 недели плодоношения значительно снижается выход продукции высшего качества (86,5%) и увеличивается продукция второго сорта (12,2%). Уменьшение сортности

больше всего сказывается на цене огурца, она снижается. За весь период плодоношения сортность продукции огурца сорта Мева наилучшей была при посеве 6 февраля. В сравнении с посевом 25 января ухудшение качества продукции составило: высшего сорта на 2,3%, второго – на 1,6%, третьего сорта – на 0,7%. Снижение количества и ухудшение качества продукции - прямое влияние недостаточности освещения, которая в условиях Елецкого района является одним из ограничивающих факторов, препятствующих образованию достойного урожая.

В «Елецких овощах» выращивают и другой гибридный сорт Лоэнгрин. В исследованиях провели сравнительное изучение качества продукции этого сорта. Отмечаем, что наиболее качественная продукция была со 2-ой неделе плодоношения, тогда как у сорта Мева с 1-ой недели. Выход высшего сорта составил 96,9% второго сорта – 1,6% и третьего – 1,5%. Тогда как на 1-ой неделе плодоношения эти показатели были значительно ниже на 6,4% (высший сорт) и 6,4 % (второй сорт). До 7-ой недели плодоношения качество зеленцов было высоким, высший сорт варьировал от 96,3 до 90,1% Но начиная с 8-ой недели плодоношения резко увеличивается выход огурцов второго сорта. В сравнении со 2-ой неделей плодоношения этот показатель был больше на 8,7% (табл. 5).

Этот гибрид имеет свойство в наших условиях резко ухудшать продукцию к 13-ой неделе плодоношения. В сравнении с гибридом Мева высшего качества огурцов было получено меньше на 40,5%, а второго сорта больше на 37,4%.

В целом за весь цикл плодоношения при выращивании гибрида Лоэнгрин было получено 82,2 % огурцов высшего качества, 15,6% – второго и 2,2% – третьего сорта. В сравнении с гибридом Мева эти показатели за тот же период были ниже на 8,9%,7,6 и 1,3%.

Выход готовой продукции огурца при выращивании в зимних теплицах зависит от ряда биотических и абиотических факторов, включая температуру, освещенность, доступность питательных веществ и влаги, интегрированную защиту от вредных организмов, а также правильный подбор сортов и гибридов, адаптированных для выращивания в регулируемых условиях современных теплиц. Урожайность является главным критерием сорта или гибрида, отражающим эффективность вышеперечисленных факторов. В условиях Липецкой области наиболее урожайным гибридом огурца является Мева. С 1 м^2 было получено 55,46 кг зеленцов, что на 3,57 кг/м^2 больше, чем при выращивании гибрида Лоэнгрин. Разница в урожайности связана с их биологией.

Таблица 5.

Сортность продукции огурца сорта Лоэнгрин в зависимости от срока плодоношения и срок посева (11.02-16.05)

Неделя плодоношения	Сортность продукции, %			
	Высший сорт	Первый сорт	Второй сорт	Третий сорт
Первая	90,5	0	8,0	1,5
Вторая	96,9	0	1,6	1,5
Третья	96,3	0	2,2	1,5
Четвертая	92,4	0	6,4	1,2
Пятая	94,2	0	4,4	1,4
Шестая	93,7	0	4,6	1,7
Седьмая	90,1	0	7,7	2,2
Восьмая	87,0	0	10,3	2,7
Девятая	84,7	0	13,0	2,3
Десятая	71,0	0	27,0	2,0
Одиннадцатая	68,6	0	28,4	3,0
Двенадцатая	57,6	0	39,2	3,2
Тринадцатая	45,1	0	50,5	4,4
$НСР_{05}$	2,9	0	3,6	1,5
В среднем за 13 недель плодоношения	82,2	0	15,6	2,2

Производство тепличных огурцов является трудоемким процессом. В структуре основных операционных расходов до 50% занимают затраты на теплоснабжение, что связано с холодным климатом региона, а также значительные затраты приходятся на рабочую силу (не менее 25%). Выращивание гибрида Мева обходится дешевле на 1,09 руб/кг (табл.6).

Таблица 6.

Экономическая эффективность производства огурца в тепличном комбинате «Елецкие овощи» (в ценах 2023 г.)

Показатель	Гибрид огурца	
	Лоэнгрин	Мева
Урожайность, кг/м^2	51,89	55,46
Себестоимость, кг/руб	41,37	40,28
Средняя цена реализации, руб/кг	83,86	83,55
Рентабельность, %	50,67	51,79

Рентабельность огурца составила 51,79% (Мева) и 50,67% (Лоэнгрин). Оценка экономических показателей показала, что рентабельность произ-

водства партенокарпических гибридов огурцов во многом зависела от количества и качества продукции, а именно, от ее сортности, напрямую влияющую на покупательную способность выращенного продукта.

Заключение

В условиях Липецкой области, находящейся в средней полосе России, выращивание современных партенокарпических гибридов огурцов в зимне-весеннем обороте лучше всего высевать в первой десятидневке февраля (6 февраля). Это оптимальный срок посева. За весь период плодоношения (13 недель) сортность продукции огурца сорта Мева наилучшей была при этом сроке посева. В сравнении с посевом 25 января качественные показатели продукции были больше высшего сорта на 2,3%, а второго и третьего сорта меньше – на 1,6 и 0,7% соответственно.

Гибрид Лоэнгрин имеет свойство в наших условиях резко ухудшать продукцию к 13 неделе плодоношения, начиная с 10 недели плодоношения. В сравнении с гибридом Мева высшего качества огурцов было получено меньше на 40,5%, а второго и третьего сорта больше на 37,4 и 3,1%. С учетом экономических показателей, а именно рентабельности производства, более прибыльно выращивать гибрид Мева. С 1 м^2 было получено 55,46 кг зеленцов, что на 3,57 кг/м^2 больше, чем при выращивании гибрида Лоэнгрин. Выращивание гибрида Мева обходится дешевле на 1,09 руб./кг.

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

Список литературы

1. Агропромышленный комплекс России в 2018 г.: статистический сборник. (2019). Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. 554 с.
2. Ахатов, А. К. (2011). Огурцы и томаты в теплицах. *Приложение к журналу «Защита и карантин растений»*, 2, 70-115.
3. Воробьев, М. В., Богданова, В. Д., & Федоров, Д. А. (2021). Ежедневный мониторинг изменений веса растений огурца в современном высокотехнологичном тепличном комплексе. В *Овощеводство — от теории к практике: практика использования инновации в овощеводстве* (с. 26-31). Кубанский ГАУ им. И. Т. Трубилина. EDN: https://elibrary.ru/klwmpz
4. Гиш, Р. А., & Гикало, Г. С. (2012). *Овощеводство Юга России*. ЭДВИ. 632 с.
5. Горлов, В. И. (2024). Мозаика огурцов (CUCUMBER MOSAIC). В *Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных агротехнологий* (Т. 1, с. 76-81). РГАТУ.

6. Доспехов, Б. А. (2011). *Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Альянс. 350 с.
7. Котов, В. П., & Адрицкая, Н. А. (Ред.). (2019). *Овощеводство*. Лань. 496 с. ISBN: 978-5-8114-4188-4. URL: http://e.lanbook.com/book/115728 EDN: https://elibrary.ru/pcccyw
8. Кудияров, Р. И., Дямуршаева, Э. Б., Уразбае, Н. Ж., Сауытбаева, Г. З., Дямуршаева, Г. Е., & Нурпеисова, А. А. (2015). Влияние сроков посева на продуктивность огурцов в зимних теплицах Приаралья. *Современные проблемы науки и образования*, 2-1. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=21294 EDN: https://elibrary.ru/uhxhtx
9. Литвинов, С. С. (2008). *Научные основы современного овощеводства*. Москва: Россельхозакадемия. 771 с. URL: http://vniioh.ru EDN: https://elibrary.ru/vxpyyr
10. Портянкин, А. Е., Шамшина, А. В. (2010). *Огурец: от посева до урожая*. Под общ. ред. С. Ф. Гавриша. Москва: ООО «Гибридные семена "Гавриш"» для НП НИИОЗГ «Фитон+». 400 с. ISBN: 978-5-93457-306-6 EDN: https://elibrary.ru/qlallp
11. Павленко, В. Н., Звонкова, И. Ю., Павленко, В. И. (2018). Научные основы современных технологий возделывания огурца в южных регионах России. *Природообустройство*, 1, 89-93. https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-1-89-93 EDN: https://elibrary.ru/yukezz
12. Предпосылки к строительству новых теплиц в России [Электронный ресурс]. URL: https://www.promgidroponica.ru/tepl_v_rossii
13. Пуць, Н. М. (2018). Инновационные агроприемы для зимних теплиц. *Сельскохозяйственные вести*, 2(113), 32-34.
14. Русанов, Б. Г. (2000). *Огурцы*. Санкт-Петербург: Агропромиздат. С. 8-27.
15. Сапега, В. А. (2016). Параметры продуктивности и экологической устойчивости сортов и гибридов огурцов в открытом грунте. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*, 1(39), 48-51. https://doi.org/10.12737/19322 EDN: https://elibrary.ru/waojtz
16. Федоров, Д. А., Богданова, В. Д., Фильцына, Ю. Г., Воробьев, М. В. (2021). Сортоиспытание огурца F1 Киборг и F1 Баварец при выращивании в защищенном грунте на светокультуре. *Овощи России*, 2, 45-50. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-2-45-50 EDN: https://elibrary.ru/jqimya
17. Ушанов, А. А., Ульянов, Р. А., Миронов, А. А. (2022). Оценка гетерозиса в реципрокных скрещиваниях инбредных линий партенокарпического огурца (Cucumis sativus L.). *Овощи России*, 1, 19-23. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-1-19-23 EDN: https://elibrary.ru/picqpn

18. Федоров, Д. А., Воробьев, М. В. (2020). Сортоиспытание огурца F1 Киборг при выращивании в защищенном грунте на светокультуре. В *Растениеводство и луговодство*: сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 18-19 октября 2020 года (с. 565-569). Москва: ЭйПиСиПаблишинг. https://doi.org/10.26897/978-5-9675-1762-4-2020-125 EDN: https://elibrary.ru/gbuufx
19. Чазова, И. Ю. (2017). Зарубежный опыт устойчивого развития рынка овощей защищенного грунта. *Молочнохозяйственный вестник*, 1(25), 187-202.
20. Шарипов, Ш. И., Ибрагимова, Б. Ш. (2018). Тепличное овощеводство России: тенденции развития и пути государственного регулирования. *Экономический анализ: теория и практика*, 17(12), 1340-1355. https://doi.org/10.24891/ea.17.12.1340 EDN: https://elibrary.ru/vohpki
21. Gerritsen, A. L., Stuiver, M., & Termeer, C. J. A. M. (2012). *Knowledge governance for sustainable economic development: models for organising and enabling knowledge networks*. Paper for the Expert Group Meeting on Knowledge Networking and Network Governance, Vienna, 18 September 2012. United Nation Industrial Development Organizations & the Leuven Centre for Global Governance.
22. Diansheng, D. D., & Dong, B-H. L. *Fruit and Vegetable Consumption by Low-Income America: Would a Price Reduction Make a Difference?* [Электронный ресурс]. URL: https://www.iatp.org/files/258_2_106046.pdf
23. Rodica, S., Apahidean, S. A., Apahidean, M., Maniuţiu, D., & Paulette, L. (2015). Yield, physical and chemical characteristics of greenhouse grown on soil and organic substratum. In *43rd Croatian and 3rd International Symposium on Agriculture* (pp. 439-443). URL: https://www.researchgate.net/publication/238690690
24. Schiefer, G. (Ed.). (2009). *Proceedings of the 3rd International European Forum on System Dynamics and Innovation in Food Networks*. International Center for Food Chain and Network Research, University of Bonn, Germany. Innsbruck-Igls, Austria, February 16-20, 2009 (pp. 17-24).
25. *Vegetables and Pulses Yearbook Data* (2017). [Электронный ресурс]. URL: https://www.ers.usda.gov/data-products/vegetables-and-pulses-data/vegetables-and-pulses-yearbook-tables

References

1. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. (2019). *Agricultural and industrial complex of Russia in 2018: statistical collection*. 554 p.
2. Akhatov, A. K. (2011). *Cucumbers and tomatoes in greenhouses*. Supplement to the journal “Protection and quarantine of plants”, *2*, 70-115.

3. Vorobiev, M. V., Bogdanova, V. D., & Fedorov, D. A. (2021). Daily monitoring of changes in the weight of cucumber plants in a modern high-tech greenhouse complex. In *Vegetable growing — from theory to practice: practice of using innovations in vegetable growing* (pp. 26-31). Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin. EDN: https://elibrary.ru/klwmpz
4. Gish, R. A., & Gikalov, G. S. (2012). *Vegetable growing in the South of Russia*. EDVI. 632 p.
5. Gorlov, V. I. (2024). Cucumber mosaic (CUCUMBER MOSAIC). In *Ecological state of the natural environment and scientific and practical aspects of modern agrotechnologies* (Vol. 1, pp. 76-81). Ryazan State Agrotechnological University.
6. Dospokhov, B. A. (2011). *Methodology of field experiment: (with the basics of statistical processing of research results)*. Alliance. 350 p.
7. Kotov, V. P., & Adritskaya, N. A. (Eds.). (2019). *Vegetable growing*. Lan'. 496 p. ISBN: 978-5-8114-4188-4. URL: http://e.lanbook.com/book/115728 EDN: https://elibrary.ru/pcccyw
8. Kudiyarov, R. I., Dyamurshaeva, E. B., Urazbaev, N. Zh., Sabytova, G. Z., Dyamurshaeva, G. E., & Nurpeisova, A. A. (2015). Effect of sowing dates on the productivity of cucumbers in winter greenhouses of the Aral Sea region. *Modern problems of science and education*, *2-1*. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=21294 EDN: https://elibrary.ru/uhxhtx
9. Litvinov, S. S. (2008). *Scientific foundations of modern vegetable growing*. Moscow: Rossselkhozakademia. 771 p. URL: http://vniioh.ru EDN: https://elibrary.ru/vxpyyr
10. Portyankin, A. E., & Shamshina, A. V. (2010). *Cucumber: from sowing to harvest*. Ed. S. F. Gavrish. Moscow: OOO "Hybrid seeds "Gavrish"" for NP NIIOZG "Fiton+". 400 p. ISBN: 978-5-93457-306-6 EDN: https://elibrary.ru/qlallp
11. Pavlenko, V. N., Zvonkova, I. Yu., Pavlenko, V. I. (2018). Scientific foundations of modern cucumber cultivation technologies in the southern regions of Russia. *Land management*, *1*, 89-93. https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-1-89-93 EDN: https://elibrary.ru/yukezz
12. *Prerequisites for the construction of new greenhouses in Russia* [Electronic resource]. URL: https://www.promgidroponica.ru/tepl_v_rossii
13. Putz, N. M. (2018). Innovative agricultural techniques for winter greenhouses. *Agricultural News*, *2(113)*, 32-34.
14. Rusanov, B. G. (2000). *Cucumbers*. Saint Petersburg: Agropromizdat. Pp. 8-27.
15. Sapega, V. A. (2016). Parameters of productivity and ecological sustainability of cucumber varieties and hybrids in the open field. *Bulletin of the Kazan State*

Agrarian University, *1(39)*, 48-51. https://doi.org/10.12737/19322 EDN: https://elibrary.ru/waojtz

16. Fedorov, D. A., Bogdanova, V. D., Filtsyna, Yu. G., Vorobiev, M. V. (2021). Variety testing of cucumber F1 Kiborg and F1 Bavarets when grown in protected ground on light culture. *Vegetables of Russia*, *2*, 45-50. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-2-45-50 EDN: https://elibrary.ru/jqimya
17. Ushanov, A. A., Ulyanov, R. A., Mironov, A. A. (2022). Evaluation of heterosis in reciprocal crosses of inbred lines of parthenocarpic cucumber (Cucumis sativus L.). *Vegetables of Russia*, *1*, 19-23. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-1-19-23 EDN: https://elibrary.ru/picqpn
18. Fedorov, D. A., Vorobiev, M. V. (2020). Variety testing of cucumber F1 Kiborg when grown in protected ground on light culture. In *Plant growing and haymaking: collection of articles of the All-Russian scientific conference with international participation, Moscow, October 18-19, 2020* (pp. 565-569). Moscow: EPC Publishing. https://doi.org/10.26897/978-5-9675-1762-4-2020-125 EDN: https://elibrary.ru/gbuufx
19. Chazova, I. Yu. (2017). Foreign experience of sustainable development of the market of vegetables in protected ground. *Dairy industry bulletin*, *1(25)*, 187-202.
20. Sharipov, Sh. I., Ibragimova, B. Sh. (2018). Greenhouse vegetable growing in Russia: development trends and ways of state regulation. *Economic analysis: theory and practice*, *17(12)*, 1340-1355. https://doi.org/10.24891/ea.17.12.1340 EDN: https://elibrary.ru/vohpki
21. Gerritsen, A. L., Stuiver, M., & Termeer, C. J. A. M. (2012). *Knowledge governance for sustainable economic development: models for organising and enabling knowledge networks*. Paper for the Expert Group Meeting on Knowledge Networking and Network Governance, Vienna, 18 September 2012. United Nation Industrial Development Organizations & the Leuven Centre for Global Governance.
22. Diansheng, D. D., & Dong, B-H. L. *Fruit and Vegetable Consumption by Low-Income America: Would a Price Reduction Make a Difference?* [Электронный ресурс]. URL: https://www.iatp.org/files/258_2_106046.pdf
23. Rodica, S., Apahidean, S. A., Apahidean, M., Maniuţiu, D., & Paulette, L. (2015). Yield, physical and chemical characteristics of greenhouse grown on soil and organic substratum. In *43rd Croatian and 3rd International Symposium on Agriculture* (pp. 439-443). URL: https://www.researchgate.net/publication/238690690
24. Schiefer, G. (Ed.). (2009). *Proceedings of the 3rd International European Forum on System Dynamics and Innovation in Food Networks*. International Center

for Food Chain and Network Research, University of Bonn, Germany. Innsbruck-Igls, Austria, February 16-20, 2009 (pp. 17-24).

25. *Vegetables and Pulses Yearbook Data* (2017). [Электронный ресурс]. URL: https://www.ers.usda.gov/data-products/vegetables-and-pulses-data/vegetables-and-pulses-yearbook-tables

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Гулидова Валентина Андреевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
Guli49@yandex.ru

Щучка Роман Викторович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
Romanelez@yandex.ru

Захаров Вячеслав Леонидович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
zaxarov7979@mail.ru

Попов Юрий Владимирович, аспирант
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
yuriy_popov_0@mail.ru

Сотников Борис Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, Липецкая область, 399770, Российская Федерация
agro.elsu@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Valentina A. Gulidova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products
Yelets State University named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation
Guli49@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7585-0956

Roman V. Shchuchka, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products
Yelets State University named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation
Romanelez@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1011-5413

Vyacheslav L. Zakharov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products
Yelets State University named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation
zaxarov7979@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4891-658X

Yuri V. Popov, graduate student
Yelets State University named after I.A. Bunin

28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation
yuriy_popov_0@mail.ru

Boris A. Sotnikov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products
Yelets State University named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, Lipetsk region, 399770, Russian Federation
agro.elsu@mail.ru

Поступила 08.07.2024 Received 08.07.2024
После рецензирования 23.10.2024 Revised 23.10.2024
Принята 16.11.2024 Accepted 16.11.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1106 **EDN: LLNVQY**
UDC 633.85

Original article

CULTIVATION OF SUNFLOWER HYBRIDS DEPENDING ON TREATMENT WITH AGROCHEMICALS IN CONDITIONS OF THE SOUTHERN PART OF THE NON-BLACK EARTH REGION OF THE RUSSIA

D.V. Lebedev, D.V. Vinogradov, T.V. Zubkova, M.P. Makarova

Abstract

Background. For the first time in conditions of the southern Non-Black Earth Region, comprehensive researches were carried out to study the influence of microbiological fertilizers Phosphatovite, Baikal EM, Azotovite on the productivity of promising hybrids NK Neoma, SI Bacardi in conditions of a training experimental field of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev, Ryazan region, Russia.

Purpose. The purpose of the work was to identify the efficiency of agrochemicals in agrocenoses of various sunflower hybrids in conditions of Ryazan region.

Materials and methods. The two-factor field experiment was launched in 2022 and 2023. The studies were carried out according to the experimental design: 1. Control (without treatment); 2. Microbiological fertilizer Phosphatovite; 3. Microbiological fertilizer Baikal EM; 4. Microbiological fertilizer Azotovite.

Results. The average yield of sunflower seeds in options with hybrid SI Bacardi was lower (23.4-26.4 dt/ha) than in hybrid NK Neoma (24.0-26.8 dt/ha). On average, the maximum yield was found for the option with the action of Azotovite, 1 l/ha on plots with hybrid NK Neoma, and amounted to 26.8, which was 2.8 dt/ha more than the control option. Qualitative analysis of seeds showed that the microbiological fertilizers used did not significantly affect the oil content of sunflower. Let us highlight the higher oil content of hybrid SI Bacardi: 47.4-49.3%, which was 1.5-2% higher than that of hybrid NK Neoma. The maximum fat yield was obtained in options NK Neoma + Azotovite (1 230.1 kg/ha) and SI Bacardi + Baikal EM (1

258.0 kg/ha), where the indicator depended mainly on seed productivity. The maximum oil content was obtained with Phosphatovite + SI Bacardi option (49.3%).

Conclusion. In the conditions of the Ryazan district of the Ryazan region, it is recommended to grow sunflower hybrids SI Bacardi, NK Neoma with the use of microbiological fertilizers Azotovit, Phosphatovit and Baikal EM in culture cultivation technology as seed treatment before sowing and application during the growing season in the period of 4-8 real leaves.

Keywords: sunflower; hybrid; variety; agrochemicals; microfertilizers; yield; quality; oil content

For citation. Lebedev, D. V., Vinogradov, D. V., Zubkova, T. V., & Makarova, M. P. (2025). Cultivation of sunflower hybrids depending on treatment with agrochemicals in conditions of the southern part of the Non-Black Earth Region of the Russia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 370-386. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1106

Научная статья

ВЫРАЩИВАНИЕ ГИБРИДОВ ПОДСОЛНЕЧНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБРАБОТКИ АГРОХИМИКАТАМИ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ

Д.В. Лебедев, Д.В. Виноградов, Т.В. Зубкова, М.П. Макарова

Аннотация

Обоснование. Впервые в условиях южного Нечерноземья, проведены комплексные исследования по изучению влияния микробиологических удобрений Фосфатовит, Байкал ЭМ, Азотовит на продуктивность перспективных гибридов НК Неома, СИ Бакарди в условиях учебного опытного поля Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev, Рязанской области, Россия.

Цель. Цель исследования – выявить эффективность действия агрохимикатов в агроценозах различных гибридов подсолнечника в условиях Рязанской области.

Материалы и методы. Полевой двухфакторный опыт был заложен в 2022 и 2023 годах. Исследования проводили согласно схеме опыта: 1.Контроль (без обработки); 2. Микробиологическое удобрение Фосфатовит; 3. Микробиологическое удобрение «БайкалЭМ»; 4. Микробиологическое удобрение Азотовит.

Результаты. В среднем, урожайность семян подсолнечника на вариантах с гибридом СИ Бакарди была ниже (23,4-26,4 ц/га), чем по гибриду НК Неома (24,0-26,8 ц/га). В среднем, максимальная урожайность выявлена по варианту с действием Азотовит, 1 л/га на делянках с гибридом НК Неома, и составила 26,8, что на 2,8 ц/га больше контрольного варианта. Качественный анализ семян показал, что применяемые микробиологические удобрения существенно не оказали влияние на масличность подсолнечника. Выделим более высокую масличность по гибриду СИ Бакарди 47,4-49,3%, что на 1,5-2% выше, чем у НК Неома. Максимальный выход жира получен на вариантах НК Неома + Азотовит (1230,1 кг/га) и СИ Бакарди + БайкалЭМ (1258,0 кг/га), где показатель зависел, в основном, от семенной продуктивности. Максимальная масличность была получена на варианте Фосфатовит + СИ Бакарди (49,3%).

Заключение. В условиях Рязанского района Рязанской области рекомендуется выращивать гибриды подсолнечника СИ Бакарди, НК Неома с применением в технологии выращивания культуры микробиологических удобрений Азотовит, Фосфатовит и Байкал ЭМ в качестве обработки семян до посева и применении по вегетации в период 4-8 настоящих листьев.

Ключевые слова: подсолнечник; гибрид; сорт; агрохимикаты; микроудобрения; урожайность; качество; масличность

Для цитирования. Лебедев, Д. В., Виноградов, Д. В., Зубкова, Т. В., & Макарова, М. П. (2025). Выращивание гибридов подсолнечника в зависимости от обработки агрохимикатами в условиях южной части Нечерноземной зоны России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 370-386. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1106

Introduction

The consumption of vegetable oil by the population of many countries of the world is increasing, and animal fats are decreasing, which is explained by a number of benefits of vegetable fats for human health. In addition, the production of vegetable oil is more economically profitable than the production of animal fats, especially butter [1-5].

Husks and threshed baskets are excellent food for animals. Threshed baskets contain up to 3.5-4% fat, 5-8% protein, 14-17% fiber and up to 60% nitrogen-free extractives.

Over the past 20 years, an unfavorable situation has developed in the production of oilseeds, and especially sunflower. The production of vegetable oil in Russia is experiencing increasing difficulties caused by an increasing shortage of raw materials. As a result of this, our country has changed from being

an exporter of vegetable oil to becoming a permanent importer. There are no objective reasons for this, since oilseeds have long been widely cultivated in Russia. It should be noted that with the transition to market relations, the sunflower area in the country increased by 1.5 times [6-10].

Currently, to solve the problem of increasing the production of oilseeds, it is necessary to accelerate the creation of new, more productive and adaptive sunflower varieties and hybrids. And the promotion of sunflower to more northern, non-traditional zones of its cultivation through the introduction of ultra-early ripening varieties and hybrids will make it possible to more widely develop the production of vegetable oil in these areas and reduce, and possibly completely stop, the import of vegetable oil [11-15].

The introduction of such macroelements as N and K leads to some decrease in oil content, and phosphorus fertilizers do not have any significant effect on this indicator. Mineral nutrition conditions also affect the quality composition of the oil. Many scientific data have revealed that increasing the level of nitrogen and potassium nutrition helps to increase the content of oleic acid, while simultaneously decreasing linoleic acid. It is noted that varieties and hybrids belonging to different morpho biological groups respond approximately equally to fertilizers. Scientists have found that the application of microfertilizers and agrochemicals has a better effect on the balance of the fatty acid composition of sunflower seeds, compared to the application of macroelements [16-21].

Despite the relatively large number of studies conducted on the effect of fertilizers on sunflower yields and product quality, it should be recognized that the problem was and remains relevant. Zonal differences in the sunflower fertilizer system have not been determined, agrochemically effective varieties and hybrids have not been identified, and there is no clarity in theoretical approaches. Often, with a very large NPK removal from the crop, sunflower responds poorly to increased doses of fertilizers. The problem of using fertilizers in the northern sunflower growing regions is especially unclear.

Since the yield of sunflower largely depends on the amount of moisture in the 150-200 cm layer of soil, it should not be placed immediately after crops that strongly dry out the soil to a great depth (alfalfa, sugar beets, Sudan grass). After such crops, sunflower can be sown no earlier than after 2-3 years.

Based on this, it became an urgent need to conduct comprehensive research to develop the basic elements of sunflower cultivation technology in the crop nutrition system in conditions of the south of the Non-Black Earth Zone of Russia; a broad study of the varietal composition of sunflower of various se-

lections in order to select the most suitable lines for our conditions, taking into account that there is not enough regional research in the State Variety Network of Russia [21-24].

We state that early studies with these microbiological fertilizers were carried out on such crops as potatoes, winter and spring wheat, spring barley and soybeans. From the oilseed group of crops, work on the study of the action of agrochemicals Azotovite and Phosphatovite was carried out on crops of white mustard, spring rapeseed, oilseed flax and spring wheat. In domestic scientific sources, there are no studies with the desired microbiological fertilizers in sunflower agrocenoses, including in the Non-Chernozem region.

New promising microbiological fertilizers Azotovite and Phosphatovite provide plants with nitrogen and phosphorus nutrition, increase productivity, suppress phytopathogenic microflora, increase the effectiveness of nitrogen mineral fertilizers, reduce the toxic effect of fungicides on plant seedlings, restore soil fertility. Strains of beneficial microorganisms contained in Baikal EM-1 and other fertilizers under study, after preliminary preparation in a nutrient solution, activate the activity of beneficial microflora, accelerate the processes of humus formation, to some extent, due to the competition of the nutrient medium, suppress the reproduction of pathogens of fungal and bacterial plant diseases. A solution based on EM preparations is used to create more favorable conditions for plant growth, increase overall immunity, reduce the growth of pathogenic microflora, watering the soil or any organic residues (in a compost heap or a layer of organic matter in beds): to accelerate the decomposition of peelings, peel, green mown grass and hay, small branches, straw, tree bark, tops. As a result, nutrients in the soil become more accessible to plants.

The scientific novelty of the research consisted in the studied effect of microbiological fertilizers Azotovite, Baikal, Phosphatovite on sunflower productivity in the conditions of the south of the Non-Chernozem region for the first time in the region. The paper reveals the nature of the development of crop hybrids by phases of development, in addition to yield, an analysis of the fat content and economic efficiency of cultivation according to research options is also proposed, recommendations for production on the introduction of the most effective experience options are given.

The study of the elements of biologization, using fertilizers such as Azotovite, Phosphatovite and Baikal, in such a complex, taking into account chemicalization, intensive technology for growing sunflower oil seeds is an important factor in the balance of ecological equilibrium, which helps to reduce the adverse environmental impact on the environment. The desire to find a new, rela-

tively cheap and environmentally safe way to increase the yield of such a highly profitable crop as sunflower has determined the direction of our research.

Materials and methods

Research methods and methodology for studying sunflower agrocenoses were based on a generalization of scientific sources by domestic and foreign authors, laboratory and field studies, phenological observations, records, in accordance with recommendations and generally accepted methods, using correlation and statistical analysis of the experimental data obtained. Microsoft Office Excel 10 was used for statistical work.

A two-factor field experiment was carried out in 2022 and 2023 on gray forest soils. The object of the research included sunflower hybrids NK Neoma, SI Bacardi (factor B).

According to factor A, microbiological fertilizers Phosphatovite, Baikal EM, Azotovite were used for sunflower.

The experimental design was as follows: 1. Control (without treatment); 2. Microbiological fertilizer Phosphatovite. Pre-sowing seed treatment, agrochemical consumption - 0.5 l/t of seeds, working solution consumption - 10 l/t, as well as foliar feeding: 1st - in the phase of full germination, 2nd - in the phase of 6-8 leaves, agrochemical consumption – 1.0 l/ha, working solution consumption – 300 l/ha; 3. Microbiological fertilizer Baikal EM (products of the EM series) brand: Baikal EM (aqueous solution). Pre-sowing seed treatment, agrochemical consumption – 2.0 l/t of seeds, working solution consumption – 10 l/t. Foliar feeding: 1st - in the phase of full germination, 2nd - in the phase of 6-8 leaves, agrochemical consumption - 6.0 l/ha, working solution consumption - 300 l/ha; 4. Microbiological fertilizer Azotovite. Pre-sowing seed treatment, agrochemical consumption - 0.5 l/t of seeds, working solution consumption - 10 l/t, as well as foliar feeding: 1st - in the phase of full germination, 2nd - in the phase of 6-8 leaves, agrochemical consumption – 1.0 l/ha, working solution consumption – 300 l/ha.

Agrotechnical measures for sunflower cultivation were in accordance with existing zonal recommendations.

After harvesting the forecrop (winter wheat) in all variants of the experiment, peeling was carried out to a depth of 6-8 cm, then, as weeds grew, disking was carried out to a depth of 8-10 cm. Fertilizers were applied for pre-sowing cultivation. Ammonium nitrate, potassium sulfate, and ammophos were used in terms of the active ingredient. Phosphorus-potassium fertilizers were applied at a dose of 60 kg of active substance and plowing was to a depth of 24-26 cm.

In the spring, to destroy weed seedlings, the soil was cultivated in two layers. For all variants, background $N_{135}P_{45}K_{45}$ was used.

Hybrids NK Neoma and SI Bacardi were studied. Sowing was carried out in a dotted manner with row spacing of 70 cm to a depth of 6-8 cm. The sowing time was the 1st decade of May (May 1-5). The seeding rate was 45.0 thousand viable seeds per 1 ha.

Sunflower cultivation was carried out using Clearfield technology, using herbicide Nopasaran, 1 l/ha and Dash adhesive, 1 l/ha. Harvesting was carried out in September individually, in the phase of full ripeness; the plants were previously desiccated.

During the growing season, phenological observations and measurements of the main linear and photosynthetic parameters were carried out. Biometric and yield data were processed by analysis of variance.

The area of the experimental plot was 100 m^2, the registration plot was 75 m^2, the number of replications was four.

Results and discussion

The seasonality of the year was well expressed in Ryazan region, as in other regions of the temperate zone. The duration of the growing season was about 140 days a year. The sum of active temperatures was 2 200 – 2 300 degrees. The hydrothermal coefficient ranged from 1.1 to 1.2 units. Indicators hydrothermal coefficients characterizing weather conditions of Ryazan region during the experiment are presented in Figure 1.

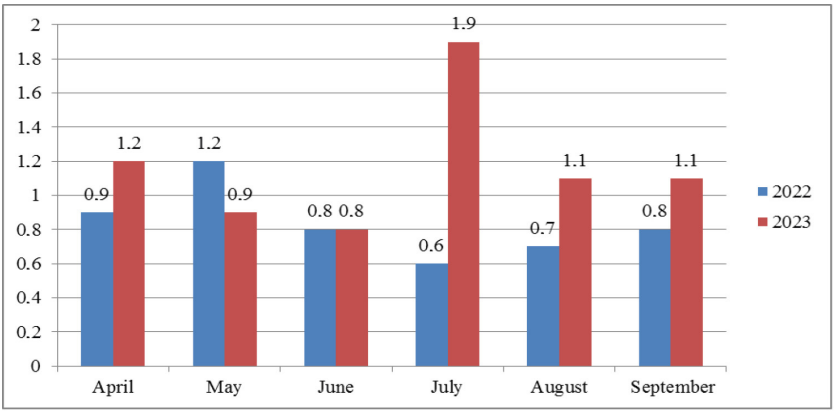


Figure 1. Hydrothermal coefficients for growing seasons of spring grain crops, in 2022, 2023

The weather conditions of the sunflower growing seasons during the experiments were characterized by sharp temperature changes and unstable moisture regimes. Thus, the HTC of the growing season of 2022 was characterized as dry (0.84), while in the period of 2023 sufficient moisture was observed, its values reached 1.18.

There were no significant differences in the development of plants according to the experimental options, until the second treatment was carried out in the phase of 6-8 true pairs of leaves of the crop (Table 1).

Table 1.

The beginning of phenological phases of sunflower development depending on the variant of microbiological fertilizer (using the example of hybrid NK Neoma)

Option	Sowing date	Seedlings	1-2 pairs of leaves	3-4 pairs of leaves	5-7 pairs of leaves	Budding	Basket development	Flowering	Seeds formation	Filling	Ripening	Harvesting
Control	06.05	17.05	23.05	01.06	15.06	24.06	08.07	24.07	12.08	30.08	08.09	30.09
Phosphatovite	06.05	16.05	22.05	30.05	18.06	28.06	11.07	27.07	16.08	02.09	10.09	30.09
Baikal EM	06.05	16.05	22.05	30.05	17.06	29.06	14.07	29.07	18.08	04.09	14.09	30.09
Azotovite	06.05	16.05	22.05	30.05	18.06	30.06	13.07	29.07	19.08	05.09	15.09	30.09

Foliar feeding of Azotovite, Phosphatovite and Baikal EM, carried out at this time, taking into account the first treatment, contributed to more intensive plant development, the duration of the interphase periods of budding - seed formation increased by 2-6 days from the control. In options treated with Baikal EM, the flowering period of sunflower was 2-4 days longer than in the control, this allowed the crop plants to form larger seeds and more of them, in options with Azotovite the period was longer by 5 days, in options with Phosphatovite - by 2-3 days.

In general, it was noted that pre-sowing seed treatment and foliar feeding of plants with aqueous solutions of microbiological fertilizers contributed to an increase in the duration of the sunflower growing season by 3-9 days, depending on the fertilizer option used. Note that the growing season of NK Neoma was 4-8 days longer than ripening of hybrid SI Bacardi.

During phenological observations, the phytosanitary condition of crops was noted. During the observation period, such pests were identified as the gray beet weevil, sunflower long-horned beetle, herbivorous bugs, all pests within the

EPV. Heavy rainfall in the first two decades of July provoked the development of downy mildew, which was noted on single sunflower plants. No dependence of the intensity of disease development on plant treatments with microbiological fertilizers Baikal EM, Azotovite and Phosphatovite was identified. Annual dicotyledonous and cereal weeds were represented by white pigweed, tenacious bedstraw, knotweed, chicken millet, green bristle grass.

An analysis of the crop structure showed that the maximum plant height (171.1 cm) and the number of seeds per basket (1 046.4 pcs.), on average over two years, were in options with hybrid NK Neoma (Figure 2, Table 2).

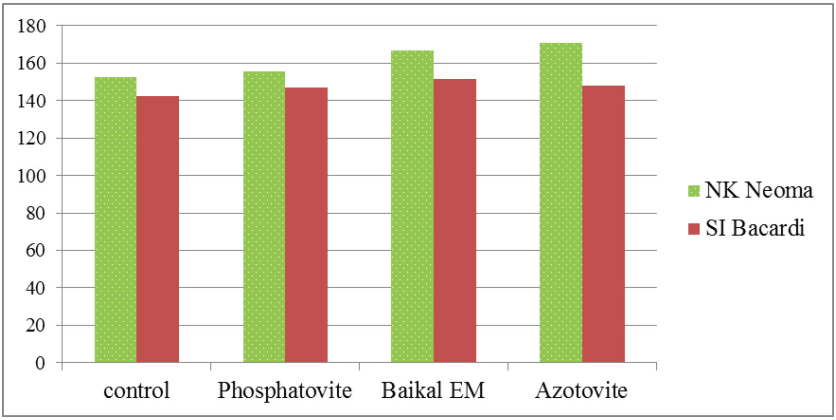


Figure 2. Height of sunflower plants depending on the factors studied, cm

Table 2.

The structure of the sunflower harvest of hybrid NK Neoma depending on the microbiological fertilizer treatment option, average 2022-2023

№	Option	Height of plants, cm	Maximum area of leave, thousand m^2/ ha	Diameter of the basket, cm	Seeds from the basket, pcs.	Weight of 1 000 seeds, g	Safety of plants before harvest, thousand pcs/ha
1.	Control	152.7	21.8	20.4	933.4	53.7	42.3
2.	Phosphatovite	155.7	22.4	20.8	965.2	54.7	42.2
3.	Baikal EM	166.6	23.8	22.9	1025.6	53.5	44.0
4.	Azotovite	171.1	23.6	22.8	1046.4	53.0	43.5

In general, NK Neoma turned out to be the taller hybrid (152.7-171.1 cm), which was 9.6-23.1 cm higher than SI Bacardi, depending on the treatment option with microbiological fertilizers.

At the same time, the diameter of the basket, depending on the hybrid studied, was relatively the same (20.4 – 24.2 cm). The maximum diameter of the basket was found in the option of hybrid SI Bacardi + Baikal EM, and amounted to 24.2 cm. A larger radius of the sunflower basket stimulated the appearance of more seeds. Microbiological fertilizers stimulated an increase in the diameter of the basket compared to the control (Figure 3).



Treatment options (according to the experimental design):
1 – control (without treatment); 2 – Phosphatovite; 3 – Baikal EM; 4 – Azotovite
Figure 3. Typical baskets of options in an experiment to study microbiological fertilizers (using the example of hybrid NK Neoma)

The maximum leaf area was revealed in the option with treatment with Baikal EM and Azotovite - 23.8 and 23.6 thousand m^2/ha, respectively (NK Neoma); and when treated with Baikal EM - 21.0 thousand m^2/ha (SI Bacardi).

The weight of 1 000 sunflower seeds varied between 53.0-54.7 g (NK Neoma) and 49.9-52.5 g (SI Bacardi), and did not significantly depend on the factor of treatment with microbiological fertilizers.

When the phase of complete seed ripening and favorable weather set in, we began harvesting sunflowers and calculating the seed yield (Table 3).

The average yield of sunflower seeds in options with hybrid SI Bacardi was lower (23.4-26.4 dt/ha) than with hybrid NK Neoma (24.0-26.8 dt/ha). On average, the maximum yield was found for the option with the action of Azotovite, 1 l/ha on plots with hybrid NK Neoma, and amounted to 26.8, which was 2.8 dt/ha more than the control option.

Table 3.

Yield (dt/ha) of sunflower by options in the experiment

№	Treatment option	Hybrid	Yield, dt/ha			Yield increase, dt/ha
			2022	2023	aver-age	
1.	Control	NK Neoma (Control)	23.9	24.1	24.0	-
		SI Bacardi	23.0	23.8	23.4	-0.6
2.	Phosphatovite	NK Neoma	24.2	26.9	25.6	+1.6
		SI Bacardi	24.4	26.6	25.5	+1.5
3.	Baikal EM	NK Neoma	25.5	27.0	26.2	+2.2
		SI Bacardi	24.7	27.6	26.1	+2.1
4.	Azotovite	NK Neoma	25.3	28.3	26.8	+2.8
		SI Bacardi	25.4	27.4	26.4	+2.4
LSD_{05} interaction AB, dt/ha			3.02	2.33		

Note that crop yields in 2023 were higher than in 2022, which could be explained by better climatic conditions, warmer and more humid weather. The maximum yield by year was identified in 2023 on hybrid NK Neoma with Azotovite treatment, 1 l/ha (28.3 dt/ha).

Analysis of sunflower oil content depending on the factors studied is presented in Table 4.

Table 4.

Oil content of seeds (%) of sunflower hybrids depending on the microbiological fertilizer, average for 2022-2023

№	Option	Oil content, %	
		NK Neoma	SI Bacardi
1.	Control	46.6	48.6
2.	Phosphatovite	46.4	49.3
3.	Baikal EM	46.7	48.2
4.	Azotovite	45.9	47.4
LSD_{05} interaction AB, %		2022 – 2.28; 2023 – 3.17	

Qualitative analysis of the seeds showed that the microbiological fertilizers used did not significantly affect the oil content of sunflower. Let us highlight the higher oil content of hybrid SI Bacardi: 47.4-49.3%, which is 1.5-2% higher than that of hybrid NK Neoma. The maximum fat yield was obtained in the options NK Neoma + Azotovite (1 230.1 kg/ha) and SI Bacardi + Baikal EM (1 258.0 kg/ha), where the indicator depended mainly on seed productiv-

ity. The maximum oil content was obtained with Phosphatovite + SI Bacardi option (49.3%).

The economic efficiency of the studied techniques was calculated based on the price of sunflower (1 ton/23 thousand rubles). Note that until 2023, the price of sunflower remained twice as high. The costs of the studied microbiological fertilizers ranged from 460-530 rubles per 1 hectare, and did not bring significant costs in technology (Table 5).

Table 5.

Economic efficiency of growing sunflower according to experimental options

№	Treatment option	Hybrid	Yield, dt/ha	Expenses, rub/ha	Gross income, rub/ha	Net income (profit), rub/ha	Profitability,%
1.	Control	NK Neoma (Control)	24.0	36 900	55 200	18 300	49.6
		SI Bacardi	23.4	36 900	53 820	16 920	45.8
2.	Phosphatovite	NK Neoma	25.6	37 100	58 880	21 780	58.7
		SI Bacardi	25.5	37 100	58 650	21 550	58.1
3.	Baikal EM	NK Neoma	26.2	37 400	60 260	22 860	61.1
		SI Bacardi	26.1	37 400	60 030	22 630	60.5
4.	Azotovite	NK Neoma	26.8	37 100	61 640	24 540	66.1
		SI Bacardi	26.4	37 100	60 720	23 620	63.7

Calculations showed that Azotovite treatment option with hybrid NK Neoma not only provided the highest yield, but was also the most efficient. The net income in this case was 24 540 rubles/ha, and the profitability level of sunflower production was 66.1%. The lowest economic result and profitability of 45.8% was provided by the option without fertilizer treatment on Bacardi SI hybrid.

Conclusions

Pre-sowing treatment of seeds and foliar feeding of plants with all aqueous solutions of microbiological fertilizers contributed to an increase in the duration of the sunflower growing season by 3-9 days, depending on the fertilizer used. The growing season in the experiment with hybrid NK Neoma was 4-8 days longer than the ripening period for hybrid SI Bacardi. The maximum indicators for plant

height (171.1 cm) and the number of seeds per basket (1 046.4 pcs.), on average over two years, were in options with hybrid NK Neoma. In general, hybrid NK Neoma turned out to be the taller hybrid (152.7-171.1 cm), which was 9.6-23.1 cm higher than hybrid SI Bacardi, depending on the treatment option with the microbiological fertilizer. The maximum diameter of the basket was found in the variant of hybrid SI Bacardi + Baikal EM, and amounted to 24.2 cm. The mass of 1 000 sunflower seeds varied between 53.0-54.7 g (NK Neoma) and 49.9-52.5 g (SI Bacardi), and did not significantly depend on the factor of treatment with microbiological fertilizers. The maximum leaf area was revealed in the variant with treatment with Baikal EM and Azotovite - 23.8 and 23.6 thousand m^2/ha, respectively (NK Neoma); and when treated with Baikal EM - 21.0 thousand m^2/ha (SI Bacardi). On average, the yield of sunflower seeds in options with hybrid SI Bacardi was lower (23.4-26.4 dt/ha) than in hybrid NK Neoma (24.0-26.8 dt/ha). On average, the maximum yield was found for the option with Azotovite, 1 l/ha on plots with NK Neoma hybrid, and amounted to 26.8, which was 2.8 dt/ha more than the control option. Qualitative analysis of the seeds showed that the microbiological fertilizers used did not significantly affect the oil content of sunflower. Let us highlight the higher oil content of SI Bacardi hybrid: 47.4-49.3%, which was 1.5-2% higher than that of NK Neoma. The maximum fat yield was obtained in options NK Neoma + Azotovite (1 230.1 kg/ha) and SI Bacardi + Baikal EM (1 258.0 kg/ha), where the indicator depended mainly on seed productivity. The maximum oil content was obtained with Phosphatovite + SI Bacardi option (49.3%). The Azotovite treatment option on hybrid NK Neoma not only provided the highest yield, but was also the most efficient. The net income in this case was 24 540 rubles/ha, and the profitability level of sunflower production was 66.1%. The lowest economic result and profitability of 45.8% was provided by the option without fertilizer treatment on hybrid SI Bacardi.

References

1. Butov, A., Zakharov, V., & Zubkova, T. (2019). Biological quality and preservation of potato under drip irrigation and different fertilizers. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25(2), 37-44. EDN: https://elibrary.ru/tmyayn
2. Evsenina, M. V., & Novikova, A. V. (2021). Improving the conditioning of wheat grain when preparing it for grinding into graded flour. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723(2), 022081. https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022081 EDN: https://elibrary.ru/qtrnsi
3. Gulidova, V. A., Zubkova, T. V., Kravchenko, V. A., & Dubrovina, O. A. (2017). The dependence of photosynthetic indices and the yield of spring rape on foliar

fertilization with microfertilizers. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 17(4), 404-407. https://doi.org/10.3844/ojbsci.2017.404.407 EDN: https://elibrary.ru/xxwsbv

4. Ilinskiy, A., Vinogradov, D., Politaeva, N., & Badenko, V. (2023). Features of the phytoremediation by agricultural crops of heavy metal contaminated soils. *Agronomy*, 13(1), 127. https://doi.org/10.3390/agronomy13010127 EDN: https://elibrary.ru/oqhnky
5. Musayev, F., Danilin, S., Zakharova, O., & Rodikov, S. (2020). Agroecological role of biohumus on sod-podzolic soil during irrigation of the rump-timothy grass mixture. *E3S Web of Conferences*, 210, 4003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004003 EDN: https://elibrary.ru/xduvar
6. Stupin, A. S., Lupova, E. I., & Sokolov, A. A. (2021). Increase in efficiency of spring rapeseed production due to modern seed pickers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 624, 012106. https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012106
7. Ushakov, R. N., Ruchkina, A. V., Levin, V. I., Zakharova, O. A., Kostin, Y. V., & Golovina, N. A. (2018). Sustainability of agro-gray soil to pollution and acidification, and its bio diagnostics. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.36), 929. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.36.24923 EDN: https://elibrary.ru/ycwjby
8. Vasileva, V. (2015). Aboveground to root biomass ratios in pea and vetch after treatment with organic fertilizer. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 1(2), 71-74.
9. Vasileva, V., Kertikov, T., & Ilieva, A. (2017). Dry mass yield and amount of fixed nitrogen in some forage legume crops after treatment with organic fertilizer Humustim. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, 23(5), 816-819.
10. Vinogradov, D., Lupova, E., Khromtsev, D., & Vasileva, V. (2018). The influence of bio-stimulants on productivity of coriander in the non-chernozem zone of Russia. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(6), 1078-1084. EDN: https://elibrary.ru/bypwgd
11. Vinogradov, D. V., Byshov, N. V., Evtishina, E. V., Lupova, E. I., Tunikov, G. M., & Morozova, N. I. (2018). Peculiarities of growing gold-of-pleasure for oilseeds and its use in feed production in the non-chernozem zone of Russia. *Amazonia Investiga*, 7(16), 37-45. EDN: https://elibrary.ru/udtsuk
12. Vinogradov, D. V., Vasileva, V. M., Makarova, M. P., Kochurov, B. I., & Lupova, E. I. (2019). Agroecological effect of sewage sludge and its mixtures with zeolite on the agrocenoses of oilseeds. *Theoretical and Applied Ecology*, 3, 122-128. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-127-133 EDN: https://elibrary.ru/qggvzt

13. Vinogradov, D. V., Stenichkina, M. Y., & Vasileva, V. M. (2020). Increasing the oats (Avena sativa) productivity when co-use of fertilizers and growth regulator in conditions of the nonchernozem zone of Russia. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 11(10).
14. Vinogradov, D. V., Makarova, M. P., & Kryuchkov, M. M. (2021). The use of mineral fertilizers in sunflower crops in the conditions of Ryazan region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 624, 012077. https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012077 EDN: https://elibrary.ru/aeglvp
15. Vinogradov, D. V., & Zubkova, T. V. (2021). Accumulation of heavy metals by soil and agricultural plants in the zone of technogenic impact. *Indian Journal of Agricultural Research*, 55, 1-7. https://doi.org/10.18805/IJARe.A-651 EDN: https://elibrary.ru/yvtdby
16. Vinogradov, D. V., & Zubkova, T. V. (2022). The use of organic fertilizers based on waste mushroom compost in agricultural crop production technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1010(1), 012013. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012013 EDN: https://elibrary.ru/ahdbab
17. Vinogradov, D. V., Makarova, M. P., & Zubkova, T. V. (2023). The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses. *Theoretical and Applied Ecology*, 1, 93-100. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-093-100 EDN: https://elibrary.ru/kwvmhj
18. Vos, P. Meelis, E., & Ter Keurs, W. J. (2000). A Framework for the Design of Ecological Monitoring Programs as a Tool for Environmental and Nature Management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 317-344. https://doi.org/10.1023/A:1006139412372 EDN: https://elibrary.ru/agnctt
19. Zubkova, T. V., Motyleva, S. M., & Dubrovina, O. A. (2020). The study of rape seed plants development in the rosette phase in the face of organic fertilizers and natural zeolite. *Ecology, Environment and Conservation*, 26(1), 465-470. EDN: https://elibrary.ru/bwmkmy
20. Zubkova, T. V., Motyleva, S. M., Dubrovina, O. A., & Brindza, J. (2021). The study of rapeseed ash composition in the conditions of the agroecological experiment. *Potravinarstvo*, 15(1), 156-161. https://doi.org/10.5219/1356 EDN: https://elibrary.ru/qklzsb
21. Zubkova, T. V., Motyleva, S. M., & Dubrovina, O. A. (2021). Chemical and analytical properties of zeolite-containing rocks, poultry farm waste and their composite mixtures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Krasnoyarsk Science and Technology City Hall, Krasnoyarsk), 677(52031), 1-6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052031 EDN: https://elibrary.ru/sydidz

22. Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., & Dubrovina, O. A. (2022). Effect of zeolite on the micro-morphological and biochemical features of the spring rapeseed (Brassica napus L.). *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 54(1), 153-164. https://doi.org/10.54910/SABRAO2022.54.1.14 EDN: https://elibrary.ru/qjjtze
23. Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., & Zakharov, V. L. (2022). Microelement composition of spring rape plants depending on the specified experimental conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 979(012094), 1-6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012094 EDN: https://elibrary.ru/cylzso
24. Zubkova, T., & Butov, M. (2023). Effectiveness of foliar fertilizing spring oilseed rape in the forest-steppe conditions of central black earth economic region of Russia. *BIO Web of Conferences*, 71, 01035. https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101035 EDN: https://elibrary.ru/gmtvxh

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Дмитрий Васильевич, аспирант
Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
lebedevdv96@yandex.ru

Виноградов Дмитрий Валериевич, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой агрономии, агрохимии и защиты растений; профессор кафедры общего земледелия и агроэкологии
Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Российская Федерация; Ленинские горы, 1, стр. 12, 119234, г. Москва, Российская Федерация
vdvrzn@mail.ru

Зубкова Татьяна Владимировна, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая кафедрой агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
ул. Коммунаров, 28, г. Елец, 399770, Российская Федерация
ZubkovaTanua@yandex.ru

Макарова Марина Павловна, кандидат биологических наук, доцент кафедры агрономии, агрохимии и защиты растений
Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева
ул. Костычева, 1, Рязань, 390044, Российская Федерация;
assistent_84@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Lebedev, PhD student
Yelets State University Named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation
lebedevdv96@yandex.ru

Dmitry V. Vinogradov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Agronomy and Agrotechnologies
Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev;
Lomonosov Moscow State University
1, Kostychev Str., Ryazan, 390044, Russian Federation; 1/12, Leninskie Gory, 119234, Moscow, Russian Federation
vdvrzn@mail.ru

Tatyana V. Zubkova, Head of the Department of Agrotechnologies, Agricultural Products Storage and Processing, Candidate of Agricultural Sciences
Yelets State University Named after I.A. Bunin
28, Kommunarov Str., Yelets, 399770, Russian Federation
ZubkovaTanua@yandex.ru

Marina P. Makarova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Agronomy, Agrochemistry and Plant Protection
Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev
1, Kostycheva Str., Ryazan, 390044, Russian Federation
assistent_84@mail.ru

Поступила 08.07.2024
После рецензирования 14.09.2024
Принята 25.09.2024

Received 08.07.2024
Revised 14.09.2024
Accepted 25.09.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1435 **EDN: ZTSHVA**
УДК 632.937

CC BY NC ND

Научная статья

АФИДОФАГИ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ И ИХ РОЛЬ В РЕГУЛИРОВАНИИ ЧИСЛЕННОСТИ ВРЕДИТЕЛЕЙ

Е.В. Кашутина, Л.Н. Бугаева, Т.Н. Игнатьева

Аннотация

Обоснование. Климатическое и флористическое разнообразие биоценоза Лазаревского района города-курорта Сочи послужило формированию в регионе уникального видового состава палеарктической, субтропической и тропической энтомофауны. Сформировался устойчивый симбиоз комплекса тлей и их природных хищников и паразитов. В период быстрого нарастания численности фитофагов биоагентами контроля становились личинки сирфид, хризоп (до 77 яиц в яйцекладке), личинки и имаго кокцинеллид (до 70 личинок и 4 имаго на растение), личинки галлицы афидимизы (до 17 особей на лист).

Цель: изучение афидофагов Черноморского побережья Краснодарского края и их роль в регулировании численности вредителей в агроценозах Лазаревского района г. Сочи.

Материалы и методы. Фитосанитарное обследование проводилось в весенне-летний период - 4 раза в месяц, в осенне-зимний - 2 раза в месяц. Выбор даты учетов в вегетационный период определяли появлением первых особей фитофагов после зимовки. Идентификацию выявленных фитофагов, проводили в лабораториях станции по общепринятым методиками (Маршаков В. Г., 1985). Математическая обработка данных осуществлялась с помощью MS Excel. В естественных и искусственных биоценозах наибольшую эффективность показали кокцинеллиды.

Результаты. Впервые в 2021-2024 гг. проведена оценка роли афидофагов в регулировании численности вредителей в агроценозах Черноморского побережья Краснодарского края. Средняя биологическая эффективность энтомофагов составила 80 %. В неконтролируемых условиях открытого грунта лучшим биоагентом контроля тлей выступила хармония при эффективности в 95 %. Высокие

результаты хищничества показали аборигенные хищники-полифаги макролофус и дицифус. Их биологическая эффективность в закрытом грунте составила в среднем 70% при соотношении хищник:жертва 1:30. Применение лабораторных популяций специализированных паразитов лизифлебуса и афидиуса в контролируемых условиях закрытого грунта показали уровень паразитирования до 84%.

Заключение. Выявлена недостаточная эффективность природных афидофагов при их применении в качестве моно-агента биоконтроля тли. Значительно более высокие результаты показало единовременное применение комплекса афидофагов, состоящего из кокцинеллид, сирфид, галлицы афидимизы, макролофуса и дицифуса. В результате исследований токсичности наиболее распространенных инсектицидов и фунгицидов в отношении энтомофагов выявлено негативное влияние некоторых препаратов на дальнейшее развитие насекомых. Зафиксировано снижение количества окуклившихся личинок от 34,7% до 37,9% и вылетевших имаго хармонии от 29,9% до 33,6%. Наиболее эффективными препаратами определены препараты на основе выявленных в регионе энтомопатогенных грибов Beauveria и Lecanicillium, показавшие эффективность до 90%.

Ключевые слова: тля; фитофаги; афидофаги; энтомофаги; кокцинеллиды; биологическая эффективность; энтомопатогенный гриб

Для цитирования. Кашутина, Е. В., Бугаева, Л. Н., & Игнатьева, Т. Н. (2025). Афидофаги Черноморского побережья Краснодарского края и их роль в регулировании численности вредителей. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 387-411. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1435

Original article

APHIDOPHAGES OF THE BLACK SEA COAST OF THE KRASNODAR TERRITORY AND THEIR ROLE IN REGULATING THE NUMBER OF PESTS

E.V. Kashutina, L.N. Bugaeva, T.N. Ignatieva

Abstract

Background. The climatic and floral diversity of the biocenosis of the Lazarevsky district of the resort city of Sochi served to form a unique species composition of Palearctic, subtropical and tropical entomofauna in the region. A stable symbiosis of the aphid complex and their natural predators and parasites has been formed. During the period of rapid increase in the number of phytophages, the control bioagents were syrphid lar-

vae, chrysops (up to 77 eggs in the egg), coccinellid larvae and imagos (up to 70 larvae and 4 imagos per plant), larvae of aphidimiza gallica (up to 17 individuals per leaf).

Purpose: to study the aphidophages of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory and their role in regulating the number of pests in the agro-cenoses of the Lazarevsky district of Sochi.

Materials and methods. Phytosanitary inspection was carried out in the spring and summer period - 4 times a month, in autumn and winter - 2 times a month. The choice of the registration date during the growing season was determined by the appearance of the first phytophagous individuals after wintering. Identification of the identified phytophages was carried out in the laboratories of the station according to generally accepted methods (Marshakov V. G., 1985). Mathematical data processing was carried out using MS Excel. In natural and artificial biocenoses, coccinellides showed the greatest effectiveness.

Results. For the first time in 2021-2024, the role of phytophages in regulating the number of pests in the agrocenoses of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory was assessed. The average biological efficiency of entomophages was 80 %. In uncontrolled open ground conditions, harmony was the best bioagent for aphid control with an efficiency of 95 %. High predation results were shown by native predators-polyphages macrolophus and dicyphus. Their biological effectiveness in the closed ground averaged 70 % with a predator ratio:The victim is 1:30. The use of laboratory populations of specialized parasites of lisiflebus and aphidius in controlled indoor conditions showed a parasitization rate of up to 84 %.

Conclusion. Insufficient effectiveness of natural aphidophages has been revealed when they are used as a mono-agent of aphid biocontrol. Significantly higher results were shown by the simultaneous use of a complex of aphidophages consisting of coccinellides, syrphides, halides of aphidimysis, macrolophus and dicyphus. As a result of studies on the toxicity of the most common insecticides and fungicides against entomophages, the negative effect of some drugs on the further development of insects has been revealed. A decrease in the number of pupated larvae was recorded from 34.7 % to 37.9 % and departed imago harmonia from 29.9% to 33.6%. The most effective drugs were identified based on the entomopathogenic fungi Beauveria and Lecanicillium found in the region, which showed an efficacy of up to 90 %.

Keywords: aphids; phytophages; aphidophages; entomophages; coccinellids; biological efficacy; entomopathogenic fungus

For citation. Kashutina, E. V., Bugaeva, L. N., & Ignatieva, T. N. (2025). Aphidophages of the Black Sea coast of the Krasnodar territory and their role in regulating the number of pests. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 387-411. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1435

Введение

Тли (Aphidoidea) – одно из самых многочисленных надсемейств фитофагов, является одним из наиболее вредоносных по отношению к сельскохозяйственным, декоративным, лесным породам. Ввиду остановки программ интродукции специализированных энтомофагов с целью защиты биоценозов от неконтролируемых изменений, приносимых интродуцентами, исследователями активизирована работа по поиску и внедрению в системы биоконтроля аборигенных и акклиматизировавшихся ранее хищников фитофагов, в том числе тли. Запрет на интродукцию усложняет задачу разработки эффективных методов биологического контроля численности инвазивных вредителей, поскольку хищники-полифаги, как показывает практика, менее успешно справляются со своей задачей. При этом наличие разноядных биоагентов контроля помогает в той или иной степени сдерживать численность вредителей на первом этапе инвазии [1].

В настоящий момент существует три взгляда на систематику афидиид: как на одно надсемейство, два надсемейства с учетом выделения филлоксеры (Phylloxeridae) и хермесов (Adelgidae) в надсемейство Phylloxeroidea, а также выделяют 3 отдельных надсемейства Adelgoidea, Phylloxeroidea, Aphidoidea. Большинство видов тли питаются только одним видом растений, а тесно связанные виды тли, как правило, питаются тесно связанными видами растений. При этом, партеногенетическое размножение, свойственное большинству видов тлей, обеспечивает насекомому невероятную плодовитость: одна самка тли способна произвести три поколения до нескольких сотен тысяч особей. В течение вегетационного периода в колонии тлей может появиться до 10 поколений крылатых и бескрылых самок. Осенью отрождаются крылатые самцы, в итоге обоеполого размножения в третьем поколении появляется до нескольких десятков тысяч особей, помогая популяции преодолевать неблагоприятные условия среды. Перенаселение, вынуждает колонии тли мигрировать, насекомое способно преодолевать очень большие расстояния в поисках подходящих источников пищи [2]. О степени вредоносности тли можно судить по нескольким фактам. Во-первых, многочисленная колония тли, поселяясь на растении, высасывает из него питательные соки. Тля питается на молодых участках растения-хозяина, тем самым вредитель лишает растение возможности активно развиваться. Во-вторых, питаясь флоэмой, содержащей высокие концентрации сахаров, тля превращает простые сахара в длинноцепочечные олигосахариды, выделяя большое количество медвяной росы, становящейся питательным субстратом для сажистого грибка. В-третьих,

тля содержит эндосимбиотические бактерии *Buchnera aphidicola*, которые обеспечивают тлю многими аминокислотами. В-четвертых, тля является переносчиком многих растительных вирусов, наносящих порой ущерб больший, нежели непосредственная деятельность самого насекомого. Наиболее яркий пример - уничтожение Phylloxera vitifoliae французских виноградников в 19 веке. Изучение афидофагов имеет такую же длительную историю, как и изучение тлей. Многообразие видов, а также глобальная пространственная непрерывность ареалов Aphidoidea является обширной относительно неисчерпаемой кормовой базой для широкого спектра афидофагов [3; 4]. Среди всех видов кокцинеллид наиболее успешными в борьбе с тлей считаются *Harmonia axyridis* Pall, *Cycloneda limbifer* Casey, *Leis dimidiata* Fabr [5; 15]. Кроме насекомых из семейства Coccinellidae широко распространены личинки двукрылых (галлица *Aphidoletes aphidimyza* Rondani, эписирфус *Episyrphus balteatus* De Geer, златоглазка обыкновенная *Chrysoperla carnea*, верблюдка – *Raphidia xanthostigma* Schummel. К настоящему времени выявлены и определены множество природных хищников тлей: Coccinellidae, Chrysopidae, Syrphidae, Cecidomyiidae, Heteroptera, Aphidiidae, Aphelinidae, энтомопатогенные грибы [8]. Критериями эффективности энтомофагов тлей являются сведения о видовом составе вредителей, их биологических и биоценотических характеристиках, динамики численности фитофагов, знания о биологии развития афидофагов и этапах развития растений-хозяев тли.

Среди немногочисленных хищников, контролирующих филлоксеру отличаются эффективностью хищная муха-сирфида, два вида божьих коровок Scymnus в Северной Америке, некоторые виды европейских кокцинеллид. Обнаружено и подтверждено около 30 видов афидофагов виноградной филлоксеры. Эффективный биоконтроль всех форм филлоксеры заключается в комплексном воздействии на популяцию вредителя энтомопатогенных нематод и грибов (Beauveria bassiana, Metarhizium anisopliae), хищных насекомых. Однако, сведений о естественных врагах виноградной филлоксеры недостаточно для разработки действенных методик биоконтроля численности вредителя с их использованием. Отечественные и европейские исследователи провели лабораторные и полевые испытания эффективности инвазивной для европейского континента *Harmonia axyridis* (Pallas 1773) и аборигенной *Coccinella septempunctata* (Linné 1758) против листовой формы виноградной филлоксеры [9]. Результаты показали высокий потенциал хармонии в качестве агента биоконтроля численности филлоксеры. Говоря о Phylloxeroidea, необходимо

отметить, что наиболее изученной является виноградная филлоксера, в то время как хермесы, наносящие существенный урон хвойным породам, изучены недостаточно. На данный момент мало известно об их эволюционной истории, их таксономия остается нерешенной. Удалось выявить несколько видов хищников адельгид: Derodontidae, Coccinellidae, Neuroptera, Hemerobiidae, Chrysopidae, Chamaemyiidae, Cecidomyiidae, Syrphidae [10]. Исследования внутригильдийного хищничества *Aphidoletes aphidimyza* Rondani на паразитированных тлях *Myzus persicae* Sulzer показали повышение уровня выживаемости незрелых *Aphidoletes aphidimyza* за счет снижения плодовитости, их способности завершить свое развитие и достичь зрелости [19]. Данные результаты стали залогом лучшего понимания механизмов устойчивого сосуществования хищников с паразитоидами в биологическом контроле тли [11].

Уровень эффективности сирфид против некоторых видов тлей недостаточен при использовании их в качестве единственного агента. Использование Syrphidae в сочетании с другими естественными врагами тли позволяет достичь значительного эффекта подавления численности тлей [16; 20]. В качестве аргумента активного изучения и применения хищных сирфид в биоконтроле тли выступает их способность к опылению, что ведет к повышению урожайности сельскохозяйственных некоторых культур. Галлицы афидимизы являются одними из хищников, применяемых в аугментативном биоконтроле тлей по всему миру, который заключается в высвобождении естественных врагов (хищников, паразитов, патогенов) для борьбы с вредителями. Способность к обнаружению колоний вредителя на относительно большой дистанции, откладывание яиц вблизи или в пределах колоний тли делает афидимизу важной составляющей комплекса энтомофагов тли закрытого грунта [13].

Метод сезонной колонизации энтомофагов в теплицах на основе биоценотической регуляции эффективнее метода превентивного наводнения, и имеет больше перспектив при разработке методов сверхраннего обнаружения вредителей [14; 16]. Сложность применения афидофагов для достижения стабильно низкого уровня численности тли в течение длительного периода заключается в расхождении стадий биологического развития хищников и их жертв. Большинство видов тлей начинают процесс формирования крупных вредоносных колоний уже при среднесуточной температуре окружающей среды +10°C. Начало развития новых поколений энтомофагов приходится на период от +15°C и выше, а отрождение первых личинок - от +25°C. Такое запаздывание приводит к тому, что к моменту существен-

ного нарастания численности афидофагов, численность и вредоносность тлей проявляется в полную силу, нанося существенный экономический ущерб не окрепшим молодым растениям.

В пик вегетативного сезона численность тли значительно снижается по естественным причинам: высокая температура воздуха, низкая влажность снижение питательной ценности растений-хозяев фитофагов. В этот период фиксируется наименьшая численность вредителя, что ошибочно может быть принято за эффект применения агентов биоконтроля. К концу вегетативного периода численность колоний тли значительно возрастает за короткий период времени, в то время как зависящая от объема источника пищи популяция хищников не достигает необходимой численности. В естественных условиях отмечено при соотношении хищник : жертва имаго семиточечной коровки к розанной тле на уровне 1:51 в течение трех дней хищничество снижается до 78,5 %, а при соотношении 1 личинка к 25 особям тли степень хищничество опускается до 66,5 %. Результаты исследований одновременного применения двух видов не конкурирующих между собой энтомофагов - семиточечной коровки (*Coccinella septempunctata*) и жужелицы (*Tomocarabus bessarabicus* concretus Fischer von Waldheim), семиточечной коровки (*Coccinella septempunctata*) и златоглазки (*Chrysoperla carnea)* - показали высокую эффективность данного метода благодаря синергетическому эффекту потребления фитофагов [21]. Для того, чтобы существенно регламентировать пестицидные обработки, обеспечивая сдерживание численности тлей на хозяйственно неощутимом уровне в течение всего вегетативного периода, необходимо оказывать биоценотический пресс на динамику численности фитофагов [17]. Для достижения этой цели применение одного-двух видов энтомофагов неэффективно. Требуется комплексное воздействие хищников, паразитов и энтомопатогенов.

В условиях происходящих климатических изменений в сторону повышения среднегодовой температуры воздуха и влажности, меняется и динамика взаимодействия между фитофагами и афидофагами. Европейская сеть EXAMINE зафиксировала увеличение видового состава тли за последние 30 лет почти на 20%, а также изменения в фенологии тли в сторону более раннего наступления периода первых весенних миграций. Это происходит на фоне снижения видового состава и численности энтомофагов на европейском континенте [18]. Исследования, направленные на изучение воздействия глобального потепления на некоторые виды тлей показывают, что климатические метаморфозы напрямую связаны с уве-

личением плотности популяций более высокими темпами развития и увеличивающейся частотой вспышек численности некоторых видов тлей. В условиях снижения давления хищников это приводит к стремительному увеличению экономических потерь, расширению ареалов вредителей, увеличению приспосабливаемости и выживаемости фитофагов, числа поколений, изменению межвидовых взаимодействий, снижению эффективности существующих методов биологического контроля, связанного с применением естественных врагов [22].

Материалы и методы

Исследования проводились на территории Лазаревского района г. Сочи, в зоне северных субтропиков, на границе с зоной умеренного климата. Территория исследований включала в себя прибрежную полосу Черного моря и предгорный кластер. Применение методов биологической защиты от тлей проводилось в тепличных овощных хозяйствах п. Якорная щель, п. Вардане, п. Дагомыс, тепличных хозяйствах декоративных культур п. Дагомыс, плодовых хозяйствах п. Вардане, на предгорных чайных плантациях поселков Мамедова Щель, Дагомыс, Солохаул, Головинка, Ахинтам. Мониторинг посадок декоративных культур проводили на территориях санаториев «Аврора», «Юг», «Аква-Лоо». Исследовали посадки растений в частных домохозяйствах и на сельскохозяйственных площадях населенных пунктов прибрежного и предгорного кластеров, смешанной экосистемы, включающей в себя синтез агро- и урбобиоценозов – на территории поселка Лазаревское и крупных населенных пунктов района. Разброс высот территории исследований - от 0 до 254 м над уровнем моря, село Солохаул (Рисунок 1).

Мониторинг популяций тлей проводился визуальным методом. Определяли растения-хозяева, оценивали степень повреждения растений тлёй, наличие афидофагов - природных хищников тли. Началом проведения мониторинга вредителя служила установившаяся среднесуточная температура +10°С. Определение плотности вредителей в очагах поражения растений проводили на месте обследования путем подсчета количества особей на 1 дм² побега, листа, растения.

Идентификацию афидофагов проводили визуально на месте обследования. С целью идентификации паразитов производили сбор паразитированных особей тлей для их выведения в лабораторных условиях Лазаревской опытной станции и определения с использованием оптического микроскопа с видеовыходом и люминесцентным анализом BX41TF “Olimpus”, стереоскопического микроскопа ЛОМО МСП-1 вар. 22М.

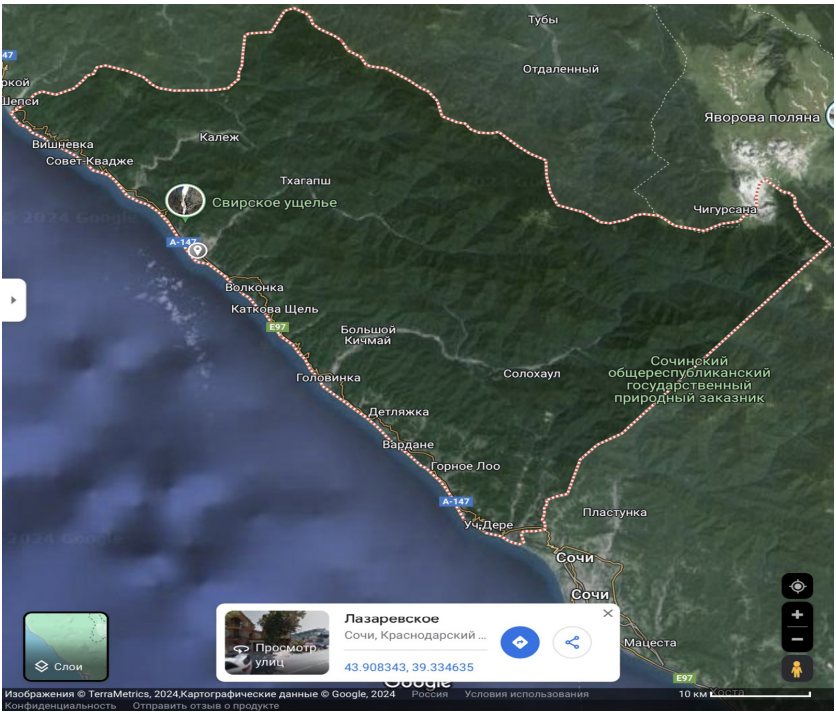


Рис. 1. Территория исследований эффективности афидофагов в Лазаревском районе г. Сочи

Вид вредителя определяли при помощи определителей (Яснош В. А. Определитель насекомых европейской части СССР. Т. 3. Перепончатокрылые. Л.: Наука, 1978. С. 496-500 ; Определитель насекомых европейской части СССР. Т. 1 (под общ. ред. Г.Я. Бей-Биенко). М.: Л.: Наука, 1964. 936 с.; электронный каталог по фауне тлей http://www.aphidsonworldsplants.info). Математическую обработку - с использованием программы MS Excel 2010 методом дисперсионного анализа (Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) Изд. 6-е. М.: 2011. 350 с.). Выпуски афидофагов маточных культур биоресурсной коллекции станции методом сезонной колонизации проводили в условиях отсутствия инсектицидных обработок растений на территории исследований. Биологическую эффективность энтомофагов оценивали по формуле Эббота.

Результаты исследования и их обсуждение

Впервые в 2021-2024 гг. проведена оценка роли афидофагов в регулировании численности вредителей в агроценозах Черноморского побережья Краснодарского края. Регион исследования располагается на стыке климатических поясов - северного субтропического и умеренно-континентального. Высокогорная природная зона непосредственно граничит с приморской. Местная флора богата аборигенными и завезенными в разные периоды развития курорта в большей степени в последние десятилетие культурами из различных климатических регионов мира. На одном участке успешно выращиваются культуры свойственные северным и тропическим регионам, декоративные и сельскохозяйственные. Благодаря такому климатическому и флористическому разнообразию в регионе сформирован уникальный видовой состав энтомофауны, состоящий из палеарктических, тропических и субтропических видов насекомых (Таблица 1.).

Таблица 1.

Комплекс тлей, наиболее часто встречающихся в биоценозах Лазаревского района г. Сочи

Наименование фитофага	**Научное название фитофага**	**Пищевая специализация фитофага**	**Происхождение вида фитофага**
Тля злаковая	*Schizaphis graminum* Rondani, 1852	Олигофаг, вредитель злаков	Палеарктический вид
Тля свекловичная	*Aphis fabae* Scopoli, 1763	Полифаг	Палеарктический вид
Персиковая тля	*Myzus persicae* Sulzer, 1776	Олигофаг, предпочтение отдает растениям рода Prunus, Brassicaceae, Ccucurbitaceae	Азиатский вид
Гороховая тля	*Acyrthosiphon pisum* Harris, 1776	Олигофаг. Вредитель бобовых культур	Палеарктический вид
Бахчевая тля	*Aphis gossypii* Glover, 1877	Олигофаг. Вредитель растений семейств Cucurbitaceae, Rutaceae, Malvaceae	Происхождение вида не известно. Космополитичный вид
Тля кровяная	*Eriosoma lanigerum* Hausmann, 1802	Олигофаг. Предпочтение отдает яблоне, груше, Prunus spp, Pyracentha, Cotoneaster, вязк, боярышнику, горному ясеню.	Североамериканский вид

Наименование фитофага	Научное название фитофага	Пищевая специализация фитофага	Происхождение вида фитофага
Розанная тля	*Macrosiphum rosae* Linnaeus, 1758	Узкий олигофаг. Вредитель роз. Встречается на яблоне и груше.	Полеарктический вид
Олеандровая тля	*Aphis nerii* Fonscolombe, 1841	Полифаг. Вредитель растений семейства Apocynaceae, Citrus и др.	Тропический, субтропический вид
Цитрусовая тля	*Aphis spiraecola* Patch, 1914	Полифаг. Питается на 65 видах вечнозеленых растений, преимущественно цитрусовых культурах	Палеарктический вид
Чайная тля	*Toxoptera aurantii* Boyer de Fonscolombe, 1841	Широкий полифаг. Питается на 120 видах растений, включая: камелия, какао, кофе, фикус, гибискус, лайм, макадамия, манго и др.	Тропический, субтропический вид

Характерная особенность условий исследуемого региона заключается в малой разнице климатических показателей в теплице и за её пределами. Климат региона способствует быстрому повышению температуры воздуха и влажности внутри культивационных сооружений, что вынуждает аграриев открывать теплицы с целью проведения проветривания помещений. Это позволяет вредителям беспрепятственно проникать внутрь, заселяя растения. Комфортные микроклиматические условия, наличие большого объема пищи, отсутствие на первых порах природных хищников приводит к быстрому нарастанию численности популяций тлей.

В условиях закрытого грунта Черноморского побережья Краснодарского края наиболее многочисленными и вредоносными являются бахчевая тля (*Aphis gossypi* Glov.), большая картофельная (*Macrosiphum euhorbiae* Thom.), обыкновенная картофельная (*Aulacorthum solani* Kalt.), персиковая (*Myzodes persicae* Sulz.). Данные виды тлей способны к быстрому размножению в условиях теплиц в течение всего года. Численность бахчевой тли может увеличиться в 10 раз за 3 дня. Скорость полного уничтожения тлей всех растений в теплицах исследуемого региона составляет 20–30 дней. В открытом грунте наибольшую вредоносность проявляют персиковая, кровяная, бахчевая, свекловичная, олеандровая тля.

На территории региона сложилась устойчивая экосистема. Многолетние исследования выявили большое видовое разнообразие как аборигенных, так и интродуцированных энтомофагов, успешно контролирующих

численность вредителей, в том числе комплекса тлей в естественных и искусственных биоценозах региона (Таблица 2.).

Таблица 2.

Комплекс наиболее эффективных афидофагов биоценозов Лазаревского района г. Сочи

Наименование афидофага	Международное научное название	Хищник/ Паразит	Стадия развития	Происхождение вида
Хармония	*Harmonia axyridis* Pallas, 1773	Хищник	Имаго, личинки	Интродуцированный, Юго-Восточная Азия
Леис	*Leis dimidiata* Fabricius, 1781 Leis dimidiata Mulsant, 1850	Хищник	Имаго, личинки	Интродуцированный, Юго-Восточная Азия
Циклонеда	*Cycloneda limbifer* Casey, 1899	Хищник	Имаго, личинки	Интродуцированный, Куба
Сирфиды	*Episyrphus balteatus* De Geer, 1776	Хищник	Имаго, личинки	Аборигенный
Галлица афидимиза	*Aphidoletes aphidimyza* Rondani, 1847	Хищник	Личинки	Аборигенный
Макролофус	*Macrolophus nubilis* Herrich-Schaeffer, 1835	Хищник	Имаго	Аборигенный
Хризопы	*Chrysopa perla* Linnaeus, 1758 *Chrysopa carnea* Stephens, 1836 *Chrysopa septempunctata* Westmael, 1841	Хищник	Личинки	Аборигенный
Дицифус	*Dicyphus errans* Wolff, 1804	Хищник	Имаго	Аборигенный
Афидиус	*Aphidius colemani* Viereck, 1912	Паразит		Аборигенный
Афелинус	*Aphelinus mali* Haldeman, 1851	Паразит		Интродуцированный, северо-восток США
Лизифлебус	*Lysiphlebus fabarum* Marshall, 1896	Паразит		Аборигенный

Исследования показали разнообразную фауну афидофагов естественных биоценозов в сравнении с искусственными.

Наибольшую численность популяции тлей (до 500 единиц вредителя на 1 дм²) наблюдали в первой декаде мая. Активный рост численности афи-

дофагов - личинки хризоп, сирфид, личинки и имаго кокцинеллид (до 70 личинок и 4 имаго/растение) был отмечен во второй декаде мая. Плотность яйцекладок хризоп достигала 77 яиц при встречаемости 46 %. Плотность личинок галлицы – 17 особей/лист при встречаемости 70 %. В течение летнего сезона численность популяции афидофагов снижалась пропорционально снижению численности тлей. В первой декаде сентября на фоне понижения среднесуточной температуры и повышения относительной влажности воздуха отмечался резкий рост популяции тлей в естественных и искусственных биоценозах. Численность вредителя превышала порог вредоносности – до 300 особей/лист при встречаемости более 80 %. Популяция природных афидофагов в данный период была недостаточна для эффективного контролирования численности тлей. Проводилась дополнительная колонизация комплекса маточных культур энтомофагов в теплицы, позволяющая снизить численность вредителей до 100-150 особей/лист за 2 недели.

Наиболее распространенными афидофагами в открытом и защищенном грунте агроценозов региона исследований являются кокцинеллиды. В условиях исследуемого региона сдерживают численность популяции тли: хармония, семиточечная коровка, адалия двухточечная, пропилея четырнадцатиточечная, гипподамия тринадцатиточечная в открытом грунте, леис, циклонеда, хармония в закрытом грунте.

Высокую эффективность в регулировании численности комплекса тлей закрытого грунта показала кокцинеллида хармония (*Harmonia axyridis* Pall.), интродуцированная на Лазаревскую опытную станцию в 1975 году. Применяли лабораторную популяцию хармонии методом наводняющих выпусков при получении первых сигналов о заселении растений тлёй в тепличных комплексах. Имаго кокцинеллиды выпускали из расчета 1 хищник на 40 особей вредителя. Поскольку взрослые жуки хармонии обладают высокой поисковой способностью, выпуск проводили путем размещения садков (RU 103442) с имаго по периметру теплицы. Данный метод полностью себя оправдал, показывая эффективность кокцинеллиды на уровне 77,95 %. Выпуск личинок хармонии 2-3 возрастов проводили методом раскладывания на листья растений из расчета 1 личинка хищника на 30 особей тли. Личинки хармонии не способны активно перемещаться между растениями, предпочитают питаться на одном растении. Эффективность личинок хармонии на овощных культурах в теплицах составила 79,61 %. Маточная культура лабораторная популяция хармонии (*Harmonia axyridis* Pall.) биоресурсной коллекции Лазаревской опытной станции защиты рас-

тений – филиала ФГБНУ ФНЦБЗР производилась с использованием УНУ «Государственная коллекция живых энтомоакарифагов и энтомопатогенов» (http://ckp-rf.ru/, реестровый номер: 793030) на естественном (злаковая тля) в весенне-летне-осенний период и на искусственном корме (Ru 2515688) в зимний период (Таблица 3).

Таблица 3.

Результаты оценки основных показателей лабораторной популяции *Harmonia axyridis* Pall.) в зависимости от вида корма

Условия выращивания	Прожорливость в сутки, кол-во особей тлей	Плодовитость, кол-во яиц в 1 яйцекладке	Биологическая эффективность личинок 2 возраста, %	
			1:30	1:40
Искусственная питательная среда	41,3	54,9	82,7	76,3
Естественный корм	46,6	60,2	81,2	77,4

По итогам исследований установлено, что искусственная питательная среда (Ru 2515688), разработанная на Лазаревской опытной станции защиты растений для питания лабораторной популяции хармонии, не приводит к снижению основных показателей – прожорливости, плодовитости и биологической эффективности энтомофага. В открытом грунте хармония демонстрирует высокие результаты хищничества (до 95 %). По данным фитосанитарного мониторинга за последние 5 лет имаго и личинки старших возрастов кокцинеллиды успешно регулируют численность комплекса тлей до единичных особей, в частности биоконтроль олеандровой тли (до 89 %), уничтожает широкий спектр фитофагов в том числе *Homotoma ficus* (Linnaeus, 1758) всех стадий развития (до 94,6 %). По данным многолетних наблюдений, *Harmonia axyridis* Pall. является единственным хищником *Aphis nerii (*Fonscolombe*, 1841)* на территории Лазаревского района.

В 1990 г. из Юго-Восточной Азии на Лазаревскую опытную станцию интродуцирован хищник тлей - леис димидиата (*Leis dimidiata* Fabr.*)* не акклиматизировавшийся в регионе г. Сочи, тем не менее лабораторная популяция *Leis dimidiata* Лазаревской станции на протяжении целого ряда лет демонстрирует высокие показатели биологической эффективности (94 %) в контролируемых тепличных условиях. С 2009 года нами ведется работа по селекционному улучшению лабораторной популяции *Leis dimidiata*. В результате выявлена генетическая гетерогенность кокцинеллиды по признаку плодовитости. В ходе отбора по данному признаку насекомые не

утрачивают своих положительных качеств. Личинки *Leis dimidiata* обладают высокой прожорливостью, за период своего развития способны уничтожить более 2000 особей тлей. Прожорливость личинок четвертого возраста – 83 %, личинок третьего-четвертого возрастов – 95 %. Личинки очень активны, в третьем и четвертом возрастах они способны преодолеть 200-300 м за сутки в поисках пищи. Энтомофаг проявляет активное хищничание в рассадных отделениях закрытого грунта по отношению ко тле, мучнистому червецу и белокрылке. Значительного накопления энтомофага в защищенном грунте не происходит ввиду высокой миграционной активности имаго кокцинеллиды, прожорливости, более продолжительного жизненного цикла *Leis dimidiata* в сравнении с Aphidoidea. Для стремительного подавления крупных колоний тлей в закрытом грунте выпускали личинок третьего и четвертого возрастов. В небольших колониях, численностью до 60 особей, осуществляли биоконтроль при помощи личинок младших возрастов. Большая продолжительность личиночного развития леис является ее неоспоримым преимуществом, позволяя сокращать кратность выпусков.

Первые колонии тли, благодаря биологическим особенностям, ускользали из-под пресса специализированных паразитов (лизифлебус, афидиус). В данный период выпуски леис позволили эффективно контролировать численность фитофагов. Поскольку первые колонии не отличаются высокой плотностью (30–50 особей на растение) и степенью заселения растений, для осуществления биоконтроля применяли личинок леис второго возраста непосредственно в очаги вредителя. Существенная заселенность растений тлей является сигналом для локальных выпусков энтомоафидофага леис в соотношении 1:10 (хищник-жертва). Макролофус и дицифус - аборигенные на черноморском побережье г. Сочи виды полифагов, обладают прожорливостью до 40 имаго или 30 личинок фитофага в сутки, высоким поисковым способностям, выдерживают кратковременное повышение температуры окружающей среды до +42°С. Развитие личинок клопов-афидофагов начинается при достижении температуры воздуха +13°С. Как показывает практика, применение хищных клопов в качестве биоагентов на овощных культурах в закрытом грунте эффективно методом сезонной колонизации, методами превентивного и наводняющего выпусков. Метод превентивного выпуска хищных клопов в теплицах на этапе посева семян позволяет сохранить молодые растения от уничтожения тлей в период, когда размеры популяций основных афидофагов в силу особенностей их биологического развития еще не достигли требуемого объема.

Заключается в создании резерваций макролофуса и дицифуса в теплицах путем высадки растений табака с яйцекладками хищников. При появлении вредителей проводили дополнительные выпуски энтомофагов в колонии тли, придерживаясь пропорции хищник-жертва 1:10, 1:20. При таком соотношении численность вредителя снижалась до единичных особей на десятый день. В различных условиях эффективность макролофуса и дицифуса против тлей в закрытом грунте составила 60-85 % при соотношении хищник:жертва 1:30.

Было установлено, что *Macrolophus nubilis* и *Dicyphus errans* способны к развитию на 30 видах растений из 16 ботанических семейств при условии присутствия кормовой базы. На таких культурах, как гибискус, пеларгония и примула было зафиксировано присутствие данных хищных энтомофагов после уничтожения ими тли. С целью размножения клопы отдавали предпочтение томату и табаку, значительно более низкую - на растениях огурца. Поэтому осуществляли выпуск хищных афидофагов наводняющим методом. Эффективность использования макролофуса повышалась при комплексном применении с другими энтомофагами.

Применение лабораторных популяций специализированных паразитов тли лизифлебуса и афидиуса в закрытом грунте показали хорошие результаты. При соотношении паразит:хозяин 1:15, в результате трехкратных выпусков отмечено паразитирование 70% вредителей. Многолетний мониторинг образования очагов колоний кровяной тли подтвердил высокую биологическую эффективность природного паразита афелинуса. К концу вегетационного периода уровень паразитирования вредителя достигал 84 %. Афидофаг успешно сдерживает расширение ареалов кровяной тли, препятствуя образованию новых очагов вредителя.

Несмотря на выявленную высокую эффективность указанных афидофагов, их моно-применение в качестве единственного биоагента приносит желаемый эффект только при несущественной численности вредителя. Тля - один из наиболее плодовитых фитофагов и обладает очень высокой скоростью увеличения численности популяции. Сроки и скорость развития тлей зачастую не совпадают со сроками и скоростью развития хищников-афидофагов. В этой связи целесообразно единовременное применение комплекса афидофагов с целью эффективной биологической защиты культур от вредителя. Для успешной защиты овощных культур в тепличных условиях нами проводились мероприятия по упреждающей колонизации комплекса энтомофагов. Наибольшую эффективность в контролировании численности тлей показал комплекс, состоящий из кокцинеллид, сирфид,

галлицы афидимизы, макролофуса и дицифуса. Также в периоды существенного нарастания численности тлей применяются специализированные паразиты тлей - лизифлебус и афидиус. Такая стратегия позволяет насытить агроценоз афидофагами, обеспечив их видовое разнообразие, и в кратчайшие сроки снизить численность вредителя до единичных особей.

В ходе исследований был выявлен больший количественный и видовой состав природных энтомофагов в условиях, когда сельскохозяйственные площади или посадки декоративных видов растений окружались разнообразной кустарниково-травянистой растительностью. Это связано с тем, что хищникам и паразитам тлей необходимо наличие естественных укрытий для успешного развития. До начала периода размножения на участках происходит активное накопление афидофагов. Далее насекомые перемещаются на участки, заселенные вредителем, где происходит процесс откладывания яиц. Следовательно, в систему биологического контроля численности тлей необходимо вводить агротехнические мероприятия, направленные на формирование мест укрытий для энтомофагов с целью повышения эффективности защитных мероприятий.

Стратегия перехода ведения сельского хозяйства на более высокий экологичный уровень предполагает значительное снижение применения пестицидных обработок вплоть до их полного исключения. Однако на данном этапе полный отказ от использования пестицидов в производственных масштабах невозможен. Задача науки - помочь аграриям в выборе наиболее безопасных препаратов, исключающих существенный вред полезной энтомофауне. С этой целью нами были осуществлены испытания токсичности инсектицидов и фунгицидов по отношению к энтомофагам-хищникам и энтомофагам-паразитам. В ходе исследований был дан ответ на вопрос: какие препараты и при каких условиях можно в достаточной степени рекомендовать для использования в рамках интегрированных систем защиты растений. Результатом стало выявление ряда биоинсектицидов и фунгицидов, оказывающих наименьшее токсическое действие на энтомофагов. При этом было отмечено негативное влияние некоторых препаратов на дальнейшее развитие насекомых. Так, было зафиксировано снижение количества окуклившихся личинок от 34,7 % до 37,9 % и вылетевших имаго хармонии от 29,9 % до 33,6 %. Наиболее эффективными и безопасными биопрепаратами для применения в качестве средства контроля численности тлей в условиях высокой плотности заселения вредителем определены препараты на основе выявленных в регионе энтомопатогенных грибов рр. Beauveria и рр. Lecanicillium. При высокой численности тлей рекомендо-

ваны трехкратные обработки суспензии титром 1×10^9 с интервалом 7–10 дней. Данный метод показал эффективность на уровне 84-90 %.

Выводы

В условиях пограничных субтропическо-умеренных климатических условиях в настоящий момент сложился устойчивый симбиоз палеарктических, субтропических и тропических видов тлей и афидофагов. Данные исследований эффективности афидофагов черноморского региона Краснодарского края позволяют предположить, что в случае невысоких темпов изменения климата в сторону повышения среднегодовых температуры и влажности воздуха, разноядные энтомофаги могут оказаться способными контролировать численность тлей в более северных районах России. Этот вывод подтверждается тем, что наибольшую биологическую эффективность показали хищники-полифаги хармония – до 95 %, макролофус и дицифус – до 70 %, сирфиды, галлица афидимиза и специализированные паразиты тли афидиус, афелинус – до 84% паразитирования, встречающиеся в естественных условиях в Средней полосе России или активно применяющиеся в закрытом грунте на большей части страны.

Комплексное применение агентов биоконтроля - кокцинеллид, сирфид, галлицы афидимизы, макролофуса, дицифуса с учетом особенностей биологического развития афидофагов и тлей позволило эффективно сдерживать рост популяции тлей и степень наносимого вредителями экономического ущерба. Применение наименее токсичных для энтомофагов инсектицидов и фунгицидов на основе аборигенных энтомопатогенных грибов Beauveria и Lecanicillium позволяет контролировать вредителя в случае вспышек его численности на экономически неощутимом уровне, с эффективностью до 90 % без нанесения ущерба фауне природных афидофагов.

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

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

Информация о спонсорстве. Работа проведена по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № FGRN-2025-0005.

Sponsorship information. The work was carried out according to the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of research on the topic No. FGRN-2022-0005.

Список литературы

1. Агасьева, И. С., Исмаилов, В. Я., Нефедова, М. В. и др. (2021). Оценка эффективности энтомофагов и акарифагов в системах биологической защиты яблоневого сада. *Достижения науки и техники АПК*, 35(2), 47-51. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10207 EDN: https://elibrary.ru/ofxpxm
2. Белякова, Н. А., Павлюшин, В. А. (2023). Скрининг биоресурсов насекомых и клещей для биологического контроля вредителей в защищенном грунте. *Вестник защиты растений*, 106(1), 49-70. https://doi.org/10.31993/2308-6459-2023-106-1-15533 EDN: https://elibrary.ru/ttwrxa
3. Игнатьева, Т. Н., Кашутина, Е. В., Бугаева, Л. Н. (2021). Leis dimidiata Fabr. в защите овощных культур закрытого грунта от комплекса тлей. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, (93), 188-193. https://doi.org/10.21515/1999-1703-93-188-193 EDN: https://elibrary.ru/oxmvsm
4. Кашутина, Е. В., Бугаева, Л. Н., Хетагурова, Е. В., Игнатьева, Т. Н., Ясюк, Л. В. (2023). Антропогенная трансформация фитосанитарной обстановки биоценозов Лазаревского района г. Сочи. *Достижения науки и техники АПК*, 37(5), 58-65. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_5_58 EDN: https://elibrary.ru/txvrfj
5. Кашутина, Е. В., Бугаева, Л. Н., Игнатьева, Т. Н., Хейшхо, И. В. (2021). Экологически безопасная защита чайных плантаций юга России. *Юг России: экология, развитие*, 16(4), 27-36. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-27-36 EDN: https://elibrary.ru/utibcf
6. Литвинова, С. В., Рак, Н. С. (2021). Природные афидофаги в агроценозах дендрологических коллекций Полярно-альпийского ботанического сада. *Труды Кольского научного центра РАН*, 12(6), 328-333. https://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.047 EDN: https://elibrary.ru/pyaoqp
7. Минияров, Ф. Т., Павлов, С. И., Яицкий, А. С. (2019). Питание семиточечной коровки Coccinella septempunctata L. (Coleoptera, Coccinelidae) на различных стадиях жизненного цикла. *Самарский научный вестник*, 8(2), 32-38. https://doi.org/10.17816/snv201982106 EDN: https://elibrary.ru/xhopok
8. Пушня, М. В., Родионова, Е. Ю., Снесарева, В. Я., Исмаилов, В. Я. (2020). Регулирующая роль энтомофагов доминантных вредителей озимой пшеницы в системах органического земледелия. *Достижения науки и техники АПК*, 34(7), 49-54. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10708 EDN: https://elibrary.ru/rsssxu
9. Тураева, С. М., Исмаилова, Д. С., Муратова, С. Х., Аллокулова, С. Б. (2021). Инсектицидная активность алкилпроизводных 5-(п-Аминофенил)-1,3,4-оксадиазол-2-тиона. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(3), 74-

88. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-3-74-88 EDN: https://elibrary.ru/cepczy
10. Aparicio, Y., et al. (2021). Can Insectary Plants Enhance the Presence of Natural Enemies of the Green Peach Aphid (Hemiptera: Aphididae) in Mediterranean Peach Orchards? *Journal of Economic Entomology*, 114(2), 784-793. https://doi.org/10.1093/jee/toaa298 EDN: https://elibrary.ru/musiea
11. Boulanger, F. X., Jandricic, S., Bolckmans, K., Wäckers, F. L., & Pekas, A. (2019). Optimizing aphid biocontrol with the predator Aphidoletes aphidimyza, based on biology and ecology. *Pest Management Science*, 75(6), 1479-1493. https://doi.org/10.1002/ps.5270
12. Dalal, Pappu Lal, Akhter Hussain, Sanju Piploda, & Heera Kumari. (2024). Feeding and Biotic Potential of Coccinellid Predators on Coriander Aphid. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(7), 419-423. https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i72595 EDN: https://elibrary.ru/yeuxwt
13. Dunn, L., Lequerica, M., Reid, C. R., & Latty, T. (2020). Dual ecosystem services of syrphid flies (Diptera: Syrphidae): pollinators and biological control agents. *Pest Management Science*, 76(6), 1973-1979. https://doi.org/10.1002/ps.5807 EDN: https://elibrary.ru/gpiutr
14. Holly, W. A., Nathan, H. P., Hoebeke, E. R., Thomas, K. P., & Salom, S. M. (2019). Predators associated with the pine bark adelgid (Hemiptera: Adelgidae), a native insect in Appalachian forests, United States of America, in its southern range. *The Canadian Entomologist*, 151(1), 73-84. https://doi.org/10.4039/tce.2018.53 EDN: https://elibrary.ru/neqkym
15. Honěk, A., Brabec, M., Martinkova, Z., et al. (2019). Factors determining local and seasonal variation in abundance of Harmonia axyridis (Coleoptera: Coccinellidae) in Central Europe. *European Journal of Entomology*, 116, 93-103. https://doi.org/10.14411/eje.2019.011 EDN: https://elibrary.ru/zskces
16. Liu, J.-F., Wang, X.-Q., Beggs, J. R., Ou, H.-D., Yu, X.-F., Shen, X.-X., & Yang, M.-F. (2020). Consuming Parasitized Aphids Alters the Life History and Decreases Predation Rate of Aphid Predator. *Insects*, 11(12), 889. https://doi.org/10.3390/insects11120889 EDN: https://elibrary.ru/cezzwo
17. Kacar, G. (2019). Bioecologies of pests, natural enemies in apple orchards of Seben (Bolu). *Uluslararasi Tarim Ve Yaban Hayati Bilimleri Dergisi*, 5(2), 286-291. https://doi.org/10.24180/ijaws.605651
18. Lian, Y., Wang, A., Peng, S., Jia, J., Yang, X., Li, J., Yang, S., Zheng, R., & Zhou, S. (2022). Potential global distribution area projections of the aphid Lipaphis erysimi and its predator Eupeodes corollae in the context of climate change. *Frontiers in Plant Science*, 13:1019693. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1019693 EDN: https://elibrary.ru/jwtrga

19. Lin, Q. C., Zhai, Y. F., Chen, H., Yin, Y. Y., Sun, M., Yu, Y., & Zheng, L. (2017). Predatory capacity of Aphidoletes aphidimyza (Rondani). *Chinese Journal of Biological Control*, 33, 171-175.
20. Singh, P., et al. (2020). Larval feeding capacity and pollination efficiency of the aphidophagous syrphids, Eupeodes frequens (Matsumura) and Episyrphus balteatus (De Geer) (Diptera: Syrphidae) on the cabbage aphid (Brevicoryne brassicae L.) (Homoptera: Aphididae) on mustard crop. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 1-9. https://doi.org/10.1186/s41938-020-00300-6 EDN: https://elibrary.ru/ajfkzo
21. Shaukat, M. A. (2018). Feeding behaviour and life durations of Chrysoperla carnea (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae) feeding on a variety of hosts. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(1), 691-697.
22. Zovko, M., Zivkovic, I. P., Lesic, V. L., & Lemic, D. (2021). Effect of Climate Change on Introduced and Native Agricultural Invasive Insect Pests in Europe. *Insects*, 12(11), 985. https://doi.org/10.3390/insects12110985 EDN: https://elibrary.ru/iodgaj

References

1. Agasieva, I. S., Ismailov, V. Ya., Nefedova, M. V., et al. (2021). Evaluation of the effectiveness of entomophages and acariphages in apple orchard biological protection systems. *Achievements of Science and Technology of Agroindustrial Complex*, *35(2)*, 47-51. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10207 EDN: https://elibrary.ru/ofxpxm
2. Belyakova, N. A., Pavlyushin, V. A. (2023). Screening of insect and mite bioresources for biological control of pests in protected ground. *Plant Protection Bulletin*, *106(1)*, 49-70. https://doi.org/10.31993/2308-6459-2023-106-1-15533 EDN: https://elibrary.ru/ttwrxa
3. Ignatye, T. N., Kashutina, E. V., Bugaeva, L. N. (2021). *Leis dimidiata* Fabr. in the protection of greenhouse vegetable crops from aphid complex. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, *(93)*, 188-193. https://doi.org/10.21515/1999-1703-93-188-193 EDN: https://elibrary.ru/oxmvsm
4. Kashutina, E. V., Bugaeva, L. N., Khetagurova, E. V., Ignatye, T. N., Yasuk, L. V. (2023). Anthropogenic transformation of the phytosanitary environment of biocenoses of the Lazarevsky district of Sochi. *Achievements of Science and Technology of Agroindustrial Complex*, *37(5)*, 58-65. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_5_58 EDN: https://elibrary.ru/txvrfj
5. Kashutina, E. V., Bugaeva, L. N., Ignatye, T. N., Kheyshkho, I. V. (2021). Environmentally safe protection of tea plantations in the south of Russia. *South*

of Russia: Ecology, Development, *16(4)*, 27-36. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-27-36 EDN: https://elibrary.ru/utibcf

6. Litvinova, S. V., Rak, N. S. (2021). Natural aphidophages in agrocenoses of dendrological collections of the Polar-Alpine Botanical Garden. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, *12(6)*, 328-333. https://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.047 EDN: https://elibrary.ru/pyaoqp
7. Miniyarov, F. T., Pavlov, S. I., Yatsik, A. S. (2019). Feeding of the seven-spotted ladybug *Coccinella septempunctata* L. (Coleoptera, Coccinelidae) at different stages of the life cycle. *Samara Scientific Bulletin*, *8(2)*, 32-38. https://doi.org/10.17816/snv201982106 EDN: https://elibrary.ru/xhopok
8. Pushnya, M. V., Rodionova, E. Yu., Snesareva, V. Ya., Ismailov, V. Ya. (2020). Regulating role of entomophages of dominant pests of winter wheat in organic farming systems. *Achievements of Science and Technology of Agroindustrial Complex*, *34(7)*, 49-54. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10708 EDN: https://elibrary.ru/rsssxu
9. Turaeva, S. M., Ismailova, D. S., Muratova, S. Kh., Allokulova, S. B. (2021). Insecticidal activity of alkyl derivatives of 5-(p-aminophenyl)-1,3,4-oxadiazole-2-thione. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *13(3)*, 74-88. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-3-74-88 EDN: https://elibrary.ru/cepczy
10. Aparicio, Y., et al. (2021). Can Insectary Plants Enhance the Presence of Natural Enemies of the Green Peach Aphid (Hemiptera: Aphididae) in Mediterranean Peach Orchards? *Journal of Economic Entomology*, 114(2), 784-793. https://doi.org/10.1093/jee/toaa298 EDN: https://elibrary.ru/musiea
11. Boulanger, F. X., Jandricic, S., Bolckmans, K., Wäckers, F. L., & Pekas, A. (2019). Optimizing aphid biocontrol with the predator Aphidoletes aphidimyza, based on biology and ecology. *Pest Management Science*, 75(6), 1479-1493. https://doi.org/10.1002/ps.5270
12. Dalal, Pappu Lal, Akhter Hussain, Sanju Piploda, & Heera Kumari. (2024). Feeding and Biotic Potential of Coccinellid Predators on Coriander Aphid. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(7), 419-423. https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i72595 EDN: https://elibrary.ru/yeuxwt
13. Dunn, L., Lequerica, M., Reid, C. R., & Latty, T. (2020). Dual ecosystem services of syrphid flies (Diptera: Syrphidae): pollinators and biological control agents. *Pest Management Science*, 76(6), 1973-1979. https://doi.org/10.1002/ps.5807 EDN: https://elibrary.ru/gpiutr
14. Holly, W. A., Nathan, H. P., Hoebeke, E. R., Thomas, K. P., & Salom, S. M. (2019). Predators associated with the pine bark adelgid (Hemiptera: Adelgidae), a native insect in Appalachian forests, United States of America, in its south-

ern range. *The Canadian Entomologist*, 151(1), 73-84. https://doi.org/10.4039/tce.2018.53 EDN: https://elibrary.ru/neqkym
15. Honěk, A., Brabec, M., Martinkova, Z., et al. (2019). Factors determining local and seasonal variation in abundance of Harmonia axyridis (Coleoptera: Coccinellidae) in Central Europe. *European Journal of Entomology*, 116, 93-103. https://doi.org/10.14411/eje.2019.011 EDN: https://elibrary.ru/zskces
16. Liu, J.-F., Wang, X.-Q., Beggs, J. R., Ou, H.-D., Yu, X.-F., Shen, X.-X., & Yang, M.-F. (2020). Consuming Parasitized Aphids Alters the Life History and Decreases Predation Rate of Aphid Predator. *Insects*, 11(12), 889. https://doi.org/10.3390/insects11120889 EDN: https://elibrary.ru/cezzwo
17. Kacar, G. (2019). Bioecologies of pests, natural enemies in apple orchards of Seben (Bolu). *Uluslararasi Tarim Ve Yaban Hayati Bilimleri Dergisi*, 5(2), 286-291. https://doi.org/10.24180/ijaws.605651
18. Lian, Y., Wang, A., Peng, S., Jia, J., Yang, X., Li, J., Yang, S., Zheng, R., & Zhou, S. (2022). Potential global distribution area projections of the aphid Lipaphis erysimi and its predator Eupeodes corollae in the context of climate change. *Frontiers in Plant Science*, 13:1019693. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1019693 EDN: https://elibrary.ru/jwtrga
19. Lin, Q. C., Zhai, Y. F., Chen, H., Yin, Y. Y., Sun, M., Yu, Y., & Zheng, L. (2017). Predatory capacity of Aphidoletes aphidimyza (Rondani). *Chinese Journal of Biological Control*, 33, 171-175.
20. Singh, P., et al. (2020). Larval feeding capacity and pollination efficiency of the aphidophagous syrphids, Eupeodes frequens (Matsumura) and Episyrphus balteatus (De Geer) (Diptera: Syrphidae) on the cabbage aphid (Brevicoryne brassicae L.) (Homoptera: Aphididae) on mustard crop. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 1-9. https://doi.org/10.1186/s41938-020-00300-6 EDN: https://elibrary.ru/ajfkzo
21. Shaukat, M. A. (2018). Feeding behaviour and life durations of Chrysoperla carnea (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae) feeding on a variety of hosts. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(1), 691-697.
22. Zovko, M., Zivkovic, I. P., Lesic, V. L., & Lemic, D. (2021). Effect of Climate Change on Introduced and Native Agricultural Invasive Insect Pests in Europe. *Insects*, 12(11), 985. https://doi.org/10.3390/insects12110985 EDN: https://elibrary.ru/iodgaj

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кашутина Евгения Викторовна, старший научный сотрудник, кандидат технических наук

Лазаревская опытная станция защиты растений – филиал Федерального научного центра биологической защиты растений
Сочинское шоссе, 77, г. Сочи, Российская Федерация
kashutinaev@mail.ru

Бугаева Людмила Николаевна, ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук
Лазаревская опытная станция защиты растений – филиал Федерального научного центра биологической защиты растений
Сочинское шоссе, 77, г. Сочи, Российская Федерация
bugaevaln@mail.ru

Игнатьева Татьяна Николаевна, старший научный сотрудник
Лазаревская опытная станция защиты растений – филиал Федерального научного центра биологической защиты растений
Сочинское шоссе, 77, г. Сочи, Российская Федерация
ignateva.tn@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya V. Kashutina, Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences
Lazarevskaya experimental plant protection station – branch of Federal Scientific Center for Biological Plant Protection
77, Sochinskoe shosse, Sochi, 354200, Russian Federation
kashutinaev@mail.ru
SPIN-code: 6723-5308
Scopus Author ID: 57414642200
Researcher ID: AAO-7852-2020
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6179-2019

Ludmila N. Bugaeva, Leading Researcher, Candidate of Biological Sciences
Lazarevskaya experimental plant protection station – branch of Federal Scientific Center for Biological Plant Protection
77, Sochinskoe shosse, Sochi, 354200, Russian Federation
bugaevaln@mail.ru
SPIN-code: 1630-2672
Scopus Author ID: 57414800300
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2159-9652

Tatuna N. Ignatieva, Senior Researcher
Lazarevskaya experimental plant protection station – branch of Federal Scientific Center for Biological Plant Protection
77, Sochinskoe shosse, Sochi, 354200, Russian Federation
ignateva.tn@mail.ru
SPIN-code: 9220-1734
Scopus Author ID: 57432862300
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0595-2882

Поступила 14.08.2024 Received 14.08.2024
После рецензирования 24.09.2024 Revised 24.09.2024
Принята 16.10.2024 Accepted 16.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1116 **EDN: KAIYAV**
УДК UDC 632.4.01/.08:632.952:632.95.025.8

CC BY NC ND

Original article

FITNESS OF VENTURIA INAEQUALIS ISOLATES WITH RESISTANCE TO MULTIPLE CHEMICAL CLASSES OF FUNGICIDES IN VITRO

A.I. Nasonov, G.V. Yakuba, M.V. Bardak, N.A. Marchenko

Abstract

Background. The development of fungicide resistance in the apple scab pathogen suggests the development of measures to manage the development of resistance that can functionally delay the emergence of resistant populations of the pathogen. Knowledge of the pathogen's fitness is essential to applying this approach and assessing how successful it will be, since resistance may come with a fitness cost.

Purpose. To evaluate the fitness of sensitive *Venturia inaequalis* isolates and isolates with multiple fungicide resistances to osmotic and oxidative stress in vitro.

Methods. The size of isolates from four groups (a group with baseline sensitivity and three groups with different multiple resistances to fungicides) was evaluated on potato-glucose agar with the addition of various concentrations of NaCl (2, 3, 4, and 6%) and H_2O_2 (2, 5, and 10 mM).

Results. The inhibition of mycelium growth in variants with the addition of NaCl relative to the control occurred on average by about 10% with an increase in concentration of 1%. In all variants of the experiment, the average size of isolates in the initial group was smaller than in the pathogen groups with resistance to fungicides. Oxidative stress has the following effect on the average size of the isolates: in the control, it was 12.2 mm; at a concentration of H_2O_2, it was 2 mM–6.7 mm; and at 5 mM–1.3 mm. There was a tendency for the isolates to have a higher average size in the group with simultaneous resistance to two fungicides, compared with other groups at concentrations of H_2O_2 of 2 mM and 5 mM.

Conclusion. The absence of significant lower values of the average size of isolates in groups with multiple resistances to fungicides in comparison with the baseline group under in vitro stress conditions shows the absence of fitness cost.

Keywords: apple scab; fitness cost; resistance; fungicide; DMI, anilinopyrimidines; SDHI; osmotic stress; oxidation stress

For citation. Nasonov, A. I., Yakuba, G. V., Bardak, M. V., & Marchenko, N. A. (2025). Fitness of *Venturia inaequalis* isolates with resistance to multiple chemical classes of fungicides in vitro. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 412-433. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1116

Научная статья

ПРИСПОСОБЛЕННОСТЬ ИЗОЛЯТОВ VENTURIA INAEQUALIS С УСТОЙЧИВОСТЬЮ К НЕСКОЛЬКИМ ХИМИЧЕСКИМ КЛАССАМ ФУНГИЦИДОВ IN VITRO

А.И. Насонов, Г.В. Якуба, М.В. Бардак, Н.А. Марченко

Аннотация

Обоснование. Развитие устойчивости к фунгицидам у возбудителя парши яблони предполагает разработку мер по управлению её развитием, которые могут функционально отсрочить появление резистентных популяций патогена. Знание о приспособленности патогена необходимо для применения этой подхода и оценки того, насколько успешным он будет, поскольку резистентность может сопровождаться «платой» за приспособленность.

Цель. Оценить приспособленность чувствительных изолятов *Venturia inaequalis* и изолятов со множественной устойчивостью к фунгицидам к осмотическому и оксидативному стрессу *in vitro*.

Материалы и методы. Оценивали размер изолятов четырех групп (группа с исходной чувствительностью и 3 группы с различной множественной устойчивостью к фунгицидам) на картофельно-глюкозном агаре с добавлением различных концентраций NaCl (2, 3, 4 и 6 %) и H_2O_2 (2, 5 и 10 мМ).

Результаты. Торможение роста мицелия в вариантах с добавлением NaCl относительно контроля происходило в среднем примерно на 10 % при увеличении концентрации на 1 %. В всех вариантах опыта средний размер изолятов в исходной группе был меньше, чем в группах патогена с устойчивостью к фунгицидам. Оксидативный стресс оказывал следующее влияние на средний размер изолятов: в контроле он был 12,2 мм; при концентрации H_2O_2 2 мМ - 6,7 мм; 5 мМ - 1,3 мм. Была отмечена тенденция более высокого среднего размера изолятов в группе с одновременной устойчивостью к двум фунгицидам, в сравнение с другими группами при концентрации H_2O_2 2 мМ и 5 мМ.

Заключение. Отсутствие значимых более низких значений среднего размера изолятов в группах с множественной устойчивостью к фунгицидам в сравнение с исходной группой в условиях стрессов *in vitro* показывает отсутствие «платы» за приспособленность.

Ключевые слова: парша яблони; «плата» за приспособленность; резистентность; фунгициды; триазолы; анилинопиримидины; SDHI; осмотический стресс; оксидативный стресс

Для цитирования. Насонов, А. И., Якуба, Г. В., Бардак, М. В., & Марченко, Н. А. (2025). Приспособленность изолятов *Venturia inaequalis* с устойчивостью к нескольким химическим классам фунгицидов *in vitro*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 412-433. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1116

Introduction

Among the fungal diseases of the apple tree, scab plays a leading role in terms of economic importance. It is caused by the obligate parasite *Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter. An integrated protection system in orchards against this ascomycete requires the use of chemical fungicides. It is known that the use of fungicides with a single point of effect on the metabolism of a phytopathogenic fungus can V. inaequalis resistance has been revealed, lead to the development of resistance to them [18]. A wide spread of which refers to fungicides from the chemical class of benzimidazoles, which led to a ban on their use against scab in many countries, including Russia [7; 25]. There is also a decrease in the sensitivity of pathogen populations to other fungicides from chemical groups: Sterol Demethylation Inhibitors (DMI), Quinone outside inhibitor (QoI), Anilinopyrimidines (AP), and Succinate Dehydrogenase Inhibitors (SDHI) fungicides [3-5; 12; 18; 22]. Reducing the effectiveness of existing and future active substances contributes, on the one hand, to the creation of new effective compounds by manufacturing companies [1], and on the other hand, to the search for ways to reduce the development of resistance to fungicides [29].

The development of resistance to fungicides in the field is determined by many factors, such as selection pressures, the susceptibility of the host plant, the rate of consumption of the fungicide, the intervals between applications, the resistance of the fungicide to environmental conditions, and the method of its application. Selection pressure, expressed in the toxic effect of the active substance, is one of the main factors leading to the selection of fungus forms with reduced sensitivity to the fungicide. The stability of a sign of resistance to a fungicide, in turn, is determined by whether it is a genetic load in the absence of exposure to a fungicide. If such a sign leads to a decrease in the fitness of the

pathogen in non-selective conditions, we are dealing with the so-called fitness cost [20]. The identification of such effects is of great practical importance for the creation of anti-resistance programs, as it allows you to regulate the rate and time of onset of resistance in the pathogen population.

The cost of fitness can be studied relating to of predicted fitness by evaluating various indicators of isolates in the laboratory: mycelium growth, germination, and spore formation. The actual fitness of a pathogenic microorganism can be studied *in vivo* in competitive exclusion experiments [9, 11]. Many studies aimed at identifying fitness disorders in fungicide-resistant fungi have contradictory results [20]. While some studies have demonstrated that resistant isolates' fitness decreases in both *in vitro* and *in vivo* trials [20], other investigations have demonstrated that the fitness cost in such populations is negligible or nonexistent [11-13; 15; 17; 26].

Materials and methods

Isolate selection. About 45 isolates were selected from the working collection of single-spore cultures of *Venturia inaequalis* at the Laboratory for Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages. The isolates differed in sensitivity to various fungicides and were collected either in industrial orchard plantations of domestic apple trees or natural eastern apple trees in various regions of the Krasnodar Territory (Table 1). Sensitivity assessment of isolate pathogens was carried out earlier [3-5; 7]. The preparation of single-spore isolates was carried out using the technique described earlier [2]. The isolates were divided into four groups depending on their sensitivity to four chemical groups of fungicides (benzimidazoles, Qol, DMI, and AP) in vitro. The "baseline" group included isolates with baseline sensitivity, that is, isolates of the pathogen that never interacted with fungicides and were collected in the natural ecosystems of the oriental apple tree. The remaining groups were characterized by multiple resistance to two ("Resist2"), three ("Resist3"), and four ("Resist4") active substances of fungicides (Table 1).

When selecting the studied isolates into one or another resistance group, the following assumptions were used: isolates pathogen with EC_{50} values for difenoconazole (the chemical group of active substances, DMI) > 0.1 mg/l, pyrimethanil (anilinopyrimidines) > 0.1 mg/l, carbendazim (benzimidazoles), and trifloxystrobin (Qol) were considered resistant isolates at 100 mg/l.

Maintaining pure cultures. The cultures were inoculated in tubes with a beveled potato glucose agar medium (PGA) and incubated for 20 days at 20 °C in the dark. After the culture, it was placed in the refrigerator at 4 °C, stored for 6 months, and replanted.

Table 1.

Characteristics of groups of single-spore isolates of Venturia inaequalis

Group	Fungicide resistance	Host plant species	Place of selection,
Baseline	absent	*Malus orientalis* Uglitzk.	Seversky district
Resist2	Benzimidazoles and Qol*	*Malus x domestica* Borkh.	Krasnoarmejskij, Vyselkovskij district
Resist3	Benzimidazoles, Qol and DMI**		
Resist4	Benzimidazoles, Qol, DMI and AP***		

Note: * Qol - Quinone outside inhibitor; ** DMI - Sterol Demethylation Inhibitors; ***AP – Anilinopyrimidines

Mycelial growth. Agar blocks containing mycelium from single-spore cultures were transferred to a PGA medium in plastic Petri dishes with a diameter of 90 mm using cork borer and incubated at 20 °C for 30 days. Experimental Petri dishes were seeded with 5 mm-diameter agar blocks using cork borer and incubated at 18 °C for 30 days [6]. After that, the diameter of each culture was measured with a ruler in two mutually perpendicular directions, and an average value was obtained. The size of the isolates was taken into account without a seed block. Each isolate was sown four times.

Osmotic sensitivity. The effect of salt stress conditions on mycelium growth was assessed by adding sodium chloride solution to the PGA medium to a final concentration of 2, 3, 4, and 6%.

Oxidative stress. To simulate oxidative stress, a solution of H_2O_2 (technical hydrogen peroxide 37%, grade A) was added to experimental cups with a PGA medium to a final concentration of 2, 5, and 10 mM. An equivalent amount of water was added to the control versions of the PGA medium.

Statistical analysis. Experiments were carried out for each isolate in fourfold repetition. The data is presented as the average values of the values for each group with their standard errors. Due to the fact that the normal distribution of the values of the size of the isolates was not observed for all groups, the nonparametric Kruskal-Wallis test was used for statistical verification of the data. A posteriori Dunn's test was performed to identify differences between individual groups. To reduce the probability of a first-kind error in multiple comparisons, the Bonferroni correction was used. Statistical data processing was performed using the software PAST [19]. The differences between the average values of the groups were considered significant at $p < 0.05$.

Results

Evaluation of mycelium growth of the entire sample of isolates at different concentrations of NaCl

All the studied salt concentrations led to a significant inhibition of the growth of the mycelium of pathogen isolates on the PGA medium (Figure 1). Meanwhile, at a concentration of NaCl in the nutrient medium of 6%, there was no growth in all isolates (data are not shown).

The average values of the size of the isolates in the control were 11.5 mm at a NaCl concentration of 2%–3.7 mm, 3%–1.9 mm, and 4%–0.9 mm. Inhibition of mycelium growth in the salt-added experimental variants relative to the control occurred on average by about 10% with an increase in NaCl concentration of 1%, which amounted to 68%, 84%, and 92%, respectively.

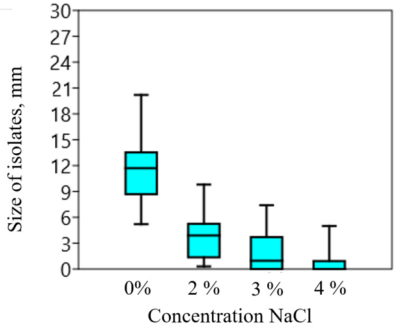


Fig. 1. Diagram of the range of values of the size of *Venturia inaequalis* isolates at different concentrations of NaCl

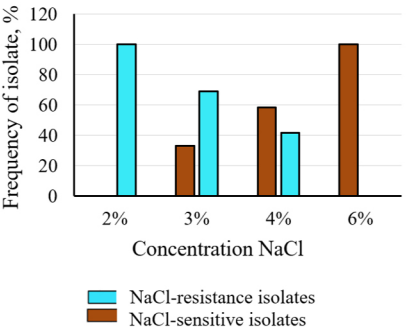


Fig. 2. Distribution of *Venturia inaequalis* isolates with different resistance to salt stress, at different concentrations of NaCl

In addition to differences in the average size of the isolates, there were also differences in the ratio of isolates capable of growing at a specific salt concentration (salt-resistant) and non-growing (salt-sensitive, Figure 2).

Thus, at 2% NaCl, all isolates were able to grow, whereas at concentrations of 3 and 4%, the proportion of such isolates was 69 and 42%, respectively. All the studied isolates were sensitive to a NaCl concentration of 6%.

It was also noted that the values of mycelium growth of isolates at salt concentrations of 2% and 3% correlated significantly with mycelium growth without NaCl, with r values of about 0.4, which corresponds to the average correlation strength. Thus, the reduction in the size of the isolates under the influence of the stress factor occurred monotonously, and the isolates that had

large sizes relative to other isolates in the control retained their position relative to the same isolates in salt-added variants.

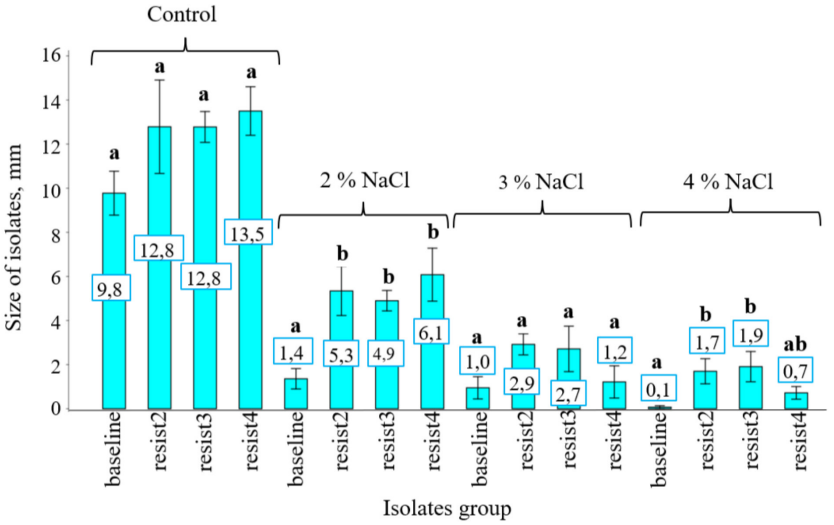
Table 2.

Correlation between different experimental options according to the level of mycelial growth *Venturia inaequalis*

	Control	2 % NaCl	3 % NaCl	4 % NaCl
Control		0,022*	0,048	0,109
2 % NaCl	0,465**		0,022	0,003
3 % NaCl	0,408	0,464		0,001
4 % NaCl	0,336	0,587	0,673	

Note: * in the upper right corner are the significance values of *p*; **in the lower left corner of the table are the correlation values of *r*

Evaluation of mycelium growth in groups of pathogen isolates at different concentrations of NaCl



Note: Different letters show the presence of significant differences between the average values of the diameter of the isolates in the groups within each experiment according to the data of the a posteriori test of multiple comparisons of Dann, taking into account the Bonferroni correction at $p < 0.05$.

Fig. 3. Variations in the average values of mycelium growth of *Venturia inaequalis* isolates at different concentrations of NaCl in groups differing in multiple resistance to fungicides, mm

In the control variant, as well as at all concentrations of NaCl, the average size of isolates in the initial group was smaller than in other pathogen groups (Figure 3). In experiments with salt concentrations of 2% and 4%, these differences were statistically significant.

The qualitative composition of the isolates also differed in terms of resistance to salt stress. At NaCl concentrations of 3% and 4%, the number of non-stress-tolerant isolates in the original group was greater than in the others (Figure 4). The data obtained show that there is no fitness cost in groups of isolates with multiple resistance to fungicides.

Evaluation of the mycelium growth of the entire sample of isolates at different concentrations of hydrogen peroxide

The addition of H_2O_2 to the nutrient medium led to a significant decrease in the growth of the mycelium of pathogen isolates (Figure 5). At the maximum concentration of hydrogen peroxide in the nutrient medium, at 10 mM, growth was absent in all isolates. The average values of the size of the isolates in the control were 11.5 mm at a concentration of H_2O_2 of 2 mM–6.7 mm and 5 mM–1.3 mm. The inhibition of mycelium growth in the experimental variant with a concentration of hydrogen peroxide of 2 mM relative to the control was 50%, and at a concentration of 5 mM, it was 60%.

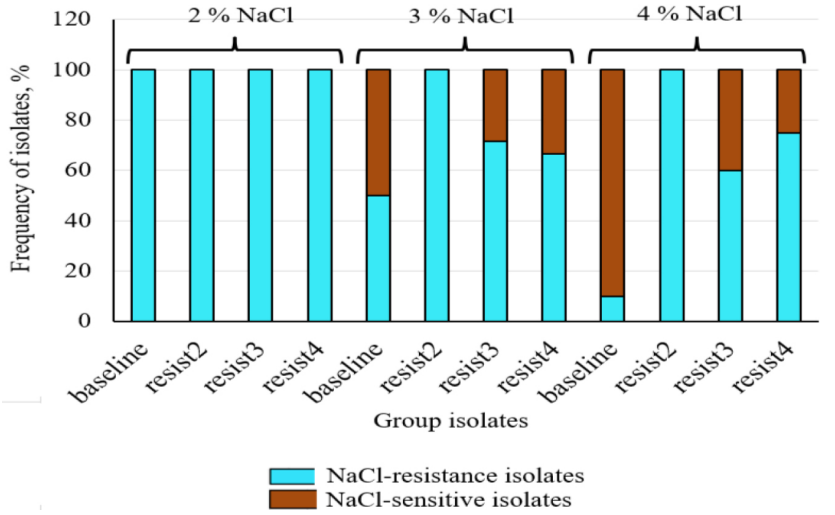


Fig. 4. Distribution of *Venturia inaequalis* isolates in groups characterized by varying degrees of resistance to salt stress at different concentrations of NaCl

There were also differences in the ratio of isolates growing (resistant) at a specific concentration of H_2O_2 to non-growing (sensitive) isolates. Already at the first concentration, 12% of the isolates showed no signs of growth; at 5 mM H_2O_2, the proportion of such isolates reached 72%; at a concentration of 10 mM, 100% of the isolates were sensitive to oxidative stress and showed no signs of mycelium growth in the nutrient medium.

An evaluation of the relationship between the experimental variants showed that the sizes of isolates at H_2O_2 concentrations of 2 mM and 5 mM correlated with each other at an acceptable level of significance (Table 3).

Evaluation of mycelium growth in groups of pathogen isolates at different concentrations of H_2O_2

A comparison of the growth of mycelium isolates in different groups showed no significant differences between them. At the same time, it is possible to note the tendency for a higher average size of isolates in the Resist2 group in comparison with other groups, both in the variant with the addition of H_2O_2 of 2 mM and the addition of 5 mM (Figure 7).

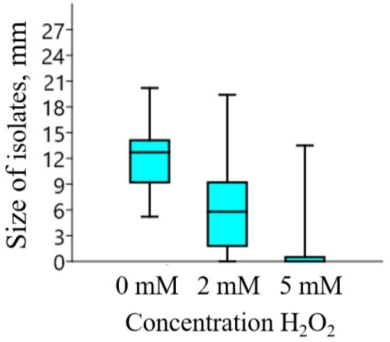


Fig. 5. Diagram of the range of values of the size of *Venturia inaequalis* isolates at different concentrations of H_2O_2

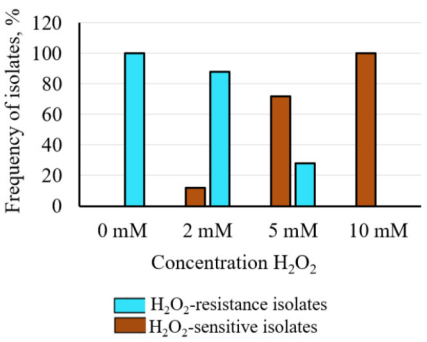


Fig. 6. Distribution of *Venturia inaequalis* isolates with different resistance to oxidative stress, at different concentrations of $H_{2O}2$

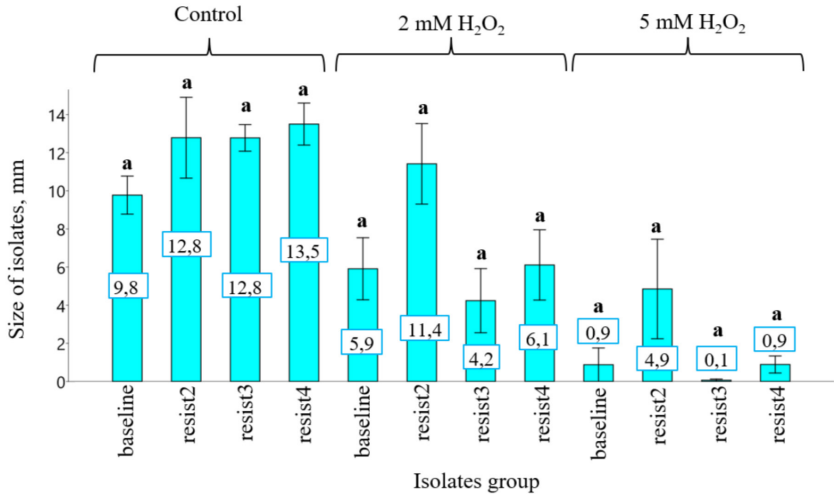
The same trend is confirmed by data on the distribution of isolates sensitive to and resistant to oxidative stress in these two experiments. Thus, at a concentration of hydrogen peroxide of 2 mM, all isolates in the Resist2 group were resistant to oxidative stress, and at a concentration of 5 mM, the proportion of such isolates in this group was higher than in the rest (Figure 8).

Table 3.

Correlation between different variants of the experience in terms of mycelium growth *Venturia inaequalis*

	Control	2 mM $H_{2O}2$	5 mM H_2O_2
Control		0,817*	0,194
2 mM H_2O_2	-0,044**		0,018
5 mM H_2O_2	0,244	0,428	

Note: * in the upper right corner are the significance values of *p*; **in the lower left corner of the table are the correlation values of *r*



Note: One and the same letter shows the absence of significant differences between the average values of the diameter of the isolates in the groups within each experiment according to the data of the a posteriori test of multiple comparisons of Dunn, taking into account the Bonferroni correction at $p < 0.05$.

Fig. 7. Variations in the average values of mycelium growth of *Venturia inaequalis* isolates at different concentrations of H_2O_2 in groups differing in multiple resistance to fungicides, mm

The same trend in the qualitative structure of these groups was observed in the experiment with osmotic stress. The Resist 2 group at NaCl concentrations of 3 and 4% consisted of salt-stress-resistant isolates. This group of isolates is characterized by resistance to two chemical groups of fungicides: benzimidazoles and Qol, which are characterized by the development of resistance by qualitative type, while isolates from the Resist3 and Resist4 groups, in addition, were resistant to fungicides with a quantitative type of resistance development.

The absence of significant differences between the size of isolates in the baseline group and the group with resistance to fungicides indicates the absence of fitness costs.

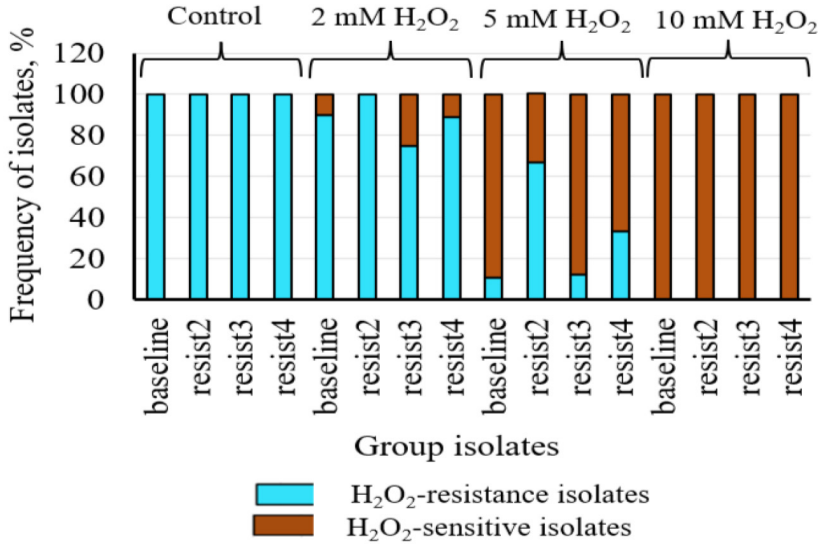


Fig. 8. Distribution of *Venturia inaequalis* isolates in groups characterized by varying degrees of resistance to oxidative stress at different concentrations of H_2O_2

Discussion

This is the first study of the fitness of the in vitro to osmotic and oxidative stress of *Venturia inaequalis* isolates resistant to fungicides from several chemical classes. Given the recent empirical confirmation of fungicide resistance in *V. inaequalis* populations in Russia [3-5; 7], we must implement fungicide-resistant management measures that can effectively delay the emergence of new resistance. Knowledge of fitness is essential to successfully applying these tactics and assessing how successful they will be in postponing the selection of resistant strains, as resistance may be accompanied by fitness penalties that affect the likelihood of resistance accumulation in the absence of selection pressure [24]. In the present study, the fitness of the apple scab pathogen was assessed by measuring in vitro parameters from the point of view of "predicted fitness" [9].

Our work showed that baseline and fungicide-resistant *V. inaequalis* isolates did not differ significantly in vitro mycelial expansion in response to osmotic and oxidative stress, suggesting the absence of any fitness impairment under

these in vitro parameters. Likewise, some studies assessing fungicide-resistant isolates of different pathogens of the diseases have not shown significant variations in predicted fitness metrics [6; 11-13; 15; 20; 21; 30]. Thus, American scientists have shown the absence of a negative effect on the growth of isolates with multiple resistances to fungicides at 19 °C on PGA [20]. Similar data were obtained by Russian researchers when assessing the suitability of V. inaequalis with multiple resistances to fungicides in vitro [6]. This study assessed the effects of different temperatures and agar concentrations on the growth of isolates; none of these factors showed the superiority of the original isolates over the resistant isolates, except a temperature of 27 °C.

There are no studies evaluating the fitness of the scab pathogen to osmotic and oxidative stress; however, there are numerous studies performed on other phytopathogenic fungi [10; 11; 13-16; 21; 23; 26; 28]. Many studies have shown that high resistance to fludioxonil, belonging to the chemical class of phenylpyrroles, is associated with increased osmotic sensitivity [14; 16; 23; 26; 28]. It is assumed that fludioxonil mimics the osmotic stress signal by binding to a special receptor, causing inadequate activation, which leads to excessive accumulation of glycerol, ion fluxes, and high turgor pressure in cells [14]. For other fungicides, there was no association between reduced growth of isolates on media with the addition of salt or hydrogen peroxide and resistance to fungicides [10; 15; 21; 27; 30]. For example, of the six osmotic stress agents tested, all isolates of *Alternaria alternata* with dicarboxymide resistance had increased tolerance only to D-sorbitol; however, no significant differences between sensitive and resistant isolates were observed in response to the addition of 0.6 M KCl, 0.6 M NaCl, 32 mM H_2O_2, SDS at a concentration of 0.05 mg/ml, or Congo red [30]. The analysis of three *A. alternata* isolates having resistance to SDHI, QoI, and MBC fungicides simultaneously showed no signs of decreased fitness in response to osmotic stress. In the case of oxidative stress, one of the three isolates with multiple resistances to these fungicides showed reduced mycelium growth rates on a medium with the addition of paraquat. This resistance isolate was distinguished from all others by the presence of a mutation in the D subunit of the SDH enzyme, which determines resistance to SDHI fungicides [15]. Reactive oxygen species (ROS) in small concentrations play the role of regulatory molecules for various cellular functions. However, an increase in the processes of free radical oxidation and a violation of the balance between pro- and antioxidants lead to an increase in the concentration of ROS, which contribute to oxidative damage to macromolecules, activation of proteolytic enzymes, and other

events leading to a violation of the regulation of cell proliferation and apoptosis [8]. Hydrogen peroxide and paraquat are the most common agents for modeling the process of oxidative stress.

The absence of fitness cost in vitro under osmotic stress has been shown in various studies for *Botrytis cinerea* isolates that cause diseases of vegetable crops and apple trees and are resistant to anilinopyrimidines, QoI (pyraclostrobin), and SDHI (boscalid) fungicides [10, 21]. Similar results for the object closest to the one we studied were obtained on isolates of *Venturia effusa*, a pecan scab pathogen resistant to fentin hydroxide and tebuconazole [27].

Conclusion

For the first time, the fitness of isolates with multiple resistances to fungicides under osmotic and oxidative stress was evaluated in vitro for *Venturia inaequalis*. Exposure to various types of stress had a significant effect on the growth of the pathogen mycelium in the laboratory. At the same time, *V. inaequalis* isolates with multiple resistances to fungicides did not significantly differ in mycelium growth from isolates with basic sensitivity or had higher values. The results obtained show that there is no fitness cost for resistant isolates. The results obtained show the absence of fitness cost in resistant isolates. It can be assumed that resistant isolates can successfully compete with sensitive isolates in the orchard in the absence of a selective factor (fungicide), for example, when rotating a fungicide with one mechanism of action to another. In this case, there may be a further accumulation of resistant isolates in the population and an increase in its resistance. Thus, the currently used anti-resistance approaches based on the rotation of active substances with different mechanisms of action and the use of blended drugs can reduce the selection pressure on the sign of resistance and, consequently, reduce the rate of resistance development. However, such anti-resistance programs do not contribute to restoring the sensitivity of the population or reducing its resistance level. Therefore, when developing protection systems, it is necessary to focus only on the fact of the presence of resistance to chemical fungicides in this population.

Meanwhile, the data obtained by us indicate the absence of fitness cost in the conditions of assessing the “predicted fitness,” which was obtained in laboratory conditions, whereas the most accurate assessment is the “real fitness” in the interaction of the pathogen with the host plant. It seems promising to study the effect of the fitness cost in vivo experiments with an assessment of the pathogenesis features in *V. inaequalis* isolates resistant and sensitive to various fungicides.

Conflict of interest information. The authors of this study declare that they have no conflict of interest.

Sponsorship information. The research was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation within the framework of the scientific project № MFI-20.1/98.

References

1. Ivanova, E. V., Nikishina, M. B., Tretyakova, A. V., Mukhtorov, L. G., Perelomov, L. V., & Atroschenko, Yu. M. (2021). Study of the fungicidal activity of new derivatives of 7-R-1,5-dinitro-3,7-diazabicyclo [3.3.1] nonane-2-one. *Siberian Journal of Life Sciences & Agriculture*, *13(5)*, 307-320. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-307-320 EDN: https://elibrary.ru/xwvffk
2. Nasonov, A. I. (2019). A new method for obtaining Venturia inaequalis culture from ascospores. *Mycology and Phytopathology*, *53(1)*, 46-48. https://doi.org/10.1134/S0026364819010094 EDN: https://elibrary.ru/ytixyt
3. Nasonov, A. I., & Bardak, M. V. (2023). Morphotype composition and sensitivity to difenoconazole of populations of the apple scab pathogen differing in fungicide application history. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15(3)*, 219-238. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-219-238 EDN: https://elibrary.ru/qppsxf
4. Nasonov, A. I., Yakuba, G. V., & Astapchuk, I. L. (2021). Sensitivity of the Krasnodar population of Venturia inaequalis to difenoconazole, a sterol demethylation inhibitor. *Mycology and Phytopathology*, *55(4)*, 297-308. https://doi.org/10.31857/S0026364821040103 EDN: https://elibrary.ru/jahfjc
5. Nasonov, A. I., Yakuba, G. V., Astapchuk, I. L., & Marchenko, N. A. (2024). Sensitivity of initial and orchard populations of Venturia inaequalis to succinate dehydrogenase inhibitors (SDHI) fungicides. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *16(1)*, 189-210. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-707 EDN: https://elibrary.ru/notwnf
6. Nasonov, A. I., Yakuba, G. V., Bardak, M. V., Astapchuk, I. L., & Marchenko, N. A. (2024). Characterization of the adaptability of Venturia inaequalis isolates resistant and sensitive to fungicides in vitro. *Scientific Notes of Kazan University. Series: Natural Sciences*, *166(1)*, 23-37. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.23-37 EDN: https://elibrary.ru/djqcyr
7. Nasonov, A. I., Yakuba, G. V., & Lobodina, E. V. (2022). Long-term persistence of carbendazim resistance in Venturia inaequalis in the Krasnodar Territory (Russia). *Mycology and Phytopathology*, *56(5)*, 374-378. https://doi.org/10.31857/S0026364822050087 EDN: https://elibrary.ru/cmvduj

8. Pozhilova, E. V., Novikov, V. E., & Levchenkova, O. S. (2015). Reactive oxygen species in cell physiology and pathology. *Bulletin of Smolensk State Medical Academy*, *14(2)*, 13-22. EDN: https://elibrary.ru/uhovfr
9. Antonovics, J., Alexander, H. M. (1989). The concept of fitness in plant-fungal pathogen systems. *Plant Disease Epidemiology*, 2, 185-214.
10. Bardas, G. A., Myresiotis, C. K., Karaoglanidis, G. S. (2008). Stability and fitness of anilinopyrimidine-resistant strains of Botrytis cinerea. *Phytopathology*, 98(4), 443-450. https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-4-0443
11. Bauske, M. J., Mallik, I., Yellareddygari, S. K. R., Gudmestad, N. C. (2018). Spatial and temporal distribution of mutations conferring QoI and SDHI resistance in Alternaria solani across the United States. *Plant Disease*, 102(2), 349-358. https://doi.org/10.1094/PDIS-06-17-0852-RE
12. Chapman, K. S., Sundin, G. W., Beckerman, J. L. (2011). Identification of resistance to multiple fungicides in field populations of Venturia inaequalis. *Plant Disease*, 95(8), 921-926. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-10-0899
13. Dorigan, A. F., Moreira, S. I., Ceresini, P. C., Pozza, E. A., Belan, L. L., da Silveira, P. R., Alves, E. (2022). Higher fitness and competitive advantage of Pyricularia oryzae Triticum lineage resistant to QoI fungicides. *Pest Management Science*, 78(12), 5251-5258. https://doi.org/10.1002/ps.7144 EDN: https://elibrary.ru/bwmtoi
14. Dowling, M., Gelain, J., May De Mio, L. L., Schnabel, G. (2021). Characterization of high fludioxonil resistance in Botrytis cinerea isolates from Calibrachoa flowers. *Phytopathology*, 111(3), 478-484. https://doi.org/10.1094/phyto-07-20-0268-r EDN: https://elibrary.ru/idsdym
15. Fan, Z., Yang, J. H., Fan, F., Luo, C. X., Schnabel, G. (2015). Fitness and competitive ability of Alternaria alternata field isolates with resistance to SDHI, QoI and MBC fungicides. *Plant Disease*, 99(12), 1744-1750. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0354-RE
16. Fernández-Ortuño, D., Grabke, A., Bryson, P. K., Amiri, A., Peres, N. A., & Schnabel, G. (2014). Fungicide resistance profiles in Botrytis cinerea from strawberry fields of seven southern U.S. states. *Plant Disease*, 98(6), 825-833. https://doi.org/10.1094/PDIS-09-13-0970-RE
17. Fiaccadori, R. (2018). Persistence of Venturia inaequalis populations resistant to strobilurins in the field and in the glasshouse. *American Journal of Plant Sciences*, 9(4), 552-560. https://doi.org/10.4236/ajps.2018.94042
18. Frederick, Z. A., Villani, S. M., Cooley, D. R., Biggs, A. R., Raes, J. J., & Cox, K. D. (2014). Prevalence and stability of qualitative QoI resistance in populations of Venturia inaequalis in the Northeastern United States. *Plant Disease*, 98(8), 1122-1130. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-13-1042-RE

19. Hammer, Ø., & Harper, D. A. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9.
20. Karaoglanidis, G. S., Luo, Y., & Michailides, T. J. (2011). Competitive ability and fitness of Alternaria alternata isolates resistant to QoI fungicides. *Plant Disease*, 95(2), 178-182. https://doi.org/10.1094/PDIS-07-10-0510
21. Kim, Y. K., & Xiao, C. L. (2011). Stability and fitness of pyraclostrobin- and boscalid-resistant phenotypes in field isolates of Botrytis cinerea from apple. *Phytopathology*, 101(11), 1385-1391. https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-11-0123
22. Lesniak, K. E., Proffer, T. J., Beckerman, J. L., & Sundin, G. W. (2011). Occurrence of QoI resistance and detection of the G143A mutation in Michigan populations of Venturia inaequalis. *Plant Disease*, 95(8), 927-934. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-10-0898
23. Malandrakis, A. A., Vattis, K. N., Doukas, E. G., & Markoglou, A. N. (2013). Effect of phenylpyrrole-resistance on fitness parameters and ochratoxin production in Aspergillus carbonarius. *International Journal of Food Microbiology*, 165(3), 287-294. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.05.019
24. Mikaberidze, A., McDonald, B. A., & Bonhoeffer, S. (2014). Can high-risk fungicides be used in mixtures without selecting for fungicide resistance? *Phytopathology*, 104(4), 324-331. https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-13-0204-R
25. Quello, K. L., Chapman, K. S., & Beckerman, J. L. (2010). In situ detection of benzimidazole resistance in field isolates of Venturia inaequalis in Indiana. *Plant Disease*, 94(6), 744-750. https://doi.org/10.1094/PDIS-94-6-0744
26. Ren, W., Shao, W., Han, X., Zho, M., & Chen, C. (2016). Molecular and biochemical characterization of laboratory and field mutants of Botrytis cinerea resistant to fludioxonil. *Plant Disease*, 100(7), 1414-1423. https://doi.org/10.1094/PDIS-11-15-1290-RE
27. Standish, J. R., Brenneman, T. B., Brewer, M. T., & Stevenson, K. L. (2019). Assessing fitness costs and phenotypic instability of fentin hydroxide and tebuconazole resistance in Venturia effuse. *Plant Disease*, 103(9), 2271-2276. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-18-2292-RE
28. Wen, Z., Zhang, Y., Chen, Y., Zhao, Y., Shao, W., & Ma, Z. (2024). Characterization of the fludioxonil and phenamacril dual resistant mutants of Fusarium graminearum. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 200, 105815. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.105815 EDN: https://elibrary.ru/mjbhui
29. Yakuba, G. V., Astapchuk, I. L., Mazyrin, E. S., Nasonov, A. I., & Milovanov, A. V. (2022). The first report on the mycoparasite Trichothecium roseum (Pers. 1809) on Venturia inaequalis (Cooke) G. Winter in Russia. *Siberian Journal of Life Sciences & Agriculture*, 14(3), 11-23. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-11-23 EDN: https://elibrary.ru/bqxkrn

30. Zhao, W., Sun, C., Wei, L., Chen, W., Wang, B., Li, F., & Xiang, Z. (2021). Detection and fitness of dicarboximide-resistant isolates of Alternaria alternata from Dendrobium officinale, a Chinese indigenous medicinal herb. *Plant Disease*, 105(8), 2222-2230. https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1246-RE EDN: https://elibrary.ru/lbhzhd

Список литературы

1. Иванова, Е. В., Никишина, М. Б., Третьякова, А. В., Мухторов, Л. Г., Переломов, Л. В., Атрощенко, Ю. М. (2021). Изучение фунгицидной активности новых производных 7-R-1,5-динитро-3,7-диазабицикло [3.3.1] нонан-2-она. *Siberian Journal of Life Sciences & Agriculture*, 13(5), 307-320. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-307-320 EDN: https://elibrary.ru/xwvffk
2. Насонов, А. И. (2019). Новый способ получения культуры Venturia inaequalis из аскоспор. *Микология и фитопатология*, 53(1), 46-48. https://doi.org/10.1134/S0026364819010094 EDN: https://elibrary.ru/ytixyt
3. Насонов, А. И., Бардак, М. В. (2023). Морфотипический состав и чувствительность к дифеноконазолу популяций возбудителя парши яблони, различающихся историей применения фунгицида. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(3), 219-238. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-3-219-238 EDN: https://elibrary.ru/qppsxf
4. Насонов, А. И., Якуба, Г. В., Астапчук, И. Л. (2021). Чувствительность краснодарской популяции Venturia inaequalis к дифеноконазолу, ингибитору деметилирования стеринов. *Микология и фитопатология*, 55(4), 297-308. https://doi.org/10.31857/S0026364821040103 EDN: https://elibrary.ru/jahfjc
5. Насонов, А. И., Якуба, Г. В., Астапчук, И. Л., Марченко, Н. А. (2024). Чувствительность исходной и садовых популяций Venturia inaequalis к фунгицидам класса ингибиторов сукцинатдегидрогеназы (SDHI). *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 16(1), 189-210. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-1-707 EDN: https://elibrary.ru/notwnf
6. Насонов, А. И., Якуба, Г. В., Бардак, М. В., Астапчук, И. Л., Марченко, Н. А. (2024). Характеристика приспособленности устойчивых и чувствительных к фунгицидам изолятов Venturia inaequalis in vitro. *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*, 166(1), 23-37. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.23-37 EDN: https://elibrary.ru/djqcyr
7. Насонов, А. И., Якуба, Г. В., Лободина, Е. В. (2022). Длительное сохранение резистентности к карбендазиму у Venturia inaequalis в Краснодарском крае (Россия). *Микология и фитопатология*, 56(5), 374-378. https://doi.org/10.31857/S0026364822050087 EDN: https://elibrary.ru/cmvduj

8. Пожилова, Е. В., Новиков, В. Е., Левченкова, О. С. (2015). Активные формы кислорода в физиологии и патологии клетки. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*, 14(2), 13-22. EDN: https://elibrary.ru/uhovfr
9. Antonovics, J., Alexander, H. M. (1989). The concept of fitness in plant-fungal pathogen systems. *Plant Disease Epidemiology*, 2, 185-214.
10. Bardas, G. A., Myresiotis, C. K., Karaoglanidis, G. S. (2008). Stability and fitness of anilinopyrimidine-resistant strains of Botrytis cinerea. *Phytopathology*, 98(4), 443-450. https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-4-0443
11. Bauske, M. J., Mallik, I., Yellareddygari, S. K. R., Gudmestad, N. C. (2018). Spatial and temporal distribution of mutations conferring QoI and SDHI resistance in Alternaria solani across the United States. *Plant Disease*, 102(2), 349-358. https://doi.org/10.1094/PDIS-06-17-0852-RE
12. Chapman, K. S., Sundin, G. W., Beckerman, J. L. (2011). Identification of resistance to multiple fungicides in field populations of Venturia inaequalis. *Plant Disease*, 95(8), 921-926. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-10-0899
13. Dorigan, A. F., Moreira, S. I., Ceresini, P. C., Pozza, E. A., Belan, L. L., da Silveira, P. R., Alves, E. (2022). Higher fitness and competitive advantage of Pyricularia oryzae Triticum lineage resistant to QoI fungicides. *Pest Management Science*, 78(12), 5251-5258. https://doi.org/10.1002/ps.7144 EDN: https://elibrary.ru/bwmtoi
14. Dowling, M., Gelain, J., May De Mio, L. L., Schnabel, G. (2021). Characterization of high fludioxonil resistance in Botrytis cinerea isolates from Calibrachoa flowers. *Phytopathology*, 111(3), 478-484. https://doi.org/10.1094/phyto-07-20-0268-r EDN: https://elibrary.ru/idsdym
15. Fan, Z., Yang, J. H., Fan, F., Luo, C. X., Schnabel, G. (2015). Fitness and competitive ability of Alternaria alternata field isolates with resistance to SDHI, QoI and MBC fungicides. *Plant Disease*, 99(12), 1744-1750. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0354-RE
16. Fernández-Ortuño, D., Grabke, A., Bryson, P. K., Amiri, A., Peres, N. A., & Schnabel, G. (2014). Fungicide resistance profiles in Botrytis cinerea from strawberry fields of seven southern U.S. states. *Plant Disease*, 98(6), 825-833. https://doi.org/10.1094/PDIS-09-13-0970-RE
17. Fiaccadori, R. (2018). Persistence of Venturia inaequalis populations resistant to strobilurins in the field and in the glasshouse. *American Journal of Plant Sciences*, 9(4), 552-560. https://doi.org/10.4236/ajps.2018.94042
18. Frederick, Z. A., Villani, S. M., Cooley, D. R., Biggs, A. R., Raes, J. J., & Cox, K. D. (2014). Prevalence and stability of qualitative QoI resistance in populations of Venturia inaequalis in the Northeastern United States. *Plant Disease*, 98(8), 1122-1130. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-13-1042-RE

19. Hammer, Ø., & Harper, D. A. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9.
20. Karaoglanidis, G. S., Luo, Y., & Michailides, T. J. (2011). Competitive ability and fitness of Alternaria alternata isolates resistant to QoI fungicides. *Plant Disease*, 95(2), 178-182. https://doi.org/10.1094/PDIS-07-10-0510
21. Kim, Y. K., & Xiao, C. L. (2011). Stability and fitness of pyraclostrobin- and boscalid-resistant phenotypes in field isolates of Botrytis cinerea from apple. *Phytopathology*, 101(11), 1385-1391. https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-11-0123
22. Lesniak, K. E., Proffer, T. J., Beckerman, J. L., & Sundin, G. W. (2011). Occurrence of QoI resistance and detection of the G143A mutation in Michigan populations of Venturia inaequalis. *Plant Disease*, 95(8), 927-934. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-10-0898
23. Malandrakis, A. A., Vattis, K. N., Doukas, E. G., & Markoglou, A. N. (2013). Effect of phenylpyrrole-resistance on fitness parameters and ochratoxin production in Aspergillus carbonarius. *International Journal of Food Microbiology*, 165(3), 287-294. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.05.019
24. Mikaberidze, A., McDonald, B. A., & Bonhoeffer, S. (2014). Can high-risk fungicides be used in mixtures without selecting for fungicide resistance? *Phytopathology*, 104(4), 324-331. https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-13-0204-R
25. Quello, K. L., Chapman, K. S., & Beckerman, J. L. (2010). In situ detection of benzimidazole resistance in field isolates of Venturia inaequalis in Indiana. *Plant Disease*, 94(6), 744-750. https://doi.org/10.1094/PDIS-94-6-0744
26. Ren, W., Shao, W., Han, X., Zho, M., & Chen, C. (2016). Molecular and biochemical characterization of laboratory and field mutants of Botrytis cinerea resistant to fludioxonil. *Plant Disease*, 100(7), 1414-1423. https://doi.org/10.1094/PDIS-11-15-1290-RE
27. Standish, J. R., Brenneman, T. B., Brewer, M. T., & Stevenson, K. L. (2019). Assessing fitness costs and phenotypic instability of fentin hydroxide and tebuconazole resistance in Venturia effuse. *Plant Disease*, 103(9), 2271-2276. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-18-2292-RE
28. Wen, Z., Zhang, Y., Chen, Y., Zhao, Y., Shao, W., & Ma, Z. (2024). Characterization of the fludioxonil and phenamacril dual resistant mutants of Fusarium graminearum. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 200, 105815. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.105815 EDN: https://elibrary.ru/mjbhui
29. Yakuba, G. V., Astapchuk, I. L., Mazyrin, E. S., Nasonov, A. I., & Milovanov, A. V. (2022). The first report on the mycoparasite Trichothecium roseum (Pers. 1809) on Venturia inaequalis (Cooke) G. Winter in Russia. *Siberian Journal of Life Sciences & Agriculture*, 14(3), 11-23. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-11-23 EDN: https://elibrary.ru/bqxkrn

30. Zhao, W., Sun, C., Wei, L., Chen, W., Wang, B., Li, F., & Xiang, Z. (2021). Detection and fitness of dicarboximide-resistant isolates of Alternaria alternata from Dendrobium officinale, a Chinese indigenous medicinal herb. *Plant Disease*, 105(8), 2222-2230. https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1246-RE EDN: https://elibrary.ru/lbhzhd

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Andrei I. Nasonov: planning, obtaining Venturia inaequalis isolates, discussion and analysis of results, statistical processing of results, preparation of figures, writing the manuscript.

Galina V. Yakuba: selection of affected leaves, discussion and analysis of results, preparation of drawings, writing of the manuscript.

Maria V. Bardak: assessment of the fitness of monosporic isolates of Venturia inaequalis, culture of isolates, preparation and analysis of primary data, preparation of tables.

Nikita A. Marchenko: assessment of mycelium growth under various experimental options, preparation of primary data.

All authors read and contributed to improving the manuscript.

ВКЛАД АВТОРОВ

Насонов А.И.: планирование, получение изолятов *Venturia inaequalis*, обсуждение и анализ результатов, статистическая обработка результатов, подготовка рисунков, написание рукописи.

Якуба Г.В.: отбор поражённых листьев, обсуждение и анализ результатов, подготовка рисунков, написание рукописи.

Бардак М.В.: оценка приспособленности моноспоровых изолятов *Venturia inaequalis,* посев изолятов, подготовка и анализ первичных данных, подготовка таблиц.

Марченко Н.А.: оценка роста мицелия при различных вариантах опыта, подготовка первичных данных.

Все авторы прочитали и приняли участие в улучшении текста рукописи.

DATA ABOUT THE AUTHORS

Andrei I. Nasonov, Cand. Biol. Sci., Head of Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages Laboratory
Federal State Budget Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making»
39, im. 40-letiya Pobedy Str., Krasnodar, 350901, 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

Galina V. Yakuba, Cand. Biol. Sci., Senior Research Associate of Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages Laboratory
Federal State Budget Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making»
39, im. 40-letiya Pobedy Str., Krasnodar, 350901, 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

Maria V. Bardak, Junior Research Associate of Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages Laboratory
Federal State Budget Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making»
39, im. 40-letiya Pobedy Str., Krasnodar, 350901, Russian Federation
maria.brd1405@mail.ru
SPIN-code: 2569-9979
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1559-5073
Scopus Author ID: 58551970800

Nikita A. Marchenko, Junior Research Associate of Biotechnological Control of Phytopathogens and Phytophages Laboratory
Federal State Budget Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making»
39, im. 40-letiya Pobedy Str., Krasnodar, 350901, Russian Federation
marchekonikita@yandex.ru
SPIN-code: 8080-3469
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1325-4881
ResearcherID: ABA-3983-2021
Scopus Author ID: 57558038700

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Насонов Андрей Иванович, канд. биол. наук, заведующий лабораторией биотехнологического контроля фитопатогенов и фитофагов
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия»
ул. им. 40-летия Победы, 39, г. Краснодар, 350901, Российская Федерация
nasoan@mail.ru

Якуба Галина Валентиновна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории биотехнологического контроля фитопатогенов и фитофагов
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия»
ул. им. 40-летия Победы, 39, г. Краснодар, 350901, Российская Федерация
galyayaku@gmail.com

Бардак Мария Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологического контроля фитопатогенов и фитофагов
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия»
ул. им. 40-летия Победы, 39, г. Краснодар, 350901, Российская Федерация
maria.brd1405@mail.ru

Марченко Никита Александрович, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологического контроля фитопатогенов и фитофагов
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия»
ул. им. 40-летия Победы, 39, г. Краснодар, 350901, Российская Федерация
marchekonikita@yandex.ru

Поступила 25.07.2024 Received 25.07.2024
После рецензирования 20.09.2024 Revised 20.09.2024
Принята 27.09.2024 Accepted 27.09.2024

СИСТЕМА СЕЛЕКЦИИ И СЕМЕНОВОДСТВА

PLANT BREEDING AND SEED PRODUCTION

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1043 **EDN: KKBEWM**
УДК 631.527

CC BY NC ND

Научная статья

РАСОСПЕЦИФИЧЕСКАЯ ЛИСТОВАЯ И КОРНЕВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РАПСА (*BRASSICA NAPUS* L.) К *XANTHOMONAS CAMPESTRIS* PV. *CAMPESTRIS*

А.В. Вишнякова, М.А. Никитин, О.О. Румянцева, А.А. Миронов, С.Г. Монахос

Аннотация

Обоснование. О распространении сосудистого бактериоза в посевах озимого рапса сообщают исследователи из Франции, Сербии, России. Выращивание устойчивых сортов и гибридов считается наиболее эффективным методом снижения экономического ущерба от болезни. Сложность селекции на устойчивость к сосудистому бактериозу заключается в наличии не менее 11 рас патогена, к каждой из которых необходим свой ген устойчивости. Исследования расоспецифической устойчивости озимого рапса на искусственном инфекционном фоне ограничены изучением устойчивости к 1 и 4 расам *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* методом прокола листовой пластинки.

Цель. Изучить проявление листовой и корневой устойчивости рапса (*Brassica napus* L.) к сосудистому бактериозу, выявить источники высокой расоспецифической устойчивости к 1, 3, 4 и 6 расам *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*.

Материалы и методы. Скрининг устойчивости к сосудистому бактериозу на искусственном инфекционном фоне проводили с использованием генетической коллекции озимого рапса, представленной 30 образцами. Инокуляцию суспензией бактерий 1, 3, 4 и 6 рас *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* проводили в контролируемых условиях климатической камеры методами прокола листовой пластинки и травмированием корней. Оценку симптомов поражения сосудистым бактериозом проводили по двухбалльной шкале.

Результаты. В генетической коллекции озимого рапса выявлен 1 источник листовой устойчивости к 4 расе *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* Tетг. При инокуляции растений рапса травмированием корневой системы выделены образцы Дагг с корневой устойчивостью к 4 расе *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* и Фагг с корневой устойчивостью к 3 расе.

Заключение. У озимого рапса выявлены две независимые расоспецифические системы устойчивости к сосудистому бактериозу, которые проявляются при разных методах инокуляции возбудителем сосудистого бактериоза. Выявленные источники устойчивости могут быть использованы в селекционных программах рапса на устойчивость. Требуется проведение гибридологического и молекулярно-генетического анализа каждой из выявленных систем устойчивости.

Ключевые слова: расоспецифическая реакция; сосудистый бактериоз; корневая устойчивость; листовая устойчивость; озимый рапс; *Xanthomonas campestris* pv. *campestris (Xcc)*

Для цитирования. Вишнякова, А. В., Никитин, М. А., Румянцева, О. О., Миронов, А. А., & Монахос, С. Г. (2025). Расоспецифическая листовая и корневая устойчивость рапса (*Brassica napus* L.) к *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 434-455. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1043

Original article

RACE-SPECIFIC LEAF AND ROOT RESISTANCE OF WINTER OILSEED RAPE (*BRASSICA NAPUS* L.) TO *XANTHOMONAS CAMPESTRIS* PV. *CAMPESTRIS*

A.V. Vishnyakova, M.A. Nikitin, O.O. Rumiantseva, A.A. Mironov, S.G. Monakhos

Abstract

Background. Researchers from France, Serbia, and Russia have reported the spread of Black Rot in winter rape crop. The cultivation of resistant varieties and hybrids is considered to be the most effective method of reducing the economic damage caused by the disease. The complexity of breeding for resistance to Black Rot lies in the presence of at least 11 races of the pathogen *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, each of which requires its own resistance gene. Studies of race-specific resistance of winter rapeseed are limited to the study of resistance to 1 and 4 races of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* using leaf-piercing technique.

Purpose. The objective of this research is to study the manifestation of leaf and root resistance of rapeseed to Black Rot and to identify sources of high race-specific resistance to 1, 3, 4, and 6 races of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*.

Materials and methods. Artificial screening of resistance to black rot was carried out using a genetic collection of winter rapeseed, represented by 30 accessions. Inoculation using bacterial suspensions of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* was conducted under controlled conditions of a climate chamber. The inoculation process involved leaf-piercing technique by clipping the leaf edges near the veins using forceps or root traumatization. Black rot resistance or susceptibility were estimated on a two-point scale.

Results. One source of leaf resistance to race 4 of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* "Tegg" was identified in the genetic collection of winter rapseed. When plants were inoculated using the root traumatization system, the samples Dagg with root resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* race 4 and Fagg with root resistance to race 3 were identified.

Conclusion. Two independent race-specific systems of resistance to black rot have been identified in winter rapeseed, which are manifested using different methods of inoculation with *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* pathogen. The identified sources of resistance can be used in rapeseed breeding programs for resistance. Hybridologic and molecular genetic analysis of each of the identified resistance systems is required.

Keywords: winter oilseed rape; Xanthomonas campestris pv. campestris (Xcc); root resistance; leaf resistance; races; disease resistance

For citation. Vishnyakova, A. V., Nikitin, M. A., Rumiantseva, O. O., Mironov, A. A., & Monakhos, S. G. (2025). Race-specific leaf and root resistance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 434-455. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1043

Введение

Сосудистый бактериоз (СБ) – широко распространённое бактериальное заболевание капустных культур (возбудитель – *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*), несущее значительный экономический ущерб сельскохозяйственным культурам во всем мире [17]. В отдельные годы поражение посевов капустных культур может достигать 80% [1]. О распространении сосудистого бактериоза в посевах озимого рапса в последнее время сообщают исследователи в разных странах [14; 18; 19]. В России о наличии в посевах рапса сосудистого бактериоза писали Е.В. Матвеева с соавт. [8],

которые отмечают специфику проявления заболевания в виде бактериоза корней. Заболевание осенью протекает практически бессимптомно, при этом вызывает гибель растений во время перезимовки и характерные симптомы V-образного хлороза на листьях [8].

Меры борьбы с сосудистым бактериозом преимущественно превентивные и ограничены контролем зараженности семян, обязательным севооборотом, ограничением распространения крестоцветных сорняков и насекомых вредителей [6]. Выращивание устойчивых сортов и гибридов считается наиболее эффективным методом снижения экономического ущерба от болезни [6; 7]. Сложность создания устойчивых сортов и гибридов к сосудистому бактериозу обусловлена расоспецифической реакцией устойчивости и необходимостью комбинирования нескольких генов устойчивости в одном генотипе для надежной защиты. Известно не менее 11 рас патогена, из которых в России наиболее распространены пять 1, 3, 4, 5 и 6 и для эффективной защиты растений против каждого потенциального гена авирулентности патогена нужен комплементарный ген устойчивости растения [2; 4].

В настоящее время изучение расоспецифической устойчивости к сосудистому бактериозу сосредоточено на капусте белокочанной [9; 16; 23]. С. Г. Монахос и Н. В. Елышко [9] при изучении коллекции белокочанной капусты обнаружили 10 образцов с устойчивостью к 4 и 6 расам, при этом устойчивых образцов к 3 расе не было. O. N. Zubko с соавторами сообщают о применении отдаленной гибридизации для расширения генетического разнообразия капусты белокочанной (*B.oleracea* L.) интрогрессией из эфиопской горчицы (*B.carinata* L.) *Rb*-гена устойчивости к четырем наиболее распространенным расам *Xcc* [23]. L. Lu с соавторами проводят исследование механизма ответной реакции растений капусты на ранней биотрофной стадии инфицирования патогеном [16].

Стеблевую устойчивость к сосудистому бактериозу на капусте белокочанной исследуют путем инокуляции в пазуху листа [10]. Кроме того исследователи оценивают устойчивость к сосудистому бактериозу методами инокуляции в жилку листа, опрыскиванием листьев, травмированием корней [3; 10]. Разнообразие методов оценки устойчивости к заболеванию связано с многообразием источников распространения патогена [22]. В работе Ф.С. Джалилова с соавторами [5] было показано, что корреляция оценки устойчивости в полевых условиях и при инокуляции опрыскиванием суспензией патогена была выше по сравнению со степенью связи полевой оценки с оценкой при инокуляции травмированных жилок. В

тоже время при массовом развитии в поле вредителей и наличии других повреждающих факторов имеет место преимущественного проникновения патогена через травмы [3].

У рапса для оценки устойчивости к сосудистому бактериозу используют инокуляцию проколом листовой пластинки, что дает возможность на одном растении оценить устойчивость к нескольким расам патогена [13; 15; 21]. Учитывая преимущественный путь заражения растений озимого рапса через инфицированные растительные остатки в почве, мы считаем необходимым изучение наличия феномена корневой устойчивости у озимого рапса, показанного в работах В.Т.Н. Ха и А.Т. Орынбаева [3; 10] на капусте белокочанной.

Цель нашего исследования – изучить проявление листовой и корневой устойчивости рапса (*Brassica napus* L.) к сосудистому бактериозу, выявить источники высокой расоспецифической устойчивости к 1, 3, 4 и 6 расам *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*.

Задачи исследования:

1. Скрининг листовой устойчивости генетической коллекции озимого рапса (*B. napus* L.) к 1, 3, 4 и 6 расам *Xcc* при инокуляции проколом листовой пластинки и выявление источников расоспецифической листовой устойчивости к сосудистому бактериозу.

2. Скрининг корневой устойчивости генетической коллекции озимого рапса (*B. napus* L.) к 1, 3, 4 и 6 расам *Xcc* при инокуляции травмированием корневой системы и выявление источников расоспецифической корневой устойчивости к СБ.

Материалы и методы

Растительный материал. Генетическая коллекция озимого рапса включала 30 генетически гомогенных образцов, из которых 3 – гомозиготные линии удвоенных гаплоидов и 27 – гетерозиготных F1-гибридов (табл. 1). Посев и выращивание растений проводили в стандартных 8×8 ячеистых кассетах, в торфяной субстрат Агробалт С, в контролируемых условиях климатической камеры. Полив и подкормки растений проводили по мере необходимости. В качестве контроля восприимчивости к *Xcc* использовали высоко восприимчивый образец F1-гибрид Эдгг.

Подготовка инокулюма. Для инокуляции растений использовали штаммы *Xcc:* 76PPD, 06PPD, 77PPD и Xy2-1, которые относятся к 1, 3, 4 и 6 расам соответственно, из коллекции Станции защиты растений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Посев и культивирование бактерий *Xcc* проводили на

питательной среде YDC в чашках Петри диаметром 9 см. Чашки Петри с бактериями помещали в термостат BD 115 (Binder, Германия) и инкубировали при температуре +28 °C в течение 48 часов, после чего готовили инокулюм. Колонии бактерий отбирали с поверхности питательной среды и суспендировали в очищенной фильтрованием воде. Для определения оптической плотности суспензии бактерий использовали спектрофотометр Biophotometer Plus (Eppendorf, Германия) при длине волны 600 нм. Плотность бактериальной суспензии доводили до 1×10^6 КОЕ/мл.

Инокуляция растительного материала. Растения культивировали и инокулировали в контролируемых условиях фитопатологической камеры при температуре воздуха +27°C, влажности воздуха 80%, при интенсивности освещенности 4500 люкс, с фотопериодом 16/8 часов день/ночь.

Инокуляцию методом прокола по краю листовой пластинки (10 проколов на лист) проводили хирургическим пинцетом «tissue» 200×2,5 мм, кончики которого предварительно обматывали ватой и смачивали в суспензии бактерий [12]. Для работы использовали обеззараженные в электрическом прожигателе пинцеты, при переходе к инокуляции следующей расой руки дезинфицировали 70% спиртом. Каждое растение инокулировали четырьмя расами патогена, одна раса на один настоящий лист. Оценку проявления листовой устойчивости/восприимчивости проводили в двух повторениях при инокуляции растений в возрасте 4 недель и учете симптомов поражения через 14 дней после инокуляции (ДПИ), по 4 растения каждого образца.

Оценку корневой устойчивости проводили при инокуляции корневой системы растений рапса методом, описанным А.Т. Орынбаевым с соавт. [10] с модификациями: 4-х недельные сеянцы вынимали из кассеты вместе с субстратом, затем корни отмывали от торфяного субстрата под проточной водой, травмированную и промытую корневую систему помещали в суспензию бактерий *Xcc* (расы 1, 3, 4 и 6) с плотностью 1×10^6 КОЕ/мл на 15 минут, далее растения высаживали в горшки объёмом 0,7 литра наполненные торфяным субстратом Агробалт С.

Оценка проявления симптомов СБ. Через 14 дней после инокуляции (ДПИ) проколом листовой пластинки проводили оценку проявления симптомов поражения сосудистым бактериозом. Растения без симптомов поражения СБ считали устойчивыми, растения с типичными симптомами, имеющие V-образные хлорозы и некроз, принимали за восприимчивые.

При проведении повторной инокуляции коллекции рапса проколом листовой пластинки развитие симптомов сосудистого бактериоза также

отмечали через 14 ДПИ. Растения, не проявившие симптомы поражения СБ на 14 ДПИ дополнительно оценивали на 20 и 30 ДПИ. Анатомическое исследование распространения бактерий *Xcc* проводили на срезе стебля в поперечной плоскости с оценкой наличия/отсутствия потемнения пучков проводящей системы. Подтверждение распространения и наблюдаемого поражения сосудистой системы стебля бактериями *Xcc*, в том числе определение расы патогена проводили молекулярным генотипированием. Для молекулярного генотипирования бактерии патогена изолировали из стебля и культивировали *in vitro*.

Оценку симптомов системного поражения растений СБ при инокуляции травмированной корневой системы проводили через 20 ДПИ оценкой симптомов поражения листьев по двухбалльной шкале, где 0 – лист без признаков хлороза и некроза и 1 – наличие характерного для СБ V-образного хлороза и некроза. Далее через 40 ДПИ для анатомической оценки распространения бактерий патогена по сосудистой системе производили поперечный срез стебля и проводили качественную оценку наличия/отсутствия потемнения пучков проводящей системы.

Изоляция и культивирование бактерий in vitro из пораженных растений. После инокуляции растений проколом листовой пластинки стебли с потемневшими сосудистыми пучками отделяли от листовой и корневой системы и поверхностно стерилизовали в 70% этаноле в течение 30 секунд, а затем в 2% гипохлорите натрия в течение 10 минут, ополаскивали в стерильной воде, после чего обновляли срез стебля и прикладывали его к питательной среде YDC в чашках Петри, делая отпечаток, после 2-3 отпечатков срез обновляли. Один образец размещали в одной Чашке Петри диаметром 9 см, в каждой чашке делали 8-10 отпечатков с одного стебля. Чашки Петри накрывали, обматывали по краям лентой из пищевой пленки, далее инкубировали в темноте при температуре 28 °С в течение 24 часов. Характерные для *Xcc* круглые бледные желтоватые выпуклые и мукоидные бактериальные колонии использовали для молекулярного генотипирования.

Молекулярное генотипирование рас Xcc. Из 5 случайных колоний бактерий отбирали объединенную пробу, которую помещали в пробирку с реакционной смесью следующего состава 14,7 мкл H_2O, 1,0 мкл каждого праймера (10 пМ), 1,5 мкл 10х SuperTaq-буфера, 0,2 мкл SuperTaq-полимеразы, 0,6 мкл смеси dNTP и 1 мкл бактерий. Для ДНК-идентификации рас Xcc использовали маркер Xcc_85R1 для 1 расы [20], Xcc_49R3 – для 3 расы [11], Xcc1_46R4 – для 4 расы [20]. Продукты амплификации визуализировали путем разделения в 1,5 % агарозном геле с окрашиванием GelRed

Nucleic Acid Gel Stain 10X, размер продуктов амплификации оценивали с помощью маркера молекулярной массы DNA Ladder 100+ bp. Ожидаемый размер ампликонов маркера Xcc_85R1 – 500 п.н., Xcc_49R3 – 900 п.н. и Xcc1_46R4 -500 п.н.

Результаты

Скрининг и выявление источников листовой устойчивости к сосудистому бактериозу в генетической коллекции озимого рапса на искусственном инфекционном фоне

Изучение листовой устойчивости к сосудистому бактериозу в генетической коллекции озимого рапса проводили при инокуляции образцов 1, 3, 4 и 6 расами возбудителя СБ, *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (Xcc). При оценке проявления (наличия/отсутствия) симптомов поражения сосудистым бактериозом через 14 дней после инокуляции у отдельных образцов наблюдали частичное расхождение в реакции образцов на инокуляцию в первом и втором повторении инокуляции (табл.1). Устойчивыми к отдельной расе *Xcc* принимали образцы с отсутствием симптомов поражения сосудистым бактериозом при инокуляции в возрасте 4 недель. У контроля восприимчивости, образца Эдгг, симптомы поражения сосудистым бактериозом при инокуляции всеми четырьмя, 1, 3, 4 и 6, расами *Xcc* проявились в оба срока инокуляции.

Таблица 1.

Результаты скрининга листовой устойчивости образцов генетической коллекции озимого рапса к 1, 3, 4 и 6 расам *Xcc*

№	Наименование образца	генетический статус	1 раса (штамм 76ppd)		3 раса (штамм 06ppd)		4 раса (штамм 77ppd)		6 раса (штамм xy2-1)	
			1 повт.	2 повт.	1 повт.	2 повт.	1 повт.	2 повт.	1 повт.	2 повт.
1	Вигг	F1	+	+	+	+	+	-	+	+
2	Тегг	F1	+	+	+	-	-	-	+	+
3	Алгг	F1	+	+	+	+	+	-	+	+
4	Кегг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
5	Дг15мс×Фдг12	F1	+	+	+	+	+	-	+	+
6	Клгг	F1	+	+	+	-	+	-	+	+
7	Эдгг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
8	Дагг	F1	+	+	+	-	-	-	+	+
9	Кргг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
10	Легг	F1	+	+	+	+	+	+	-	+
11	Дг15мс×Фдг7	F1	+	+	+	+	-	-	+	+
12	Мегг	F1	-	+	+	-	+	+	-	+

13	Гогг	F1	+	+	+	+	+	+	-	+
14	Эйгг	F1	+	+	+	+	+	-	-	+
15	Дг15мс×Дг5	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
16	Дг15мс×Фдг1	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
17	Дг15мс×Фдг4-2	F1	+	+	+	+	-	+	+	+
18	Дг15мс×Фдг16	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
19	Дг15мс×Фдг18	F1	+	+	+	+	-	+	+	+
20	Кигг	F1	+	+	+	+	-	-	+	+
21	Кугг	F1	+	+	+	+	+	+	-	+
22	Дг15мс×Фдг4	F1	+	+	+	+	-	+	+	+
23	Дг15мс×Фдг11	F1	+	+	+	+	-	+	+	+
24	Дг15мс×Фдг10	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
25	Дг15мс×Фдг3	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
26	Дг15мс×Фдг2	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
27	Фагг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
28	Фдг15	DH	+	+	+	+	+	+	+	+
29	Фдг10	DH	+	+	+	+	+	+	+	+
30	Дг15	DH	-	+	+	+	+	-	+	+

Примечание: + – реакция восприимчивости, растения образцов имеют характерные V-образные хлорозы и некрозы на листьях; - – реакция устойчивости, отсутствие характерных симптомов поражения листьев всех растений образца

У всех 30 изученных образцов озимого рапса проявились симптомы поражения сосудистым бактериозом на листьях при инокуляции расами 1, 3 и 6. При анализе симптомов поражения на листьях через 14 ДПИ при инокуляции 4 расой выделили 4 устойчивых образцов Тегг (№2), Дагг (№8), Дг15мс× Фдг7 (№11), Кигг (№20).

Для анализа стабильности проявления устойчивости к 4 расе при втором повторении инокуляции провели дополнительные оценки симптомов поражения на листьях на 20 и 30 день после инокуляции у образцов, которые были отнесены к устойчивым (таблица 2).

Таблица 2.

Оценка проявления симптомов сосудистого бактериоза устойчивых образцов рапса при инокуляции 4 расой *Xcc* (штамм 77ppd) на 20 и 30 ДПИ

№	название образца	генетический статус	наличие симптомов поражения СБ, дней после инокуляции (ДПИ)		
			15 ДПИ	20 ДПИ	30 ДПИ
2	Тегг	F1	-	-	-
8	Дагг	F1	-	+	+
11	Дг15мс×Фдг7	F1	-	+	+
20	Кигг	F1	-	-	+

Примечание: + – реакция восприимчивости, растения образцов имеют характерные V-образные хлорозы и некрозы на листьях; - – реакция устойчивости, отсутствие характерных симптомов поражения листьев всех растений образца

При оценке на 20 день после инокуляции симптомы поражения сосудистым бактериозом появились у образцов Дагг и Дг15мс×Фдг7, при оценке на 30 ДПИ – у Кигг. Единственный образец у которого отсутствовали симптомы поражения весь период наблюдения был Тегг.

У всех образцов на 41 ДПИ был сделан поперечный срез стебля, на котором видно потемнение сосудов и некроз сосудистых пучков у пораженных образцов (рис.1). Отсутствовало потемнение сосудистого кольца стебля при инокуляции проколом листовой пластинки у образцов Кегг, Клгг, Дагг, что может быть связано с реализацией защитного механизма, повлекшего опадение пораженных листьев при распространении бактерий по жилке листа.

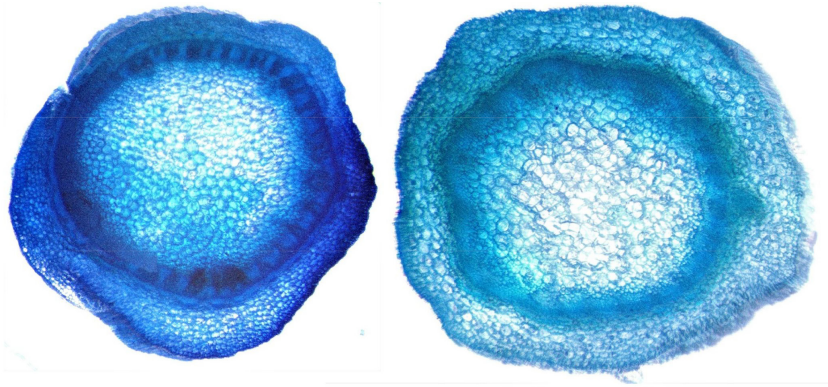


Рис. 1. Срез стебля с потемнением сосудистых пучков и признаками некроза (слева) и без признаков поражения сосудистых пучков (справа).

Из растений с потемневшими сосудами проводили изоляцию возбудителя, для изучения состава рас, которые поражают сосуды при инокуляции растений проколом листовой пластинки. Через 48 ч. инкубирования при температуре +28 °С после посева наблюдали формирование характерных для *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* округлых бледно-желтых выпуклых и мукоидных бактериальных колоний у всех изученных образцов. Морфология колоний совпадала с морфологией исходных штаммов Xcc.

Молекулярно-генетический анализ с использованием расоспецифических маркеров установил, что у образцов Клгг, Дг15, Дг15см х Фрг18, Дг15см х Фрг16, Легг в сосудистой системе обнаружены бактерии *Xcc* которые принадлежат 3 расе (рис.2). У образцов Клгг, Дг15см х Фрг18,

Гогг, Дг15, Фдг15, Вигг, Алгг в сосудистой системе были обнаружены бактерии, принадлежащие к 1 расе (рис. 3). Характерные ампликоны для 4 расы не выявлены при анализе расового состава бактерий ни у одного образца (рис.4). Остальные бактериальные колонии вероятно относятся к 6 расе сосудистого бактериоза.

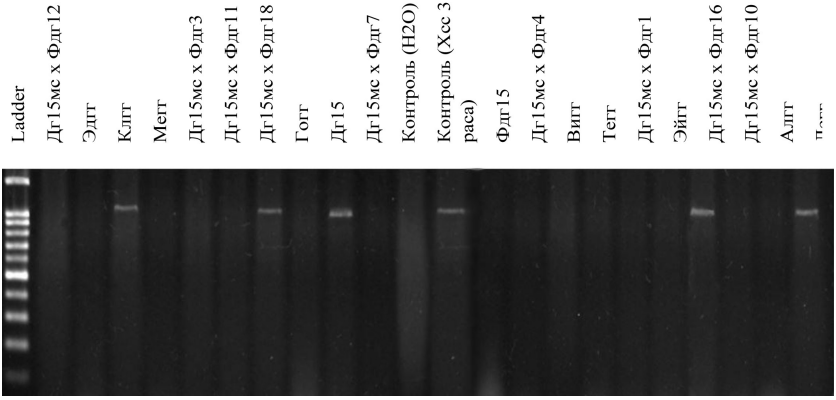


Рис. 2. Электрофореграмма ПЦР анализа с маркером Хсс_49 3 расы Хсс. Размер ожидаемого амплифицируемого фрагмента – 900 п.н. Ladder – маркер размеров ДНК-фрагментов 100 п.н.

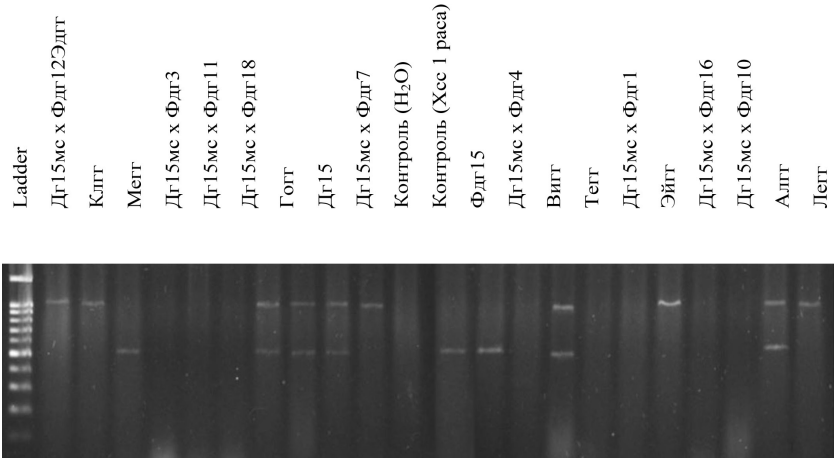


Рис. 3. Электрофореграмма ПЦР анализа с маркером Хсс_85 1 расы Хсс. Размер ожидаемого амплифицируемого фрагмента – 500 п.н. Ladder – маркер размеров ДНК-фрагментов 100 п.н.

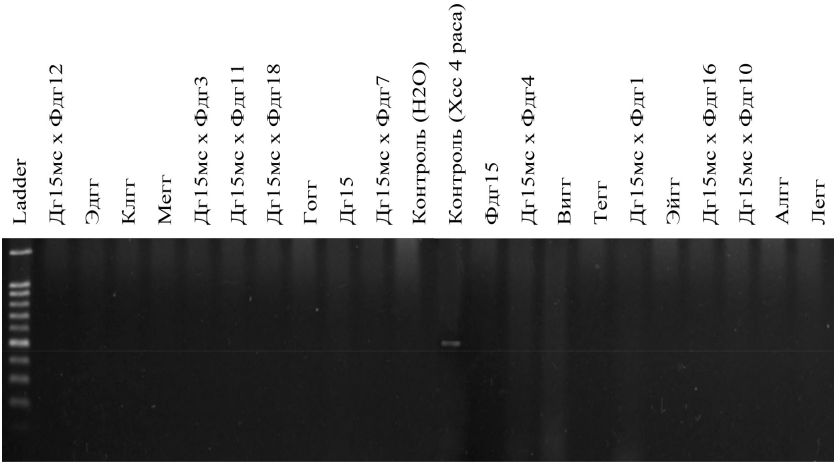


Рис. 4. Электрофореграмма ПЦР анализа с маркером Хсс1_46 4 расы Хсс, размер ожидаемого амплифицируемого фрагмента – 500 п.н. Ladder – маркер размеров ДНК-фрагментов 100 п.н.

Скрининг и выявление источников корневой устойчивости к сосудистому бактериозу в генетической коллекции озимого рапса

При инокуляции повреждением корневой системы у ряда образцов наблюдали проявление характерных V-образные хлорозов и некрозов на листьях на 20 ДПИ. На 40 ДПИ производили поперечный срез стебля для оценки симптомов поражения сосудистой системы СБ (табл. 3).

При инокуляции 1 расой Хсс травмированием корней отмечали потемнение сосудов стебля у всех изученных образцов, однако проявления симптомов заболевания на листьях у 6 образцов не наблюдали.

При инокуляции 3 расой у линии Фагг отсутствовали потемнение сосудов стебля и симптомы поражения листьев, ещё у 9 образцов симптомы на листьях отсутствовали, но наблюдали потемнение сосудов стебля.

При инокуляции 4 расой Хсс у 7 образцов отсутствовали симптомы поражения на листьях, однако потемнения сосудов стебля не было только у Дагг.

При оценке симптомов заболевания при инокуляции 6 расой наблюдали потемнение сосудов стебля у всех изученных образцов, отсутствовали характерные хлорозы и некрозы на листьях у Дг15мс×Фдг4-2, Дг15мс×Фдг16.

Таблица 3.

Результаты скрининга корневой устойчивости образцов генетической коллекции озимого рапса к 1, 3, 4 и 6 расам *Xcc* при оценке проявления симптомов СБ на листьях (20 ДПИ) и срезе стебля (40 ДПИ)

№	Наименование образца	генетический статус	1 раса (штамм 76ppd)		3 раса (штамм 06ppd)		4 раса (штамм 77ppd)		6 раса (штамм xy2-1)	
			проявление симптомов							
			лист	срез стебля	лист	срез стебля	лист	срез стебля	лист	срез стебля
1	Вигг	F1	-	+	-	+	+	+	+	+
2	Тегг	F1	+	+	-	+	+	+	+	+
3	Алгг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
4	Кегг	F1	+	+	+	+	-	+	+	+
5	Дг15мс×Фдг12	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
6	Клгг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
7	Эдгг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
8	Дагг	F1	+	+	+	+	-	-	+	+
9	Кргг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
10	Легг	F1	-	+	+	+	+	+	+	+
11	Дг15мс×Фдг7	F1	+	+	-	+	+	+	+	+
12	Мегг	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
13	Гогг	F1	+	+	-	+	-	+	+	+
14	Эйгг	F1	+	+	+	+	-	+	+	+
15	Дг15мс×Дг5	F1	-	+	+	+	-	+	+	+
16	Дг15мс×Фдг1	F1	-	+	+	+	+	+	+	+
17	Дг15м-с×Фдг4-2	F1	+	+	+	-	+	+	-	+
18	Дг15мс×Фдг16	F1	+	+	-	+	-	-	-	+
19	Дг15мс×Фдг18	F1	+	+	+	+	-	+	+	+
20	Кигг	F1	+	+	-	+	+	+	+	+
21	Кугг	F1	+	+	-	+	-	+	+	+
22	Дг15мс×Фдг4	F1	-	+	+	+	+	+	+	+
23	Дг15мс×Фдг11	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
24	Дг15мс×Фдг10	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
25	Дг15мс×Фдг3	F1	-	+	+	+	+	+	+	+
26	Дг15мс×Фдг2	F1	+	+	+	+	+	+	+	+
27	Фагг	F1	+	+	-	-	+	+	+	+
28	УМРх-дг15)3×Дг5	F1	+	+	-	+	-	+	+	+
27	Фдг15	DH	+	+	-	+	+	+	+	+
29	Дг15	DH	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание: + – реакция восприимчивости, растения образцов имеют характерные V-образные хлорозы и некрозы на листьях; - – реакция устойчивости, отсутствие характерных симптомов поражения листьев всех растений образца

Обсуждение

Исследования расоспецифической устойчивости озимого рапса на искусственном инфекционном фоне ограничены изучением устойчивости к

1 и 4 расам *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* [15; 21] либо изучением состава полевых изолятов *Xcc*, собранных с посевов озимого рапса [14]. В нашем исследовании мы расширили состав изучаемых рас *Xcc,* выбрав наиболее распространенные в России 1, 3, 4 и 6 расы *Xcc,* однако не выявили источники листовой устойчивости в коллекции озимого рапса к расам 1, 3 и 6 при инокуляции проколом листовой пластинки, что может объяснятся отсутствием целенаправленной селекции на устойчивость к сосудистому бактериозу у озимого рапса. Устойчивостью к 4 расе патогена обладал только один образец Тегг. Наличие в образцах рапса гена устойчивости к 4 расе ожидаемо и подтверждается рядом исследований [13; 21].

Для изучения распространения патогена по сосудистой системе стебля при инокуляции проколом листовой пластинки были сделаны поперечные срезы стебля. На срезах стебля отмечали потемнение сосудистых пучков, а при изоляции и инокуляции бактерий на питательную среду YDC - формирование характерных для *Xcc* бактериальных колоний. При молекулярно-генетическом анализе принадлежности к расовому составу выделенных бактерий *Xcc* у ряда образцов обнаруживали присутствие в сосудах стебля нескольких рас *Xcc* одновременно. При этом колоний бактерий, принадлежащих к 4 расе, не было обнаружено ни в одном из изолятов из изученных образцов стебля озимого рапса, что может свидетельствовать о меньшей конкурентности 4 расы по отношению к 1, 3 и 6 расам.

При анализе корневой устойчивости рапса выделены образцы Дагг с устойчивостью к 4 расе Xcc и Фагг с корневой устойчивостью к 3 расе. Образец Тегг, проявивший устойчивость к 4 расе при инокуляции проколом листовой пластинки, был восприимчив ко всем расам *Xcc* при инокуляции корней. Отсутствие сильной корреляции между корневой и листовой устойчивостью отмечают в своих исследованиях на капусте белокочанной В.Т.Н Ха и А.Т. Орынбаев [3; 10]. В.Т.Н. Ха с соавт. [3], изучая устойчивость к сосудистому бактериозу у капусты белокочанной, отмечали среднюю корреляционную связь в проявлении устойчивости при инокуляции проколом листовой пластинки и травмированием корней.

Заключение

Скрининг генетической коллекции (30 ед. образцов) озимого рапса на устойчивость к 1, 3, 4 и 6 расам *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* при использовании двух методов инокуляции, инокуляции корней и инокуляции листовой пластинки, выявил независимость генетических систем, контролирующих листовую и корневую расоспецифическую устойчивость к сосу-

дистому бактериозу. Вместе с этим впервые показано проявление корневой устойчивости к сосудистому бактериозу у образцов озимого рапса.

Морфологический, анатомический и молекулярно-генетический анализ проявления симптомов сосудистого бактериоза при инокуляции 1, 3, 4 и 6 расами *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* позволил выделить источники корневой устойчивости к 4 расе (образец Дагг) и к 3 расе (образец Фагг) *Xcc*, и источник листовой устойчивости к 4 расе (образец Тегг) *Xcc*.

Выявленные источники корневой и листовой устойчивости могут быть использованы в селекционных программах для пирамидирования генов устойчивости и создания F1-гибридов озимого рапса с разными типами устойчивости к сосудистому бактериозу, вызываемому двумя распространенными в России 3 и 4 расами Xcc. Отсутствие устойчивости к сосудистому бактериозу может стать проблемой при выращивании озимого рапса в ближайшем будущем, о чем уже сообщают исследователи Франции и Сербии.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с соглашением 075-15-2023-220 на поддержку программы развития университета «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Артемьева, А. М., Игнатов, А. Н., Волкова, А. И., Кочерина, Н. В., Коноплева, М. Н., & Чесноков, Ю. В. (2018). Физиолого-генетические компоненты устойчивости к сосудистому бактериозу у линий удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L. *Сельскохозяйственная биология*, 53(1), 157-169. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.1.157rus EDN: https://elibrary.ru/vzwyix
2. Во Тхи Нгок Ха, Джалилов, Ф. С., Виноградова, С. В., Кырова, Е. И., & Игнатов, А. Н. (2014). Генетическое разнообразие возбудителя сосудистого бактериоза в России: полиморфизм пцр фрагментов. *Защита картофеля*, (2), 21-25.
3. Во Тхи Нгок Ха, Джалилов, Ф. С., & Игнатов, А. Н. (2015). Оценка устойчивости различных гибридов белокочанной капусты к сосудистому бактериозу. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*, (2), 7-15.
4. Во Тхи Нгок Ха, Джалилов, Ф. С., Мазурин, Е. С., Кырова, Е. И., Виноградова, С. В., Шаад, Н. В., Ластер, Д., & Игнатов, А. Н. (2014). Распростра-

нение нового генотипа *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* в России в 2012 гг. *Защита картофеля*, (2), 26-28.

5. Джалилов, Ф. С., Корсак, И. В., & Монахос, Г. Ф. (1995). Сравнение методов оценки устойчивости капусты к сосудистому бактериозу. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, (2), 147-153.
6. Игнатов, А. Н., Джалилов, Ф. С., Мирошников, К. А., & Евсеев, П. В. (2021). *Xanthomonas campestris*: основные результаты и проблемы исследования возбудителя сосудистого бактериоза капустных. *Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты*, 13, 153-168. https://doi.org/10.47612/2226-3136-2021-13-153-168 EDN: https://elibrary.ru/qpqqt
7. Лазарев, А. М., Мысник, Е. Н., & Игнатов, А. Н. (2017). Ареал и зона вредоносности сосудистого бактериоза капусты. *Вестник защиты растений*, 1(91), 52-55.
8. Матвеева, Е. В., Игнатов, А. Н., Политыко, В. А., & Фокина, В. Г. (2008). Бактериальные болезни рапса. *Защита и карантин растений*, (12), 23-24.
9. Монахос, С. Г., & Елышко, Н. В. (2015). Устойчивость капусты к сосудистому бактериозу. *Картофель и овощи*, (9), 38-39.
10. Орынбаев, А. Т., Джалилов, Ф. С., & Монахос, Г. Ф. (2019). Методы оценки и характер наследования стеблевой устойчивости к сосудистому бактериозу у белокочанной капусты. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, (1), 45-55.
11. Afrin, K. S., Rahim, M. A., Rubel, M. H., Natarajan, S., Song, J., Kim, H., Park, J., & Nou, I. (2018). Development of race-specific molecular marker for *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* race 3, the causal agent of black rot of crucifers. *Canadian Journal of Plant Science*, 98(5), 1119-1125. https://doi.org/10.1139/cjps-2018-0035
12. Ignatov, A., Kuginuki, Y., & Hida, K. (1998). Race-specific reaction of resistance to black rot in *Brassica oleracea*. *European Journal of Plant Pathology*, 104(8), 821-827. https://doi.org/10.1023/A:1008642829156
13. Ignatov, A., Kuginuki, Y., & Hida, K. (2000). Distribution and inheritance of race-specific resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica rapa* and *B. napus*. *Journal of Russian Phytopathology*, 1, 89-94.
14. Jelušić, A., Berić, T., Mitrović, P., Dimkić, I., Stanković, S., Marjanović-Jeromela, A., & Popović, T. (2020). New insights into the genetic diversity of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* isolates from winter oilseed rape in Serbia. *Plant Pathology*, 70(1), 35-49. https://doi.org/10.1111/ppa.13273 EDN: https://elibrary.ru/cpiysj
15. Lema, M., Soengas, P., Velasco, P., Francisco, M., & Cartea, M. E. (2011). Identification of Sources of Resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in

Brassica napus Crops. *Plant Disease*, 95(3), 292-297. https://doi.org/10.1094/PDIS-06-10-0428 EDN: https://elibrary.ru/okxkzr

16. Lu, L., Monakhos, S. G., Lim, Y. P., & Yi, S. Y. (2021). Early defense mechanisms of *Brassica oleracea* in response to attack by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Plants*, 10(12), 2705. https://doi.org/10.3390/plants10122705 EDN: https://elibrary.ru/kvcjgg
17. Mansfield, J., Genin, S., Magori, S., Citovsky, V., Sriariyanum, M., Ronald, P., Dow, M., Verdier, V., Beer, S. V., Machado, M. A., Toth, I., Salmond, G., & Foster, G. D. (2012). Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 13(6), 614-629. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00804.x EDN: https://elibrary.ru/rntqyz
18. Popović, T., Balaž, J., Starović, M., Trkulja, N., Ivanović, Ž., Ignjatov, M., & Jošić, D. (2013). First Report of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* as the Causal Agent of Black Rot on Oilseed Rape (*Brassica napus*) in Serbia. *Plant Disease*, 97(3), 418. https://doi.org/10.1094/PDIS-07-22-1389-PDN
19. Popović, T., Mitrović, P., Jelušić, A., Dimkić, I., Marjanović-Jeromela, A., Nikolić, I., & Stanković, S. (2019). Genetic diversity and virulence of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* isolates from *Brassica napus* and six *Brassica oleracea* crops in Serbia. *Plant Pathology*, 68(8), 1448-1457. https://doi.org/10.1111/ppa.13064 EDN: https://elibrary.ru/vnoukw
20. Rubel, M. H., Robin, A. H. K., Natarajan, S., Vicente, J. G., Kim, H., Park, J., & Nou, I. (2017). Whole-Genome Re-Alignment Facilitates Development of Specific Molecular Markers for Races 1 and 4 of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, the Cause of Black Rot Disease in *Brassica oleracea*. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(12), 2523. https://doi.org/10.3390/ijms18122523 EDN: https://elibrary.ru/ykarre
21. Vicente, J. G., Taylor, J. D., Sharpe, A. G., Parkin, I. A. P., Lydiate, D. J., & King, G. J. (2002). Inheritance of race-specific resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica* Genomes. *Phytopathology*, 92(10), 1032-1148. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.10.113 EDN: https://elibrary.ru/lzvbmj
22. Vicente, J. G., & Holub, E. B. (2012). *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (cause of black rot of crucifers) in the genomic era is still a worldwide threat to brassica crops. *Molecular Plant Pathology*, 14(1), 2-18. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00833.x EDN: https://elibrary.ru/rouenv
23. Zubko, O., Monakhos, S., & Monakhos, G. (2018). Rb gene introgression from *Brassica carinata* to *Brassica oleracea*. *Acta Hortic*, 1202, 107-112. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1202.16 EDN: https://elibrary.ru/aeuuxk

References

1. Artemyeva, A. M., Ignatov, A. N., Volkova, A. I., Kocherina, N. V., Konopleva, M. N., & Chesnokov, Yu. V. (2018). Physiological and genetic components of resistance to black rot in doubled haploid lines of *Brassica rapa* L. *Agricultural Biology*, *53(1)*, 157-169. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.1.157rus EDN: https://elibrary.ru/vzwyix
2. Vo Thi Ngoc Ha, Dzhalilov, F. S., Vinogradova, S. V., Kirova, E. I., & Ignatov, A. N. (2014). Genetic diversity of the black rot pathogen in Russia: PCR fragment polymorphism. *Potato Protection*, *(2)*, 21-25.
3. Vo Thi Ngoc Ha, Dzhalilov, F. S., & Ignatov, A. N. (2015). Evaluation of resistance of different white cabbage hybrids to black rot. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, *(2)*, 7-15.
4. Vo Thi Ngoc Ha, Dzhalilov, F. S., Mazurin, E. S., Kirova, E. I., Vinogradova, S. V., Shaad, N. V., Laster, D., & Ignatov, A. N. (2014). Spread of a new genotype of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in Russia in 2012. *Potato Protection*, *(2)*, 26-28.
5. Dzhalilov, F. S., Korsak, I. V., & Monakhos, G. F. (1995). Comparison of methods for assessing the resistance of cabbage to black rot. *Izvestiya Timiryazevskaya Agricultural Academy*, *(2)*, 147-153.
6. Ignatov, A. N., Dzhalilov, F. S., Miroshnikov, K. A., & Evseev, P. V. (2021). *Xanthomonas campestris*: main results and problems of research of the black rot pathogen of cabbage. *Microbial Biotechnology: Fundamental and Applied Aspects*, *13*, 153-168. https://doi.org/10.47612/2226-3136-2021-13-153-168 EDN: https://elibrary.ru/qpqqt
7. Lazarev, A. M., Mysnik, E. N., & Ignatov, A. N. (2017). Range and damage zone of cabbage black rot. *Plant Protection Bulletin*, *1(91)*, 52-55.
8. Matveeva, E. V., Ignatov, A. N., Polityko, V. A., & Fokina, V. G. (2008). Bacterial diseases of rapeseed. *Protection and Quarantine of Plants*, *(12)*, 23-24.
9. Monakhos, S. G., & Elyshko, N. V. (2015). Resistance of cabbage to black rot. *Potato and Vegetables*, *(9)*, 38-39.
10. Orynbaev, A. T., Dzhalilov, F. S., & Monakhos, G. F. (2019). Methods of assessment and inheritance of stem resistance to black rot in white cabbage. *Izvestiya Timiryazevskaya Agricultural Academy*, *(1)*, 45-55.
11. Afrin, K. S., Rahim, M. A., Rubel, M. H., Natarajan, S., Song, J., Kim, H., Park, J., & Nou, I. (2018). Development of race-specific molecular marker for *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* race 3, the causal agent of black rot of crucifers. *Canadian Journal of Plant Science*, 98(5), 1119-1125. https://doi.org/10.1139/cjps-2018-0035

12. Ignatov, A., Kuginuki, Y., & Hida, K. (1998). Race-specific reaction of resistance to black rot in *Brassica oleracea*. *European Journal of Plant Pathology*, 104(8), 821-827. https://doi.org/10.1023/A:1008642829156
13. Ignatov, A., Kuginuki, Y., & Hida, K. (2000). Distribution and inheritance of race-specific resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica rapa* and *B. napus*. *Journal of Russian Phytopathology*, 1, 89-94.
14. Jelušić, A., Berić, T., Mitrović, P., Dimkić, I., Stanković, S., Marjanović-Jeromela, A., & Popović, T. (2020). New insights into the genetic diversity of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* isolates from winter oilseed rape in Serbia. *Plant Pathology*, 70(1), 35-49. https://doi.org/10.1111/ppa.13273 EDN: https://elibrary.ru/cpiysj
15. Lema, M., Soengas, P., Velasco, P., Francisco, M., & Cartea, M. E. (2011). Identification of Sources of Resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica napus* Crops. *Plant Disease*, 95(3), 292-297. https://doi.org/10.1094/PDIS-06-10-0428 EDN: https://elibrary.ru/okxkzr
16. Lu, L., Monakhos, S. G., Lim, Y. P., & Yi, S. Y. (2021). Early defense mechanisms of *Brassica oleracea* in response to attack by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Plants*, 10(12), 2705. https://doi.org/10.3390/plants10122705 EDN: https://elibrary.ru/kvcjgg
17. Mansfield, J., Genin, S., Magori, S., Citovsky, V., Sriariyanum, M., Ronald, P., Dow, M., Verdier, V., Beer, S. V., Machado, M. A., Toth, I., Salmond, G., & Foster, G. D. (2012). Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 13(6), 614-629. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00804.x EDN: https://elibrary.ru/rntqyz
18. Popović, T., Balaž, J., Starović, M., Trkulja, N., Ivanović, Ž., Ignjatov, M., & Jošić, D. (2013). First Report of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* as the Causal Agent of Black Rot on Oilseed Rape (*Brassica napus*) in Serbia. *Plant Disease*, 97(3), 418. https://doi.org/10.1094/PDIS-07-22-1389-PDN
19. Popović, T., Mitrović, P., Jelušić, A., Dimkić, I., Marjanović-Jeromela, A., Nikolić, I., & Stanković, S. (2019). Genetic diversity and virulence of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* isolates from *Brassica napus* and six *Brassica oleracea* crops in Serbia. *Plant Pathology*, 68(8), 1448-1457. https://doi.org/10.1111/ppa.13064 EDN: https://elibrary.ru/vnoukw
20. Rubel, M. H., Robin, A. H. K., Natarajan, S., Vicente, J. G., Kim, H., Park, J., & Nou, I. (2017). Whole-Genome Re-Alignment Facilitates Development of Specific Molecular Markers for Races 1 and 4 of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, the Cause of Black Rot Disease in *Brassica oleracea*. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(12), 2523. https://doi.org/10.3390/ijms18122523 EDN: https://elibrary.ru/ykarre

21. Vicente, J. G., Taylor, J. D., Sharpe, A. G., Parkin, I. A. P., Lydiate, D. J., & King, G. J. (2002). Inheritance of race-specific resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica* Genomes. *Phytopathology*, 92(10), 1032-1148. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.10.113 EDN: https://elibrary.ru/lzvbmj
22. Vicente, J. G., & Holub, E. B. (2012). *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (cause of black rot of crucifers) in the genomic era is still a worldwide threat to brassica crops. *Molecular Plant Pathology*, 14(1), 2-18. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00833.x EDN: https://elibrary.ru/rouenv
23. Zubko, O., Monakhos, S., & Monakhos, G. (2018). Rb gene introgression from *Brassica carinata* to *Brassica oleracea*. *Acta Hortic*, 1202, 107-112. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1202.16 EDN: https://elibrary.ru/aeuuxk

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Вишнякова Анастасия Васильевна, к-т сельхоз. наук, доцент кафедры ботаники, селекции и семеноводства садовых растений
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева»
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
a.vishnyakova@rgau-msha.ru

Никитин Михаил Алексеевич, инженер-исследователь
Селекционно-семеноводческий центр овощных культур РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева
ул. Пасечная, 5, г. Москва, 127550, Российская Федерация
ser-mixail-nikitin@yandex.ru

Румянцева Олеся Олеговна, магистрант 1 года обучения
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева»

ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
rumiantsewa.olesya@yandex.ru

Миронов Алексей Александрович, к-т сельхоз. наук, доцент, доцент кафедры ботаники, селекции и семеноводства садовых растений
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева»
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
a.mironov@rgau-msha.ru

Монахос Сократ Григорьевич, д-р сельхоз. наук, профессор, заведующий кафедры ботаники, селекции и семеноводства садовых растений
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева»
ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация
s.monakhos@rgau-msha.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anastasiia V. Vishnyakova, Cand. Sc. (Agricultural), Associate Professor of the Department of Botany, Selection and Seed Production of Garden Plants
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation
a.vishnyakova@rgau-msha.ru
SPIN-code: 7025-5592
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9160-1164
ResearcherID: AAX-8791-2021
Scopus Author ID: 57302370100

Mikhail A. Nikitin, research engineer
Selection and Seed Center for Vegetable Crops Russian State Agrarian University - Timiryazev Moscow Agricultural Academy
5, Pasechnaya Str., 5, Moscow, 127550, Russian Federation
ser-mixail-nikitin@yandex.ru

SPIN-code: 7660-7226
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5557-1192
ResearcherID: HKM-7818-2023

Olesya O. Rumiantseva, 1st year Master Student of the Department of Botany, Selection and Seed Production of Garden Plants
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation
rumiantsewa.olesya@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3248-7514
ResearcherID: GSE-5435-2022

Aleksei A. Mironov, Cand. Sc. (Agricultural), Assistant professor, Associate Professor of the Department of Botany, Selection and Seed Production of Garden Plants
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation
a.mironov@rgau-msha.ru
SPIN-code: 5098-6375
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0297-500X
ResearcherID: AAD-1773-2022
Scopus Author ID: 57214231613

Sokrat G. Monakhos, Dr. Sc. (Agricultural), Professor, Head of the Head of the Department of Botany, Selection and Seed Production of Garden Plants
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation
s.monakhos@rgau-msha.ru
SPIN-code: 7130-9663
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9404-8862
ResearcherID: I-7729-2017
Scopus Author ID: 56052882900

Поступила 15.05.2024
После рецензирования 14.09.2024
Принята 16.10.2024

Received 15.05.2024
Revised 14.09.2024
Accepted 16.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1149 **EDN: KEVYQR**
УДК 634.11:631.53.04

CC BY NC ND

Научная статья

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЛЕСНОЙ СЕЛЕКЦИИ И СОРТОВОГО СЕМЕНОВОДСТВА ДЛЯ ЛЕСОМЕЛИОРАЦИИ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

С.Н. Крючков, А.И. Беляев, А.М. Пугачёва, А.С. Соломенцева, С.А. Егоров, А.К. Романенко

Аннотация

Обоснование. Селекционно-генетическая основа является основным приемом, повышающим качество, жизнеспособность насаждений и их эффективность. Комплексные исследования и внедрение полученных результатов позволяют решить проблему селекции, размножения ценного генофонда, организации постоянной лесосеменной базы подбора растений.

Цель. Подбор перспективных древесных пород для аридного региона (Европейская территория России) на основе эффективных методов повышения устойчивости насаждений для лесной селекции и семеноводства.

Материалы и методы. Генетическая оценка лесосеменных плантаций проводилась при помощи дисперсионного анализа, коэффициентов повторяемости и наследуемости, доли влияния на фенотипы генетических и экологических факторов. Выделение генотипов проводилось при помощи инвентаризации на уровне конкурсного испытания по набору положительных признаков и степени их ценности у каждого исследуемого вида. Проводилось ранжирование таксационных показателей с целью отбора перспективных клонов и семей для высокоурожайных лесосеменных плантаций с признаками интенсивного роста. В исследованиях использовали полевые и лабораторные методы: фенологические, морфологические, физиолого-биохимические.

Результаты. Установлено, что путём повторного введения в культуру отбора возрастных репродуцентов с хорошей жизненностью и устойчивостью к неблагоприятным факторам окружающей среды особей можно значительно повысить устойчивость насаждений различного назначения. Хорошую сохранность и таксационные показатели исследуемых пород можно связать с формированием в

насаждениях интразональной экологической обстановки. Высокая эффективность отбора гибридных форм подтверждается, так как все исследуемые растения имели удовлетворительное состояние и высокий процент сохранности.

Выводы. Разработанная схема повышения устойчивости ЗЛН (защитных лесных насаждений) позволит создать ценный селекционный фонд для агролесомелиоративного обустройства, к основным породам которого относятся *Robinia pseudoacacia* L., *Quercus robur* L., *Pyrus communis subsp. pyraster* (L.) Ehrh., *Ulmus pumila* L., *Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall., *Pinus nigra subsp. pallasiana* (Lamb.), *Pinus silvestris* L. Влияние насаждения на плодоношения клонового потомства недостоверно, влияние маточника отличается достоверностью на уровне 1-5 % значимости в отношении плюсовых деревьев на плантации. Породный состав насаждений Новоаннинской популяции отнесен к перспективным и может претендовать на статус культурного сорта.

Ключевые слова: биоразнообразие; лесосеменные плантации; селекция; семеноводство; агролесомелиорация

Для цитирования. Крючков, С. Н., Беляев, А. И., Пугачёва, А. М., Соломенцева, А. С., Егоров, С. А., & Романенко, А. К. (2025). Эффективные методы лесной селекции и сортового семеноводства для лесомелиорации аридных территорий Европейской России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 456-477. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1149

Original article

EFFECTIVE METHODS OF FOREST BREEDING AND VARIETAL SEED PRODUCTION FOR FOREST RECLAMATION OF ARID TERRITORIES OF EUROPEAN RUSSIA

S.N. Kryuchkov, A.I. Belyaev, A.M. Pugacheva, A.S. Solomentseva, S.A. Egorov, A.K. Romanenko

Abstract

Background. Of particular relevance is the problem of creating a new generation of viable protective forest plantations from a reliable assortment on a breeding and genetic basis from seed material of the highest breeding conditions.

Purpose. Goal. Selection of promising tree species for the arid region (European territory of Russia) based on effective methods to increase the stability of plantations for forest breeding and seed production.

Materials and methods. Genetic assessment of forest seed plantations was carried out using analysis of variance, the coefficients of repeatability and heritability, and the proportion of influence of genetic and environmental factors on phenotypes. Genotypes were isolated using an inventory at the level of a competitive test based on a set of positive signs and the degree of their value for each species under study. The ranking of taxation indicators was carried out in order to select promising clones and families for high-yielding forest seed plantations with signs of intensive growth. Field and laboratory methods were used in the research: phenological, morphological, physiological and biochemical.

Results. It has been established that by reintroducing into the culture the selection of age-old reproducers with good vitality and resistance to adverse environmental factors of individuals, it is possible to significantly increase the stability of plantations for various purposes. The good preservation and taxation indicators of the studied rocks can be associated with the formation of an intrazonal ecological situation in the plantations. The high efficiency of the selection of hybrid forms is confirmed, since all the studied plants had a satisfactory condition and a high percentage of preservation.

Conclusions. The developed scheme for increasing the stability of ZLN (protective forest plantations) will create a valuable breeding fund for agroforestry development, the main breeds of which include *Robinia pseudoacacia* L., *Quercus robur* L., *Pyrus communis subsp. pyraster* (L.) Ehrh., *Ulmus pumila* L., *Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall., *Pinus nigra subsp. pallasiana* (Lamb.), *Pinus silvestris* L. The effect of planting on the fruiting of clonal offspring is unreliable, the effect of the queen bee is reliable at the level of 1-5% significance in relation to plus trees on the plantation. The species composition of the plantations of the Novoanninsky population is classified as promising and can claim the status of a cultural variety.

Keywords: biodiversity; forest seed plantations; breeding; seed production; agroforestry

For citation. Kryuchkov, S. N., Belyaev, A. I., Pugacheva, A. M., Solomentseva, A. S., Egorov, S. A., & Romanenko, A. K. (2025). Effective methods of forest breeding and varietal seed production for forest reclamation of arid territories of European Russia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 456-477. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1149

Введение

Для реализации основной концепции проведения семеноводческих работ в тяжелых лесорастительных условиях необходимо проведение отбора форм, клонов, гибридов древесных пород, устойчивых к абиоти-

ческим факторам, оценка их по комплексу положительных признаков с выделением элиты; создание маточно-семенных насаждений высокого генетического уровня для полного удовлетворения потребностей защитного лесоразведения каждого агролесомелиоративного района селекционными семенами, а также разработка программного проекта этих работ, грамотное использование семян инорайонного происхождения на основе научно обоснованного географического и эколого-типологического районирования семенозаготовок [3; 10; 19; 20; 23; 24; 29; 40]. Практическая значимость подобных работ заключается в реализации новых эффективных разработок (методик, технологий, программ и т. д.) через создание научно-производственных объектов постоянной лесосеменной базы (ПЛСБ), специализированных семеноводческих хозяйств в каждом административном районе Европейской территории России [33; 35; 38; 43].

Селекционно-улучшенный семенной материал, полученный с лесосеменных плантаций, может быть использован для создания нового поколения устойчивых лесных насаждений на генетической основе.

Засушливые территории Европейской части России характеризуются комплексом неблагоприятных климатических условий, с интенсивной системой земледелия, сопровождающейся биологическим обеднением и нарушением экологической обстановки сельскохозяйственных территорий, их аридизацией и опустыниванием, ухудшением условий жизни населения. Эффективным средством против многих негативных факторов является агролесомелиорация.

Наиболее надёжным приёмом, повышающим качество, жизнеспособность насаждений и их эффективность является перевод их на селекционно-генетическую основу. Решить эту проблему возможно на основе комплексных исследований и широкого внедрения полученных результатов по основным направлениям: селекции, размножению ценного генофонда, организацией постоянной лесосеменной базы отселектированных растений.

В главные задачи входит получение не только быстрорастущих особей древесных видов, но выделение и внедрение форм в несвойственные для них экологические условия с высокой устойчивостью к морозам, засухам, повышенному содержанию солей в почве, к вредителям и инфекционным заболеваниям, обеспечивающим высокий мелиоративный эффект. Имеется острая необходимость создания в сухой степи и полупустыне региональных селекционно-семеноводческих комплексов важнейших видов, сортов и форм деревьев и кустарников, адаптированных к жёстким условиям произрастания, а также семенных плантаций второго порядка для производственных нужд засушливого региона.

Научная новизна

В засушливом регионе ассортимент древесных пород очень ограничен. Большинство из них хорошо растут в первые годы жизни, однако, когда растения достигают 15-20-летнего возраста, рост в высоту прекращается, начинается отмирание верхних и боковых побегов, из-за чего посадки из них малопродуктивны и недолговечны. В засушливой зоне особого внимания заслуживает подбор пород для скрещивания, а также вопрос создания вегетативных гибридов с целью отбора наилучших географических форм и выведения ценных гибридов.

Для решения научных и практических задач в области агролесомелиорации засушливых территорий особенно важно сохранять защитные лесные насаждения искусственного происхождения на землях сельскохозяйственного назначения, поскольку они положительно влияют на урожайность сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы

Проведено обследование (лесосеменных плантаций) ЛСП и клоновых архивов Новоаннинского лесхоза (Волгоградская область) (дуб, сосна, робиния, вяз, ясень), клоновые архивы селекционно-семеноводческого центра (г. Волгоград) (сосна, дуб, робиния), их генетическая оценка при помощи дисперсионного анализа, коэффициентов повторяемости и наследуемости, доли влияния на фенотипы генетических и экологических факторов [6].

Выделение генотипов проводилось на уровне конкурсного испытания по набору положительных признаков и степени их ценности дифференцированно по каждому древесному виду и климатической зоне.

При определении оптимальных генетических параметров высокоурожайных лесосеменных плантаций использовали полевые материалы на основе изучения формирования их урожайности.

Семенная продуктивность маточников оценивалась в клоновых архивах и на маточных плантациях в выравненных условиях способами: глазомерного учёта в относительных показателях – баллах и количественного учёта, которые позволяют определить предполагаемый урожай семян.

Проводился анализ количественных и качественных показателей урожайности в звене «родители-потомство» по возрастным этапам, на вегетативных и семенных потомствах использовали коэффициенты корреляции основных признаков и методы генетического анализа. В целях отбора перспективных клонов и семей для высокоурожайных ЛСП с признаками интенсивного роста проводилось ранжирование таксационных показателей

и интенсивности плодоношения при интенсивности отбора 20 и 40 %. Полученные оценки умножались на весовые коэффициенты, отражающие долевое участие (значимость) каждого фактора.

В работе использовали полевые и лабораторные методы: фенологические, морфологические, физиолого-биохимические [2; 12; 39; 41].

При отборе генофонда предусматривалось применение экспресс-методов оценки засухо-, соле-, морозоустойчивости, устойчивости к болезням, а также всех известных косвенных признаков, сопряжённых с хозяйственно-ценными характеристиками.

Первичным этапом семеноводческой работы была селекционная инвентаризация естественных и искусственных взрослых насаждений, предварительный отбор кандидатов в плюсовые деревья, а также оценка плюсовых деревьев основных древесных видов, выделенных на Европейской территории России (Таблица 1).

Таблица 1.

Плюсовые деревья основных древесных видов, выделенных в засушливых условиях Европейской территории России

Древесная порода	Кол-во учтённых деревьев, шт.	Средний возраст, лет	Средние		Объект отбора
			Н, м	Д, см	
Pinus sylvestris L.	209	95	23	35	Лесные культуры
Pinus nigra subsp. pallasiana (Lamb.) Holmboe.	75	80	20	35	Лесные культуры
Quercus robur L.	147	90	16	55	Естественные байрачные нагорные дубравы
Ulmus pumila L.	123	40	12	32	Защитные лесные полосы
Robinia pseudoacacia L.	107	50	18	30	Защитные лесные насаждения
Fraxinus excelsior L.	41	80	19	44	Естественные и искусственные насаждения
Pyrus communis subsp. pyraster (L.) Ehrh.	25	30	7	21	Полезащитная лесная полоса
Fraxinus pennsylvanica Marshall.	31	40	9	16	Полезащитная лесная полоса
					Всего: 758

Для кластерного анализа использовали расчеты, проведенные по формуле 1:

$$p(x_{ij}) = \sqrt{\sum(x_{il}-x_{ji})^2} \quad (1),$$

где I – признаки, k – количество признаков

Выделенные маточные деревья в количественном отношении вполне обеспечивают нормативы для создания постоянной лесосеменной базы всех древесных видов. Однако, учитывая резко выраженную мозаичность и дифференциацию почвенных и климатических условий, выделенный генофонд должен использоваться локально – в определённых экологических нишах, и с учётом природного, лесосеменного и агролесомелиоративного районирования. Кроме того, определённое количество выделенных растений должно пройти дополнительное обследование и оформление в государственный реестр с целью повышения устойчивости насаждений (Рис. 1).

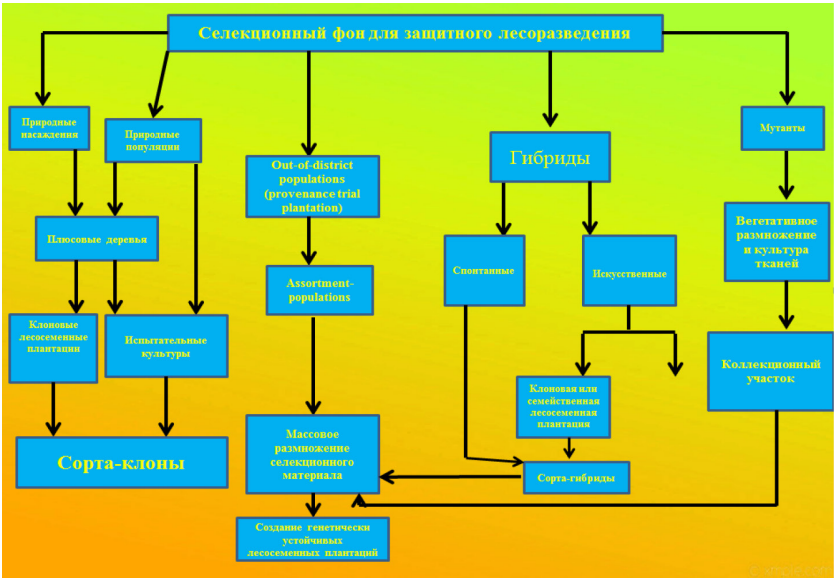


Рис. 1. Схема повышения устойчивости защитных лесных насаждений из селекционного генофонда

Физико-механические и химические свойства почв изучались колориметрическим методом. На втором этапе генофонд оценивался путем моделирования экстремальных ситуаций. Интенсивность испарения изме-

рялась путем быстрого взвешивания листьев. При изучении влияния родительских признаков на семенное потомство использовали иерархические дисперсионные комплексы, определяющие подчиненность структурных компонентов. Для обработки и статистического анализа использовались MS Excel и Statistica 13.

Результаты и их обсуждение

При искусственном расширении ареала продвижение растений с севера на юг более успешно, чем с юга на север, что ограничено их морозостойкостью и зимостойкостью. Согласно исследованиям, проведенным авторами, в порядке снижения морозостойкости древесные породы расположены следующим образом: сосны, вяз, дуб, ясень, робиния, груша (Таблица 2) [11; 13; 14; 15; 22; 25; 34; 36; 37; 38].

Таблица 2.

Допустимые, угнетающие и токсичные концентрации легкорастворимых солей для исследуемых видов

Категория выносливости	Порог токсичности солей, %	Название вида
Очень слабо солевыносливые	> 0.3	*Pinus sylvestris* L., *Pinus nigra subsp. pallasiana* (Lamb.) Holmboe.
Слабо солевыносливые	0.4	*Quercus robur* L., *Ulmus pumila* L.
Солевыносливые	> 0.5	*Robinia pseudoacacia* L.
Наиболее солевыносливые	> 0.7	*Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall.
Солеустойчивые	> 1.5	*Pyrus communis subsp. pyraster* (L.) Ehrh.

Предложения по дальнейшему интенсивному использованию выделенного генофонда учитывают региональные особенности и потребность в селекционном посевном и посадочном материале [32; 36; 42].

Pinus sylvestris L. Общее состояние первой группы деревьев хорошее, несмотря на предельный для этих условий возраст. В условиях сухой степи насаждения имеют удовлетворительное состояние сохранившихся плюсовых деревьев. Из 12 выделенных погибли 5 экземпляров в процессе интенсивного усыхания соснового массива. Тем не менее, среди плюсовых особей отпад в несколько раз ниже, чем у контроля. В соответствии

с природными условиями создание ПЛСБ сосны обыкновенной следует продолжить на базе Новоаннинского лесхоза Волгоградской области (чернозёмная степь) и Кировском селекционно-семеноводческом комплеке (сухая степь).

Pinus nigra subsp. pallasiana (Lamb.) Holmboe. является ценной устойчивой к засухе и вредителям альтернативной породой сосне обыкновенной для лесоразведения в сухостепных и полупустынных ландшафтах региона. Планируется заложить 25 га ЛСП в Кировском ССК для обеспечения селекционным материалом Нижне-Волжского региона.

Quercus robur L. является единственной аборигенной древесной породой на юго-восточной границе ареала. В процессе селекционной инвентаризации было выделено 147 плюсовых дерева. Из них 116 в естественных местообитаниях. Концепция лесного семеноводства для дуба рассматривается с региональных позиций. Генотипически разнообразные плюсовые деревья используются в лесоразведении дифференцированно. Для защитного лесоразведения на каштановых почвах сухостепной зоны рекомендуется использовать засухо-, солеустойчивые биотипы из байрачных южных дубрав.

Ulmus pumila L. является интродуцированным видом, который успешно используется при защитном лесоразведении в Европейской части России. Выделено 123 маточных экземпляра в защитных лесных насаждениях (полезащитных, Гослесополосах и др.), сохранившихся после экстремальных годов в процессе естественного и искусственного отбора. Многолетние исследования генофонда по потомству выявили значительное преимущество маточных деревьев береста и его гибридных форм по основным признакам, характеризующим его устойчивость и долговечность в экстремальных условиях произрастания.

Robinia pseudoacacia L. – ценная быстрорастущая порода с высокими мелиоративными свойствами. Однако, в светло-каштановой подзоне Волгоградской, Астраханской областей и республики Калмыкия нередко подмерзает после суровых бесснежных зим. Отбор необмерзающих быстрорастущих особей (плюсовых деревьев) позволил выделить 107 экземпляров. Высокая зимостойкость маточных деревьев сохраняется у вегетативных потомств. Эффективность отбора робинии довольно высокая. За 25 летний период произрастания на светло-каштановых почвах отпало 6 деревьев – это менее 5% от первоначально отобранного.

Fraxinus excelsior L. естественно произрастает в дубравах на севере Волгоградской области, является главной породой в защитных лесных насаждениях Волгоградской области.

Создание ПЛСБ (постоянной лесосеменной базы) целесообразно путём закладки клоновых ЛСП (лесосеменных плантаций) с соответствующим представительством женских и мужских потомств.

Fraxinus pennsylvanica Marshall. широко применяется в ЗЛН сухостепной зоны на светло-каштановых солонцеватых почвах, засухо-, солеустойчив, но часто повреждается древесницей въедливой и поэтому отстаёт в росте. Отобрано 31 плюсовое дерево в лесной полосе Камышин-Волгоград. Семенной и посадочный материал предполагается для создания ЗЛН в экстремальных условиях сухостепной и полупустынной зоны.

Pyrus communis subsp. pyraster (L.) Ehrh. – ценная сопутствующая порода для дуба при создании ЗЛН на светло-каштановых почвах.

В ходе инвентаризационных обследований насаждений были проанализированы: А – влияние на результативный признак насаждения, в котором отбирались маточники. В – влияние маточников и влияние случайных факторов. Влияние С – экологического фактора не оценивалось, поскольку размещение клонов на плантации по рендомизированной схеме позволяет снизить влияние данного фактора в опыте до минимума. На рост клона, а значит и другие генетические признаки и свойства, достоверно влияют факторы насаждения и плюсового дерева (влияние насаждений составляет 38 %, влияние маточника 49 % и на долю случайных признаков приходится 13 %) (Таблица 3, Таблица 4).

Таблица 3.

Иерархический дисперсионный анализ изменчивости высоты клонов

Вариации	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	Дисперсионные отклонения		
				$P_{факт}$	P_{05}	P_{01}
Между насаждениями факт. А	4	79	19,75	7,6	2,4	3,4
Между деревьями факт. В	22	57	19,2	19,2	1,6	1,9
Остаточная вариация	225	29	0,13			
Общая	246	165				

$$\text{Н} = 11590 \; \text{Ду} = 165 \; \text{Дх} = 136 \; \text{Дz} = 29 \; \text{Да} = 79 \; \text{Дв} = 57$$

$$\text{Sx}^2\text{а} = 0{,}38 \; Sx^2\text{в} = 0{,}49 \; Sx^2y = 0{,}38 + 0{,}43 + 0{,}13 = 1{,}0$$

$$hx^2a = hx^2\text{в} \quad hx^2z = 0{,}13$$

Таким образом, влияние насаждения на плодоношение клонового потомства оказалось недостоверным.

Таблица 4.

Иерархический дисперсионный анализ изменчивости плодоношения клонов

Вариации	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	Дисперсионные отклонения		
				$P_{факт.}$	P_{st}	
					5%	1%
По факту А	4	0,8	0,2	0,24	2,4	3,4
По факту В	22	18	0,82	2,05	1,6	1,9
Остаточная	225	90	0,40			
Общая	246	109				

Клоны по плодоношению:

$$\text{Н} = 1159\ \text{Ду} = 109\ \text{Дх} = 19\ \text{Д}z = 90\ \text{Да} = 0{,}8\ \text{Дв} = 18$$

$$(bn)o = \frac{1}{5-1} * \frac{(247 - 17237)}{247} = 44{,}3$$

$$(nA)o = (10 + 8{,}97 + 8{,}88 + 9{,}29 + 10) - (9{,}2) = 2{,}58$$

$$(n\text{В})\text{о} = \frac{1}{28-1} * (247 - 47{,}1) = 7{,}4$$

$$no = \frac{2{,}58 + 7{,}4}{2} = 4{,}99 \quad S2a = \frac{\int_1^2 - \int_2^2 0{,}62}{(bn)o} = \frac{0{,}62}{44{,}3} = 0{,}013$$

$$Sb = \frac{\int_1^2 - \int_z^2 0{,}62}{5} = \frac{0{,}422}{5} = 0{,}08$$

$$h2a = \frac{0{,}013}{0{,}49} = 0{,}02 - \text{насаждения}$$

$$h2b = \frac{0{,}08}{0{,}49} = 0{,}16 - \text{маточники}$$

$$h2z = \frac{0{,}40}{0{,}49} = 0{,}82 - \text{случайные факторы}$$

Влияние маточника оказалось достоверно на 1 % и 5 % уровнях значимости только в отношении фактора плюсового дерева. Расчёт факториальных дисперсий показал, что достоверное влияние маточников составляет 78 %, 21 % – недостоверное влияние насаждения и только 1 % приходится на долю случайных факторов. Таким образом, рост клонов и рост семей зависят от маточника, поэтому у клонового потомства нет значительных преимуществ по этому признаку, процент влияния маточника на рост у семенного потомства выше. К перспективным отнесены все представители Новоаннинской популяции.

Продолжается работа по испытанию сортов семейства *Ulmaceae*, а также видов *Robinia pseudoacacia* L., *Quercus robur* L. По комплексу хозяйственно ценных признаков в настоящее время выделено 8 сортовых клонов, претендующих на статус культурного сорта.

Для иерархической классификации объектов исследований мы использовали кластерный анализ в виде дендрограммы (Таблица 5).

Таблица 5.

Исходные данные для расчёта

Виды*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	9	28	45	3,1	32	17	8	18	43	17
x_2	154	4211	3,4	3,1	11	10	5	64	9	31

Примечание: 1– *Quercus robur* L.,2 – *Pinus sylvestris* L., 3 – *Pinus nigra subsp. pallasiana* (Lamb.), 4 – *Robinia pseudoacacia* L., 5 – *Ulmus pumila* L., 6 – *Fraxinus excelsior* L., 7 – *Pyrus communis subsp. pyraster* (L.) Ehrh., 8 – *Fraxinus pennsylvanica* Marshall.

$$p\ (x1,2) = \sqrt{(9-28)}x^2 + (154-4211)x^2 = 4057.04$$

$$p\ (x1,3) = \sqrt{9-45x^2} + (154-3.4)x^2 = 154.84$$

$$p(x1,4) = \sqrt{9-3,1x^2} + (154-3.1)x^2 = 151.02$$

При формировании новой матрицы расстояний мы выбирали наименьшее значение из значений объектов. В результате была получена дендрограмма сходства (Рис. 2).

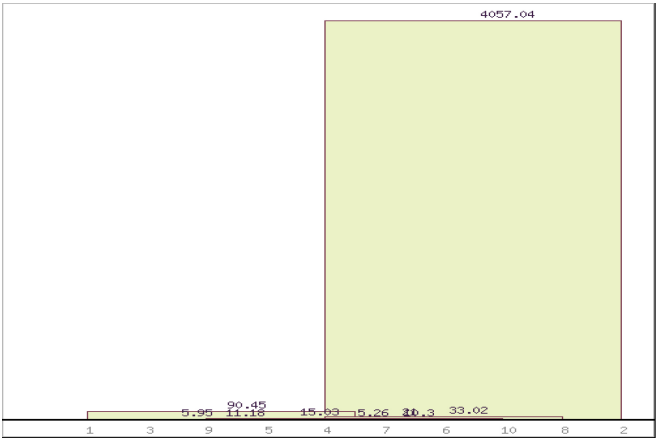


Рис. 2. Дендрограмма видового сходства

Таким образом, переход на выращивание защитных лесных насаждений из отселектированных маточников позволит улучшить качество искусственных посадок и в 1,5-2 раза увеличить их долговечность (Таблица 6).

Таблица 6.

Состояние и сохранность изучаемых древесных пород

Название	Жизненность, балл*	Год посадки	Кол-во посадоч ных мест, шт.	Из них:		Сохранность, %	$H_{ср}$, м
				прижилось	выпало		
Robinia pseudoacacia L.	4,0	2000	116,0	111,0	5,0	95,0	1,60
Quercus robur L.	4,0	1997	177,0	163,0	14,0	92,1	1,70
Pyrus communis subsp. pyraster (L.) Ehrh.	5,0	1998	105,0	103,0	2,0	98,0	1,40
Ulmus pumila L.	5,0	- // -	95,0	95,0	-	100,0	1,60
Fraxinus excelsior L.	4,0	1998	39,0	38,0	1,0	97,4	1,50
Fraxinus pennsylvanica Marshall.	4,0	1999	38,0	35,0	3,0	92,1	0,70
Pinus nigra subsp. pallasiana (Lamb.)	5,0	1998	37,0	35,0	2,0	94,5	0,30
Pinus sylvestris L.	4,0	1999	37,0	27,0	10,0	72,9	0,20
			Всего:	607	37	742	9,0

Примечание*: 4 балла – хорошая; 5 баллов – отличная.

Наши исследования в течение длительного периода установили, что путём отбора особей с хорошей жизненностью и устойчивостью к неблагоприятным факторам окружающей среды и повторного введения репродуцентов в культуру можно значительно повысить устойчивость насаждений в регионах с тяжелыми лесорастительными условиями. Преимущества таксационных показателей исследуемых видов можно связать с формированием в насаждениях интразональной экологической обстановки, благоприятной и соответствующей биологическим требованиям

(накопление высоких сугробов, образование гумуса и т. д.). По результатам учёта выделенных особей подтверждается высокая эффективность отбора гибридных форм, так как все растения сохранились, имели вполне удовлетворительное состояние, хороший процент сохранности. Разработанная схема повышения устойчивости насаждений с участием опытных видов позволит иметь набор генофонда, достаточный для проведения тщательной отбраковки, и, следовательно, пополнить количество элитных деревьев для лесосеменных насаждений высокого генетического уровня.

Выводы

1. Основным способом воспроизводства лесных насаждений в аридных регионах, к которым относится Европейская часть России, является их перевод на селекционно-генетические методы отбора основных ценных древесных пород.

2. Разработанная схема повышения устойчивости ЗЛН (защитных лесных насаждений) позволит создать ценный селекционный фонд для агролесомелиоративного обустройства.

3. К основным древесным видам для селекционной работы в засушливых условиях можно отнести *Robinia pseudoacacia* L., *Quercus robur* L., *Pyrus communis subsp. pyraster* (L.) Ehrh., *Ulmus pumila* L., *Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall., *Pinus nigra subsp. pallasiana* (Lamb.), *Pinus sylvestris* L, отличающиеся разной категорией выносливости к содержанию солей в почве и жизненностью.

4. Влияние насаждения на плодоношения клонового потомства недостоверно, влияние маточника отличается достоверностью на уровне 1-5 % значимости в отношении плюсовых деревьев на плантации.

5. Виды Новоаннинской популяции отнесены к перспективным и могут претендовать на статус культурного сорта.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках Государственного задания № FNFE – 2025-0009 «Создание новых генотипов, сортов, форм древесных, кустарниковых, культурных растений с высокоценными признаками продуктивности, качества, устойчивостью к био- и абиострессорам с использованием классических и современных методов селекции, новые инновационные технологии в питомниководстве и семеноводстве, для решения задач по предотвращению деградации и опустынивания агроландшафтов в условиях изменяющегося климата».

Список литературы / References

1. Antwi, E. K., Boakye-Danquah, J., Owusu-Banahene, W., et al. (2022). Global review of cumulative effects assessments of disturbances on forest ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 317, 115277. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115277
2. Alfaro, R. I., Fady, B., Vendramin, G. G., et al. (2014). The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management*, 333, 76-87. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.006 EDN: https://elibrary.ru/uopkzz
3. O'Neill, A. G., Stoehr, M., Jaquish, B. (2014). Quantifying safe seed transfer distance and impacts of tree breeding on adaptation. *Forest Ecology and Management*, 328, 122-130. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.039
4. Callaway, R. M., Ridenour, W. M., Laboski, T., et al. (2005). Natural Selection for Resistance to the Allelopathic Effects of Invasive Plants. *Journal of Ecology*, 93(3), 576–583.
5. Calleja-Rodriguez, A., Li, Z., Hallingbäck, H. R., et al. (2019). Analysis of phenotypic- and Estimated Breeding Values (EBV) to dissect the genetic architecture of complex traits in a Scots pine three-generation pedigree design. *Journal of Theoretical Biology*, 462, 283-292. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.11.007
6. Crossa, J., Pérez-Rodríguez, P., Cuevas, J., et al. (2017). Genomic Selection in Plant Breeding: Methods, Models, and Perspectives. *Trends in Plant Science*, 22(11), 961-975. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.08.011
7. Du, Y., Mi, X., Liu, X., et al. (2009). Seed dispersal phenology and dispersal syndromes in a subtropical broad-leaved forest of China. *Forest Ecology and Management*, 258(7), 1147-1152. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.004
8. Dungey, H. S., Dash, J. P., Pont, D., et al. (2018). Phenotyping Whole Forests Will Help to Track Genetic Performance. *Trends in Plant Science*, 23(10), 854-864. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.08.005
9. Faucon, M.-P., Houben, D., Lambers, H. (2017). Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. *Trends in Plant Science*, 22(5), 385-394. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.01.005 EDN: https://elibrary.ru/oybaih
10. Graudal, L., Dawson, I. K., Hale, I., et al. (2022). Systems approach' plant breeding illustrated by trees. *Trends in Plant Science*, 27(2), 158-165. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.09.009 EDN: https://elibrary.ru/leggpy
11. Geburek, T., & Myking, T. (2018). Evolutionary consequences of historic anthropogenic impacts on forest trees in Europe. *Forest Ecology and Management*, 422, 23-32. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.055 EDN: https://elibrary.ru/ygcmfn

12. Gibson, C., & Warren, A. (2020). Keeping time with trees: Climate change, forest resources, and experimental relations with the future. *Geoforum*, 108, 325-337. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.02.017
13. Harfouche, A. L., Jacobson, D. A., Kainer, D., et al. (2019). Accelerating Climate Resilient Plant Breeding by Applying Next-Generation Artificial Intelligence. *Trends in Biotechnology*, 37(11), 1217-1235. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.05.007 EDN: https://elibrary.ru/cqzlnj
14. Heidari, P., Rezaei, M., Sahebi, M., et al. (2019). Phenotypic variability of Pyrus boissieriana Buhse: Implications for conservation and breeding. *Scientia Horticulturae*, 247, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.075
15. Hlásny, T., Augustynczik, A. L. D., & Dobor, L. (2021). Time matters: Resilience of a post-disturbance forest landscape. *Science of The Total Environment*, 799, 149377. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149377 EDN: https://elibrary.ru/ayjkhk
16. He, T., & Li, C. (2020). Harness the power of genomic selection and the potential of germplasm in crop breeding for global food security in the era with rapid climate change. *The Crop Journal*, 8(5), 688-700. https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.04.005 EDN: https://elibrary.ru/zfyynz
17. İçgen, Y., Kaya, Z., Çengel, B., et al. (2006). Potential impact of forest management and tree improvement on genetic diversity of Turkish red pine (Pinus brutia Ten.) plantations in Turkey. *Forest Ecology and Management*, 225(1-3), 328-336. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.009
18. Kang, K.-S., El-Kassaby, Y. A., Han, S.-U., et al. (2005). Genetic gain and diversity under different thinning scenarios in a breeding seed orchard of Quercus accutissima. *Forest Ecology and Management*, 212(1-3), 405-410. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.063
19. Khazipova, A., Chafizov, A., & Komissarov, A. (2020). Choice of Melioration Facies Regimes Using Catenary-facies Models of Watersheds of the Forest-steppe Zone of the Republic of Bashkortostan. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 17(1), 19-26. https://doi.org/10.3233/AJW200002 EDN: https://elibrary.ru/xkdfkd
20. Kim, I. S., Lee, K. M., Shim, D., et al. (2020). Plus Tree Selection of Quercus salicina Blume and Q. glauca Thunb. and Its Implications in Evergreen Oaks Breeding in Korea. *Forests*, 11(735). https://doi.org/10.3390/F11070735 EDN: https://elibrary.ru/wslдап
21. Kollmann, J., & Bañuelos, M. J. (2004). Latitudinal Trends in Growth and Phenology of the Invasive Alien Plant Impatiens glandulifera (Balsaminaceae). *Diversity and Distributions*, 10(5-6), 377-385. https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2004.00126.x

22. Kroll, A. J., Johnston, J. D., Stokely, T. D., et al. (2020). From the ground up: Managing young forests for a range of ecosystem outcomes. *Forest Ecology and Management*, 464, 118055. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118055 EDN: https://elibrary.ru/mxnycl
23. Kryuchkov, S. N., Vdovenko, A. V., Vorobyova, O. M., et al. (2021). Technology of growing planting material of woody species in arid conditions of Southern Russia. Volgograd State Pedagogical University, 108 p.
24. Kumar, A., Kumar, P., Sharma, A., et al. (2022). Scientific insights to existing know-how, breeding, genetics, and biotechnological interventions pave the way for the adoption of high-value underutilized super fruit Sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.). *South African Journal of Botany*, 145, 348-359. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.11.045
25. Lantz, V., McMonagle, G., Hennigar, C., et al. (2022). Forest succession, management and the economy under a changing climate: Coupling economic and forest management models to assess impacts and adaptation options. *Forest Policy and Economics*, 142, 102781. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102781
26. Lelli, C., Bruun, H. H., Chiarucci, A., et al. (2019). Biodiversity response to forest structure and management: Comparing species richness, conservation relevant species and functional diversity as metrics in forest conservation. *Forest Ecology and Management*, 432, 707-717. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.057
27. Liu, J. (2022). From afforestation to forest landscape restoration in DPRK: Gaps and challenges. *Trees, Forests and People*, 8, 100243. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100243 EDN: https://elibrary.ru/iutpaw
28. MacLachlan, I. R., Wang, T., Hamann, A., et al. (2017). Selective breeding of lodgepole pine increases growth and maintains climatic adaptation. *Forest Ecology and Management*, 391, 404-416. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.008
29. Mölder, A., Sennhenn-Reulen, H., & Fischer, C. (2019). Success factors for high-quality oak forest (Quercus robur, Q. petraea) regeneration. *Forest Ecosystems*, 6(49). https://doi.org/10.1186/s40663-019-0206-y
30. Orton, T. J. (2020). Horticultural Plant Breeding. *Academic Press*, pp. 97-112. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815396-3.00006-8
31. Santos, M. P., Araujo, M. J., & Silva, P. H. M. (2021). Natural establishment of Pinus spp. around seed production areas and orchards. *Forest Ecology and Management*, 494, 119333. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119333
32. Sampaio, T., Gonçalve, E., Patrício, M. S., et al. (2019). Seed origin drives differences in survival and growth traits of cork oak (Quercus suber L.) popula-

tions. *Forest Ecology and Management*, 448, 267-277. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.001

33. Sagra, J., Ferrandis, P., Plaza-Álvarez, P. A., et al. (2018). Regeneration of Pinus pinaster Aiton after prescribed fires: Response to burn timing and biogeographical seed provenance across a climatic gradient. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1550-1558. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.138
34. Sedgley, M., & Griffin, A. R. (1989). Fruit- and Seed-production Management and Tree Breeding. *Applied Botany and Crop Science, Sexual Reproduction of Tree Crops*, pp. 229-290. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-634470-7.50014-3
35. Seidler, R. (2017). Patterns of Biodiversity Change in Anthropogenically Altered Forests. *Reference Module in Life Sciences*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.02186-5
36. Silva Ramos, C. A., Soares, T. L., Santos Barroso, N., et al. (2021). Influence of maturity stage on physical and chemical characteristics of fruit and physiological quality of seeds of Physalis angulata L. *Scientia Horticulturae*, 284, 110124. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110124
37. Solomentseva, A. S., Kolmukidi, S. V., Lebed, N. I., et al. (2020). Tree-shrub species promising for protective afforestation and planting in the Volgograd region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012056. https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012056 EDN: https://elibrary.ru/qzssrj
38. Song, P., Wang, J., Guo, X., et al. (2021). High-throughput phenotyping: Breaking through the bottleneck in future crop breeding. *The Crop Journal*, 9(3), 633-645. https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.03.015 EDN: https://elibrary.ru/tbpdkq
39. Spengler, R. N. (2020). Anthropogenic Seed Dispersal: Rethinking the Origins of Plant Domestication. *Trends in Plant Science*, 25(4), 340-348. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.01.005 EDN: https://elibrary.ru/tszjbk
40. Spalvins, A., Eglite, I., & Lace, I. (2020). Modelling of the forest melioration system at Latvia. A case study. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 257-264. https://doi.org/10.5593/sgem2020/3.1/s12.034 EDN: https://elibrary.ru/rakvmb
41. Tzfira, T., Zuker, A., & Altman, A. (1998). Forest-tree biotechnology: genetic transformation and its application to future forests. *Trends in Biotechnology*, 16(10), 439-446. https://doi.org/10.1016/S0167-7799(98)01223-2
42. Urruth, L. M., Braun Bassi, J., & Chemello, D. (2022). Policies to encourage agroforestry in the Southern Atlantic Forest. *Land Use Policy*, 112, 105802. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105802 EDN: https://elibrary.ru/iwukai
43. Vivas, M., Wingfield, M. J., & Slippers, B. (2020). Maternal effects should be considered in the establishment of forestry plantations. *Forest Ecology and*

Management, 460, 117909. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117909 EDN: https://elibrary.ru/nioumw

44. Zhao, Y., Li, M., Deng, J., et al. (2021). Afforestation affects soil seed banks by altering soil properties and understory plants on the eastern Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 126, 107670. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107670

ВКЛАД АВТОРОВ

Крючков С. Н.: формирование идеи, формулировка и развитие ключевых целей и задач.

Беляев А. И.: разработка методологии, создание моделей, подготовка и утверждение окончательного варианта статьи.

Пугачёва А. М.: концепция исследования, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи для публикации.

Соломенцева А. С.: проведение исследований, экспериментов, сбор данных, анализ и интерпретация полученных результатов.

Егоров С. А.: концепция исследований, проведение экспериментов, подготовка и редактирование текста.

Романенко А. К.: концепция исследований, проведение экспериментов, подготовка и редактирование текста.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Sergey N. Kryuchkov: formation of an idea, formulation and development of key goals and objectives.

Alexander I. Belyaev: development of methodology, creation of models, preparation and approval of the final version of the article.

Anna M. Pugacheva: research concept, verification of critical intellectual content, final approval of the manuscript for publication.

Alexandra S. Solomentseva: conducting research, experiments, data collection, analysis and interpretation of the results obtained.

Sergey A. Egorov: concept of research, conducting experiments, preparing and editing text.

Almagul' K. Romanenko: concept of research, conducting experiments, preparing and editing text.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Крючков Сергей Николаевич, д. с.-х. наук, главный научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
kryuchkovs@vfanc.ru

Беляев Александр Иванович, д. с.-х. наук, профессор, заслуженный работник сельского хозяйства Российской Федерации, директор
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
director@vfanc.ru

Пугачёва Анна Михайловна, к. с.-х. наук, Учёный секретарь
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
pugachevaa@vfanc.ru

Соломенцева Александра Сергеевна, к. с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
alexis2425@mail.ru

Егоров Сергей Анатольевич, младший научный сотрудник, аспирант
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
egorov-sa@vfanc.ru

Романенко Алмагуль Кадыргалиевна, младший научный сотрудник, аспирант
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук»
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
romanenko-ak@vfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Sergey N. Kryuchkov, Dr. Sc. (Agriculture), Chief Researcher of the Laboratory of Breeding, Seed and Nursery Production
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
Kryuchkovs@vfanc.ru
SPIN-code: 5356-4194
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8338-6460
Researcher ID: IAM-5063-2023

Alexander I. Belyaev, Dr. Sc. (Agriculture), Professor, Honored Worker of Agriculture of the Russian Federation, Director
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
director@vfanc.ru
SPIN-code: 8733-7587
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8077-7052
Scopus Author ID: 57206259735

Anna M. Pugacheva, Cand. Sc. (Agriculture), Scientific Secretary
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
pugachevaa@vfanc.ru
SPIN-code: 6857-8236
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0852-8056
Researcher ID: T-5482-2017
Scopus Author ID: 57194047579

Alexandra S. Solomentseva, Cand. Sc. (Agriculture), Senior Researcher of the Laboratory of Breeding, Seed and Nursery Production
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
Alexis2425@mail.ru
SPIN-code: 6832-7471
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5857-1004
Researcher ID: W-4142-2018
Scopus Author ID: 57220036834

Sergey A. Egorov, Junior Researcher of the Laboratory of Breeding, Seed and Nursery Production, Postgraduate Student
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
egorov-sa@vfanc.ru
SPIN-code: 8284-0790
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8234-7355

Almagul' K. Romanenko, Junior Researcher of the Laboratory of Breeding, Seed and Nursery Production, Postgraduate Student
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation RAS
97, Universitetsky pr., Volgograd, 400062, Russian Federation
romanenko-ak@vfanc.ru
SPIN-code: 9028-2920
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6705-6135

Поступила 05.09.2024 Received 05.09.2024
После рецензирования 12.10.2024 Revised 12.10.2024
Принята 16.10.2024 Accepted 16.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1148 **EDN: HAMDEP**
УДК 633.852.73:631.671.3

CC BY NC ND

Научная статья

ОЦЕНКА ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ СОРТОВ И ГИБРИДОВ МАСЛИНЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ

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

Аннотация

Обоснование. Маслина европейская (*O. europaea* L.) является одной из основных плодовых культур в мире. Наибольшее распространение она получила в Средиземноморском районе. В последние годы из-за глобального потепления и аридизации земли большинство стран-производителей маслины терпят значительные убытки и вынуждены переносить посадки маслины из традиционных южных регионов в более влажные северные. Недостаточные осадки и нехватка поливной воды являются в настоящее время одним из лимитирующих факторов в распространении данной культуры. Производители все чаще ориентируются на посадку засухоустойчивых сортов, которые в условиях недостаточного водоснабжения могли бы давать высокие и регулярные урожаи. В связи с этим, **целью** настоящего исследования было выделить генотипы *O. europaea* с высокой адаптационной способностью к засушливым условиям юга России и определить наиболее информативные показатели засухоустойчивости для скрининга коллекции.

Материалы и методы. Исследования показателей водного режима (водоудерживающей способности, водного дефицита, оводненности) и относительный выход электролита при повреждении клеточной мембраны в условиях дегидратации тканей листа проводили на 60 внутривидовых гибридах маслины европейской. Контролем служили сорта Corregiolo и Ascolano.

Эксперименты выполняли в лабораторных условиях при постоянной контролируемой температуре 30°С и относительной влажности воздуха 30%. Оценку показателей засухоустойчивости проводили после насыщения тканей листа водой (контроль), а также после дегидратации таковых в течение 24, 48 и 72 часов.

Результаты. На основании кластерного анализа, проведенного по основным показателям засухоустойчивости выделено четыре основных группы

генотипов маслины европейской с различной устойчивостью к засухе. Наибольший интерес представляют гибриды, которые по результатам исследования были включены в группу с очень высокой засухоустойчивостью. Этот кластер включает в себя 14 наиболее перспективных гибридов, которые превосходят по засухоустойчивости контрольный сорт маслины Ascolano. Водопотеря через 72 часа завядания у этих образцов варьировала от 20,81 до 33,63%, а относительный выход электролита – от 0,27 до 0,36 отн. ед., что позволяет сделать вывод об очень высокой их засухоустойчивости. На основе анализа главных компонент между различными критериями водного режима растений маслины была показана взаимосвязь, и влияние на интегральную оценку засухоустойчивости. Отмечено, что наиболее информативным показателем, имеющим отрицательную корреляцию с водопотерей и относительным выходом электролита при повреждении клеточной мембраны, является водоудерживающая способность. Такие показатели-индикаторы засухоустойчивости как содержание воды в листьях, водный дефицит и относительное содержание воды в листьях оказались недостаточно информативны для отбора засухоустойчивых сортов и форм маслины.

Ключевые слова: сорт; засухоустойчивость; относительный выход электролита; *Olea europaea* L.

Для цитирования. 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), 478-504. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1148

Original article

DROUGHT RESISTANCE ASSESSMENT OF EUROPEAN OLIVE CULTIVARS AND HYBRIDS

S.Yu. Tsiupka, Y.V. Plugatar, V.A. Tsiupka, I.V. Bulavin

Abstract

Background. Olive (*O. europaea* L.) is one of the main fruit crops in the world. It is most widespread in the Mediterranean region. In recent years, due to global warming and aridization of the earth, most olive-producing countries have suffered significant losses and are forced to transfer olive plantings from the traditional southern regions to the more humid northern ones. Insufficient precipitation and lack of irrigation water are currently some limiting factors in this crop's spread. Pro-

ducers are increasingly focusing on planting drought-resistant cultivars that could produce high and regular yields in conditions of insufficient water supply. In this regard, this study **aimed** to identify genotypes of *O. europaea* with high adaptive ability to the arid conditions of southern Russia and to determine the most informative indicators of drought resistance for collection screening.

Materials and methods. Studies of water regime indicators (water-holding capacity, water deficiency, water content) and relative electrolyte yield, when the cell membrane is damaged under conditions of dehydration of leaf tissues, were carried out on 60 intraspecific hybrids of European olive. Corregiolo and Ascolano cultivars served as the control.

The experiments were performed in laboratory conditions under controlled temperature of 30°C and relative air humidity of 30%. After leaf tissues' saturation with water (control), as well as after they were dehydrated for 24, 48 and 72 hours, drought resistance indicators were assessed.

Results. Based on a cluster analysis, the main indicators of drought resistance, four groups of olive genotypes with different resistance to drought were identified. The greatest interest is for hybrids in the group with very high drought resistance. This cluster consists of 14 of the most promising hybrids that are superior in drought resistance to the control olive variety Ascolano. Water loss for these accession varied from 20.81 to 33.63%, and the relative yield of electrolyte varied from 0.27 to 0.36 RU, which allows us to conclude that their drought resistance is very high. Based on the analysis of principal components between various criteria of the water regime of olive plants, the relationship and influence on the integral assessment of drought resistance was shown. It is noted that the most informative indicator, which has a negative correlation with water loss and the relative yield of electrolytes when the cell membrane is damaged, is water-holding capacity. Indicators of drought resistance such as water content in leaves, water deficit, and relative water content in leaves are not sufficiently informative for the selection breeding of drought-resistant cultivars and forms of olive.

Keywords: cultivars; drought resistance; relative electrolyte yield; *Olea europaea* L.

For citation. Tsiupka, S. Yu., Plugatar, Y. V., Tsiupka, V. A., & Bulavin, I. V. (2025). Drought resistance assessment of olive cultivars and hybrids. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 478-504. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1148

Введение

Маслина европейская (*O. europaea* L.) является одной из наиболее культивируемых плодовых пород. Выращивают маслину в 47 странах мира. Основные из них по промышленному производству *O. europaea*:

Испания, Греция, Италия, Марокко, Франция, Сирия, Турция, Тунис [23; 42; 46]. По данным за 2022 год площадь под этой культурой составила 10,9 млн. га [23]. В Российской Федерации сходные почвенно-климатические условия культигенного ареала маслины имеет Республика 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 его культивирования и в других южных регионах России. Предпосылкой к расширению площадей является глобальное потепление климата, а также проведение направленной селекции по данной культуре [1]. В последние годы аридизация земель является одним из основных лимитирующих факторов в распространении сельскохозяйственных растений [22; 28]. Производителям маслины зачастую приходится переносить свои посадки из традиционных южных районов Европы в более прохладные и влажные северные [24; 39]. Ареал возделывания *O. europaea* постепенно перемещается на север, с акцентом на выращивание и создание морозостойких и засухоустойчивых сортов. Это определяет возможные перспективы увеличения площадей возделывания данной культуры на Юге России. Для данных территорий также актуальна проблема атмосферной засухи и недостаточного водоснабжения для организации орошения. Маслина европейская – ксерофитная культура, однако ее сорта различаются по своей засухоустойчивости [17; 47] из-за структурных и морфологических особенностей листьев, устьичной проводимости и эффективности использования воды [8; 13; 14; 26; 41].

В Никитском ботаническом саду создан уникальный генофонд маслины, включающий 267 сортов и около 2000 гибридных форм [44; 48]. Это хорошая база для получения сортов с определенными признаками, включая засухоустойчивость. Культивирование маслины европейской на юге страны позволит снизить уровень импортозависимости за счет производства отечественной плодовой продукции, что закреплено в «Федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017 - 2030 годы» и действующем законодательстве РФ (Постановление Правительства РФ от 13 мая 2022 г. N 872 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2017 г. N 996») [4].

В связи с этим, *целью настоящего исследования* было выделить генотипы *O. europaea* с высокой адаптационной способностью к засушливым условиям юга России и определить наиболее информативные показатели засухоустойчивости для скрининга коллекции.

Материалы и методы исследования

Для исследований использовали многолетние растения маслины европейской, 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). В этом районе субтропический климат с сухим и жарким летом и влажной зимой, при этом осадки в основном концентрируются в осенний и зимний сезоны. Среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет 2285 часов, количество осадков – 188 мм с мая по сентябрь и 595 мм за весь год. Абсолютный максимум температуры составляет 39,0°C. Среднегодовая температура (+12,4°C), среднегодовая влажность воздуха 67%. Почва бурая, слабоизвестковая, тяжелосуглинистая на глинистых сланцах и известняках [2].

Исследования проводили в 2021–2024 гг. на 60-70-летних деревьях, посаженных на расстоянии 5х5 м друг от друга, с плотностью посадки 400 деревьев на га$^{-1}$ и южной экспозицией склона. В качестве материала использовали листьях 62 генотипов *O. europaea* различного генетического происхождения (Таблица 1). Контролем служили сорта Ascolano и Corregiolo.

Таблица 1.

Объекты исследований

№ п/п	Сорт, форма	Происхождение
1	Corregiolo (контроль)	Страна-происхождения – Италия. Мировой стандарт, один из наиболее распространенных сортов масличного назначения
2	Ascolano (контроль)	Страна-происхождения – Италия. Один из наиболее распространенных сортов столового (консервного) назначения, мировой стандарт в засухоустойчивости маслины европейской
3	35-1/8	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
4	35-1/16	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
5	35-1/26	Никитская Крупноплодная х (Ascolano х Крымская)
6	35-1/17	Сеянец Обильная х Ascolano
7	35-1/32	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
8	35-1/31	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
9	35-1-18	Сеянец Крымская от свободного опыления
10	35-1/3	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
11	35-2/4	Ascolano х (Крымская х Никитская 1)

12	35-2/30	Никитская Крупноплодная х (Ascolano х Крымская)
13	35-2/14	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
14	35-2/18	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
15	35-2/23	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
16	35-3/7	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
17	35-3/3	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
18	35-4/31	Сеянец D′Elemsen от свободного опыления
19	35-4/26	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
20	35-4/4	Сеянец Ранняя от свободного опыления
21	35-4/17	Сеянец Крымская х Ранняя
22	35-4/11	Сеянец Dalmatica от свободного опыления
23	35-4/15	Сеянец Юбилейная от свободного опыления
24	35-4/32	Сеянец Никитская Крупноплодная от свободного опыления
25	35-5/1	Сеянец Ранняя х Крымская
26	35-5/12	Сеянец Мелколистная х Никитская 1
27	35-5/13	Сеянец Мелколистная х Никитская 1
28	35-5/18	Сеянец Ascolano от свободного опыления
29	35-5/15	Сеянец Никитская х Ascolano
30	35-5/17	Сеянец Никитская Крупноплодная х (Ascolano х Никитская 1)
31	35-5/31	Сеянец Никитская 1 от свободного опыления
32	35-6/3	Сеянец Тунисская от свободного опыления
33	35-6/25	Сеянец Тунисская от свободного опыления
34	35-6/15	Сеянец Никитская 5 от свободного опыления
35	35-6/11	Сеянец Никитская 5 от свободного опыления
36	35-7/31	Сеянец Никитская Крупноплодная х ((Ascolano х (Превосходная х Никитская 1))
37	35-7/15	Сеянец Corregiolo х Крымская
38	35-7/9	Сеянец Никитская Крупноплодная от свободного опыления
39	35-8/42	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
40	35-8/47	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
41	35-8/25	Сеянец Никитская Крупноплодная от свободного опыления
42	35-8/26	Сеянец Мелколистная х Тифлисская
43	35-8/9	Сеянец Ранняя от свободного опыления
44	35-8/4	Сеянец Никитская 1 х (Никитская Крупноплодная х Ascolano)
45	35-8/28	Сеянец Тунисская от свободного опыления
46	35-9/5	Сеянец Испанская от свободного опыления
47	35-9/37	Сеянец Ascolano х (Ломашенская х Толгомская)

48	35-10/36	Сеянец Мелколистная х Тифлисская
49	35-10/30	Сеянец Никитский 1 х свободное опыление
50	35-11/15	Сеянец Dalmatica от свободного опыления
51	35-11-24	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
52	35-11/25	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
53	35-13/37	Сеянец Agalandau от свободного опыления
54	35-13/38	Сеянец Албанская от свободного опыления
55	35-13/2	Сеянец Тунисская от свободного опыления
56	35-14/10	Сеянец Corregiolo х Никитская Крупноплодная
57	35-15/23	Сеянец Corregiolo х Никитская Крупноплодная
58	35-15/31	Сеянец Превосходная х Никитская Крупноплодная
59	35-15/13	Сеянец Никитская Крупноплодная х Ascolano
60	35-15/36	Сеянец Corregiolo от свободного опыления
61	35-16/16	Сеянец Превосходная от свободного опыления
62	35-16/13	Сеянец Превосходная х (Ascolano х Крымская)

Оценку показателей засухоустойчивости выполняли в лабораторных условиях после насыщения тканей листа водой (контроль), а также после их дегидратации в течение 24, 48 и 72 часов. Гидротермический стресс моделировали в климатической тест-камере TTC 256 Memmert (Memmert, Германия, 2017). Дегидратацию проводили при контролируемой температуре 30°C и относительной влажности воздуха 30%.

Водный статус растений оценивали по общей оводненности листьев, водоудерживающей способности, водному дефициту листьев и транспирационной активности.

Содержание влаги в листьях (LWC) и дефицит водонасыщения (WSD), водоудерживающую способность через 24, 48 и 72 часа (R24, R48, R72) в листьях определяли весовым методом [3; 5; 19; 31; 36; 45] с использованием прецизионных весов Pioneer PA4102 (Ohaus, Китай) и сушильного шкафа РЕ-4610 (Экросхим, Россия). Листья отбирали из среднего яруса кроны, средней части побегов, равномерно расположенных по кроне. Для каждого варианта опыта средняя проба составляла 3 листа с 3 растений каждого сорта. После сбора листовых пластинок сразу проводили измерения для определения свежего веса листьев (FW). Массу листьев после насыщения (TW) определяли путем их погружения в дистиллированную воду на 24 ч при комнатной температуре (до достижения постоянной массы) в темноте по методике описанной у M.S. Islam et al. [30]. Образцы листьев сушили в сушильном шкафу при температуре 105°C для определения сухой массы.

Исследование показателей водного режима проводили ежегодно (2021-2024) в период максимального воздействия засухи в трех биологических повторностях ((3 растения×20 листьев)×три раза).

Содержание воды в листьях рассчитывали по формуле (1)

$$LWC = (TW - DW) \times 100 \quad (1), [27]$$

Дефицит водонасыщения рассчитывали по формуле (2)

$$WSD = 100 - RWC \quad (2), [37]$$

Относительное содержание воды рассчитывали по формуле (3)

$$RWC = (FW - DW) \div (TW - DW) \quad (3), [37]$$

Водоудерживающая способность листьев рассчитывали по формуле (4)

$$R = 100 \times (SW - DW) \div FW \quad (4), [36],$$

где TW – масса листьев после насыщения, DW – масса пробы после высушивания, FW – свежая масса пробы, SW – масса пробы после 24, 48 и 72 часов дегидратации.

Для оценки степени повреждения клеточных мембран листьев при дегидратации рассчитывали скорость утечки электролита. Образцы листьев после каждого температурного воздействия помещали в 5 мл дистиллированной воды на 24 ч при комнатной температуре, а затем вакуумировали в течение 30 мин. Электропроводность (EC_1) измеряли с помощью кондуктометра Starter 300c (Ohaus, США). Затем образцы автоклавировали при 120°C в течение 2 часов, охлаждали до комнатной температуры, помещали в темноту на 24 часа (25°C), повторно вакуумировали в течение 30 мин, а затем измеряли утечку ионов (EC_2) [43]. Относительный выход электролита (EL) рассчитывали для каждого образца согласно формуле: $EL(\%) = (\frac{EC1}{EC2}) \times 100$ (5) [37].

Данные обрабатывали статистически с применением пакета прикладных программ Microsoft Office Excel 2019 и Past v. 4.03 [29].

Результаты и обсуждения

Содержание воды в листьях (LWC) и величина водного дефицита (WSD) являются важными характеристиками, определяющими функциональное состояние растения и уровень стресса. В наших исследованиях отмечено значительное варьирование содержания воды у различных генотипов маслины европейской. Так, например, у гибрида 35-4/4 этот показатель составил 42,11%, в то время как у гибрида 35-5/15 он достигал 57,47% (Рис. 1).

Как отмечается в исследованиях Araujo с соавторами [9] содержание воды в листьях оливковых деревьев из засушливой зоны было значи-

тельно ниже, чем в увлажненной, и составило 50,4 и 95,3%, соответственно.

В исследованиях A. Petridis и E.A. Bacelar с соавторами [12; 40] акцентируется, что оливковые деревья, произрастающие в средиземноморских экосистемах, развили характеристики защиты от потери воды посредством жесткого контроля устьичной транспирации, высокой плотности листовой ткани и толстых слоев кутикулы и трихом и, в связи с этим, достаточно устойчивы к засухе. Однако, как в нашем исследовании, так и в работе Araujo с соавторами [9] показано, что отсутствие осадков в сочетании с высокой температурой вызывает симптомы обезвоживания у оливковых деревьев, что подтверждается более низким содержанием воды в листьях.

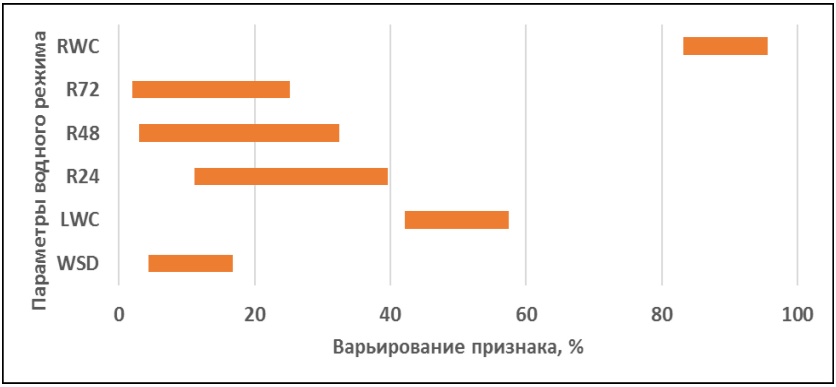


Рис. 1. Варьирование различных коэффициентов – индикаторов засухоустойчивости у изученных генотипов *O. europaea*

Показатель водного дефицита является очень важным при определении водного режима растений и во многих работах является одним из параметров-индикаторов засухоустойчивости растений маслины [10; 16; 34]. Кроме того, он является основополагающим в концепции «дефицитного орошения», что является предметом многих исследований во всех регионах с недостаточным водообеспечением [16; 34]. В наших исследованиях варьирование показателя водного дефицита составляло от 4,4 (у гибрида 35-9/5) до 16,8% (у гибрида 35-4/15). В опыте зарубежных исследователей вместо водного дефицита чаще всего используется обратная величина – относительное содержание воды в листьях (RWC).

В нашей работе эта величина колебалась от 83,2 до 95,6%, что сопоставимо с данными C. Brito с соавторами [15], где указывается, что относительное содержание воды в листьях маслины при воздействии засухи варьировало от 75 до 95%.

Как отмечают F.S. Larsen и R. Gucci с соавторами маслина является засухоустойчивым видом, который может выдерживать экстремально низкие значения водного потенциала и RWC, прежде чем потерять тургор [25; 32]. Осмотический стресс и обезвоживание на клеточном уровне влияют на функциональное состояние растения [35].

В работе M. Ayaz с соавторами показан самый низкий уровень RWC (70%) в условиях обезвоживания и солевого стресса [11]. В наших исследованиях такой уровень не был отмечен ни у одного из образцов.

Анализ данных водоудерживающей способности (R24, R48 и R72) тканей листовых пластинок маслины европейской, проведенный в 2021-2024 гг. в период максимальной нагрузки гидротермического стресса показал, что через 24 часа дегидратации водоудерживающая способность варьировала от 11,14 до 39,63%, через 48 часов – колебалась от 2,97 до 32,53%, а через 72 часа – от 1,94 до 25,14%.

Низкие показатели водоудерживающей способности листа у ряда генотипов указывают на достижение сублетальных величин, в то время как отдельные генотипы показывают высокие значения этого параметра, что говорит о функционировании листового аппарата в пределах витальных норм.

Варьирование потери воды на 24 часах дегидратации (WL24) в среднем составляло от 6,27% (у гибрида 35-8/28) до 40,36% (у гибрида 35-5/12) от первоначального веса.

На этом этапе искусственного обезвоживания отмечены значительные сортовые различия, позволяющие дифференцировать генотипы с низкой водоудерживающей способностью тканей и провести первичную отбраковку незасухоустойчивых сортов и гибридов. Наибольшую потерю воды за сутки показали гибридные формы 35-4/15 (38,35% от первоначального веса), 35-5/12 (40,36%), 35-7/15 (38,48%), 35-11/25 (37,88%) (Табл. 2).

Через двое суток обезвоживания гибридные формы потеряли от 13,44 до 45,45% от своего первоначального веса. Гибель клеток, зафиксированная методом утечки электролита, варьировала от 0,15 отн. ед. (у гибридной формы 35-16/13) до 0,97 отн. ед. (у гибрида 35-11/25) (Таблица 2).

Таблица 2.

Потеря воды (%) и утечка электролита (отн. ед.) у листьев *Olea europaea* через 24 и 48 часов дегидратации

Сорт, форма	WL24	WL48	EL24	EL48	Сорт, форма	WL24	WL48	EL24	EL48
Corregiolo	20,63	34,74	0,21	0,37	35-6/3	12,53	25,07	0,17	0,29
Ascolano	16,37	29,54	0,20	0,28	35-6/25	17,71	28,00	0,25	0,32
35-1/8	18,55	34,63	0,24	0,49	35-6/15	14,23	24,69	0,19	0,24
35-1/16	17,02	30,15	0,19	0,40	35-6/11	14,76	24,70	0,20	0,24
35-1/26	28,65	38,76	0,38	0,54	35-7/31	18,01	29,84	0,26	0,38
35-1/17	35,45	43,86	0,47	0,68	35-7/15	38,48	43,15	0,64	0,76
35-1/32	19,59	36,39	0,23	0,59	35-7/9	17,53	30,86	0,18	0,37
35-1/31	20,73	37,59	0,24	0,52	35-8/42	21,52	34,69	0,26	0,37
35-1-18	32,32	40,19	0,38	0,49	35-8/47	19,74	30,37	0,26	0,31
35-1/3	21,44	36,94	0,29	0,54	35-8/25	11,82	21,14	0,14	0,18
35-2/4	17,73	30,94	0,23	0,34	35-8/26	10,99	19,78	0,15	0,17
35-2/30	12,44	19,56	0,20	0,22	35-8/9	24,47	41,28	0,40	0,60
35-2/14	14,66	22,59	0,18	0,22	35-8/4	22,12	39,13	0,35	0,55
35-2/18	27,35	40,92	0,44	0,64	35-8/28	6,27	13,47	0,14	0,22
35-2/23	26,13	39,72	0,39	0,49	35-9/5	13,22	21,49	0,15	0,17
35-3/7	23,47	38,69	0,39	0,56	35-9/37	18,61	38,22	0,20	0,46
35-3/3	25,19	33,15	0,38	0,43	35-10/36	20,00	28,00	0,20	0,23
35-4/31	15,65	24,87	0,17	0,23	35-10/30	17,41	27,23	0,19	0,28
35-4/26	18,49	27,39	0,25	0,28	35-11/15	23,84	34,00	0,37	0,50
35-4/4	22,78	30,74	0,37	0,45	35-11-24	31,43	42,86	0,43	0,55
35-4/17	21,05	36,84	0,29	0,48	35-11/25	37,88	45,45	0,75	0,97
35-4/11	24,69	38,45	0,39	0,50	35-13/37	35,99	41,89	0,39	0,67
35-4/15	38,35	43,18	0,59	0,70	35-13/38	25,42	36,21	0,36	0,56
35-4/32	28,95	41,58	0,49	0,57	35-13/2	23,57	30,23	0,37	0,41
35-5/1	24,55	38,45	0,44	0,55	35-14/10	32,14	45,41	0,56	0,96
35-5/12	40,36	43,62	0,77	0,89	35-15/23	21,26	34,74	0,27	0,44
35-5/13	22,27	36,40	0,38	0,62	35-15/31	22,90	36,97	0,29	0,47
35-5/18	23,33	37,48	0,38	0,53	35-15/13	17,09	33,45	0,23	0,42
35-5/15	24,33	40,41	0,40	0,51	35-15/36	32,75	39,56	0,43	0,60
35-5/17	20,93	31,14	0,26	0,36	35-16/16	18,40	37,80	0,22	0,48
35-5/31	14,53	21,80	0,17	0,20	35-16/13	6,63	13,44	0,14	0,15

Примечание: WL24, WL48 – потеря воды листьями, а EL24 и EL48 – относительный выход электролита через 24 и 48 часов соответственно.

Потеря воды тканями листа от первоначального веса при 72 часах дегидратации (WL72) варьировала у различных генотипов от 20,81% (гибридная форма 35-16/13) до 46,88% (гибридная форма 35-5/12) (Рис. 2).

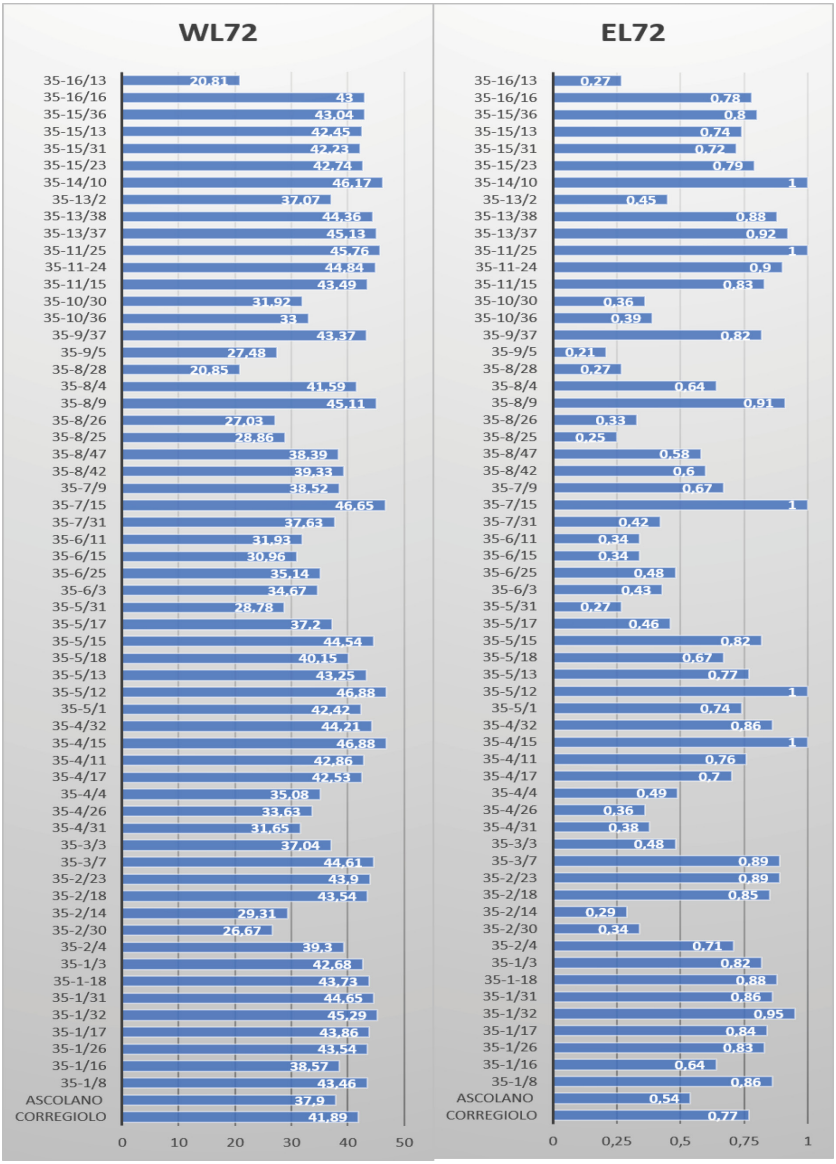


Рис. 2. Потеря воды и относительный выход электролита из клеток листьев *O. europaea* L. при 72 часах дегидратации

У контрольных сортов потеря воды за этот же период времени составила 41,89% (Corregiolo) и 37,90% (Ascolano). Относительный выход электролита, наблюдаемый при повреждении клеточной мембраны и, свидетельствующий о гибели клеток на этом этапе дегидратации тканей, варьировал от 0,21 отн. ед. (гибридная форма 35-9/5) до 1,00 отн.ед. (гибридные формы 35-4/15, 35-5/12, 35-7/12, 35-11/25, 35-14/10). Значительные повреждения клеточной мембраны отмечены и у контрольных сортов, выход электролита при этом составил 0,54 отн. ед. (Ascolano) и 0,77 отн. ед. (Corregiolo). Похожие результаты получены S. Parri с соавторами [38]. В их исследованиях относительный выход электролита у сортов Giarraffa, Leccino, Maurino в различных вариантах опыта варьировал от 0,15 до 0,85 отн. ед. 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 [7], B. Abdallah с соавторами в Тунисе [6], N. Denaxa с соавторами в Греции [18], M. Dias с соавторами в Португалии [20] 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.

Для анализа всех показателей-индикаторов засухоустойчивости и дифференцирования гибридов по степени засухоустойчивости проведена группировка генотипов с использованием иерархической кластеризации (Рис. 3). На основании кластерного анализа выделено четыре основных группы маслины европейской, отличающиеся по основным показателям засухоустойчивости. В кластер «А» входят генотипы с высокой потерей воды (от 45,76 до 46,88%) и полным выходом электролита из тканей листа при искусственном обезвоживании, что говорит о 100% гибели клеток. В этот кластер входят гибридные формы с низкой засухоустойчивостью.

В кластер «В» – генотипы со средней устойчивостью к засухе. Это самая многочисленная группа, включающая 28 сортов и форм *O. europaea* (в том числе и контрольный сорт Corregiolo). Экстремальные условия эксперимента позволили дифференцировать их среди устойчивых генотипов, что и являлось одной из целей проведенного анализа. У исследованных растений потеря воды тканями листа от первоначального веса через 72 часа дегидратации варьировала от 41,89 до 45,29%, а относительный выход электролита колебался от 0,77 до 0,95 отн. ед.

Хорошую устойчивость к засухе показали генотипы, отнесенные в кластер «С». Данная группа включает 14 гибридов и контрольный сорт Ascolano. Потеря воды у растений варьировала от 34,67 до 41,59%, а выход электролита составлял от 0,43 до 0,64%. Полученные нами результаты подтверждают данные C. Faraloni с соавторами [21], в соответствии с которыми сорт Ascolano был отобран и классифицирован как устойчивый. Аналогичные выводы были получены H. Liu с соавторами при анализе засухоустойчивости шести сортов маслины (Picul, Ascolano, Frantoio, Chenggu 32, Ezhi и Coratina), культивируемые в провинции Юньнань в Китае [33].

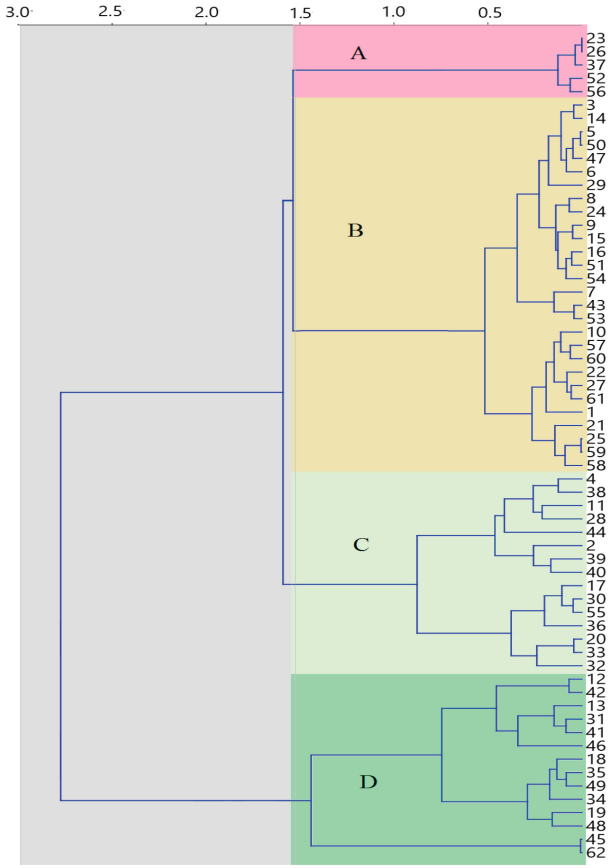


Рис. 3. Кластеризация генотипов *O. europaea* L. по степени засухоустойчивости (порядковый номер образца соответствует номеру в Таблице 1)

Наибольший интерес представляют гибриды, которые сформировали кластер «D», состоящий из 14 наиболее перспективных форм, которые превосходят по засухоустойчивости контрольный сорт Ascolano (генотипы 35-2/30, 35-8/26, 35-2/14, 35-5/31, 35-8/25, 35-9/5, 35-4/31, 35-6/11, 35-10/30, 35-6/15, 35-4/26, 35-10/36, 35-8/28, 35-16/13). Водопотеря у этих генотипов варьировала от 20,81 до 33,63%, а относительный выход электролита – от 0,27 до 0,36 отн. ед., что позволяет сделать вывод о высоком уровне засухоустойчивости этих растений.

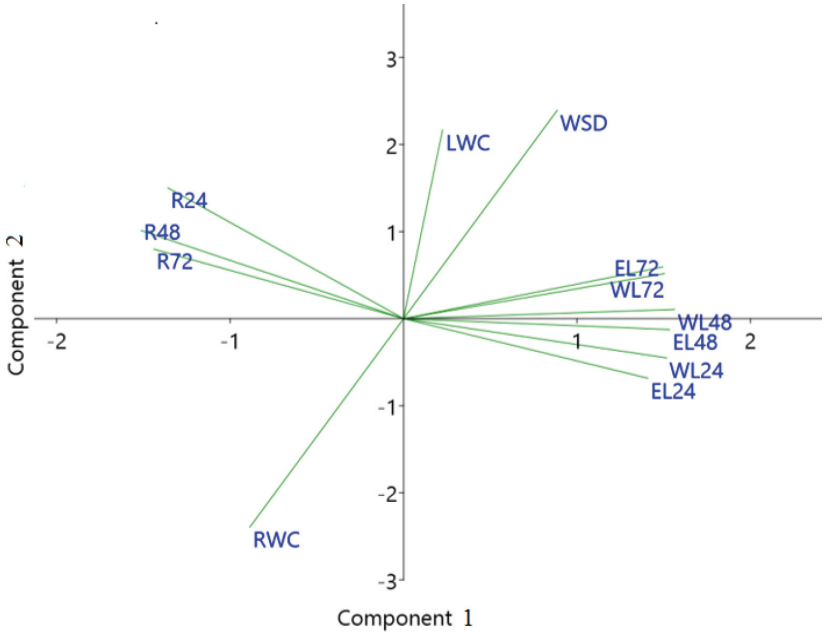


Рис. 4. Биплот анализа главных компонент, демонстрирующий взаимосвязь между различными показателями водного режима *O. europaea*

Для того чтобы понять взаимосвязь, а также сходства и различия между показателями засухоустойчивости у сортов и гибридных форм маслины европейской, был использован анализ основных компонент (PCA). Взаимосвязь между различными критериями водного режима растений маслины: относительного содержания воды в листьях (RWC), водного дефицита (WSD), оводненности листьев (LWC), водоудерживающей способности (R24, R48, R72), водопотерей (WL24. WL48, WL72) при искусственной

дегидратации и относительным выходом электролита при повреждении клеточной мембраны графически 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 [49]. Как видно из рисунка 5 наиболее информативным индикатором, имеющим отрицательную корреляцию с водопотерей (WL) и относительным выходом электролита (EL) при повреждении клеточной мембраны является водоудерживающая способность (R). Такие показатели-индикаторы засухоустойчивости как содержание воды в листьях (LWC), водный дефицит (WSD) и относительное содержание воды в листьях (RWC) оказались недостаточно информативны для отбора засухоустойчивых сортов и форм маслины.

Выводы

Выделено 14 наиболее перспективных гибридов, которые превосходят по засухоустойчивости контрольный сорт маслины Ascolano, отличающиеся низкой водопотерей (от 20,81 до 33,63%), и относительным выходом электролита от 0,27 до 0,36 отн. ед. при длительной дегидратации, что позволяет сделать вывод о высоком уровне засухоустойчивости этих генотипов.

Наиболее информативными показателями, пригодными для оценки генофонда на засухоустойчивость являются: относительный выход электролита при повреждении клеточной мембраны, водоудерживающая способность и величина потери воды при обезвоживании тканей листа.

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 на базе Уникальной научной установки «ФИТОБИОГЕН» и ЦКП «Физиолого-биохимические методы исследования растительных объектов».

Список литературы

1. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Реестр селекционных достижений. URL: https://gossortrf.ru/

registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-2-porody-zhivot/ (дата обращения: 08.08.2024).

2. Корсакова, С. П., & Корсаков, П. Б. (2020). Климатическая характеристика сезонов 2019 г. на Южном берегу Крыма. *Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян»*, (11), 6-22. https://doi.org/10.36305/2413-3019-2020-11-06-22 EDN: https://elibrary.ru/ikwwkn
3. Лищук, А. И. (1991). Методика определения водоудерживающей способности к обезвоживанию листьев плодовых культур. В: *Физиологические и биофизические методы в селекции плодовых культур: Методические рекомендации* (с. 33-36). Москва.
4. Постановление Правительства РФ от 13 мая 2022 г. N 872 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2017 г. N 996» [Электронный ресурс] // base.garant.ru: официальный сайт. URL: https://base.garant.ru/404734015/ (дата обращения: 13.08.2024).
5. Самигуллина, Н. С. (2006). *Практикум по селекции и сортоведению плодовых и ягодных культур*: учебное издание. Мичуринск: Издательство Мичуринского государственного аграрного университета. 197 с.
6. Abdallah, M. B., Trupiano, D., Polzella, A., De Zio, E., Sassi, M., Scaloni, A., Zarrouk, M., Youssef, 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.
7. 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*, 64(15), 20-29. https://doi.org/10.14715/cmb/2017.64.15.4
8. Ahmed, C. B., Rouina, B. B., & Boukhris, M. (2007). Effects of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia. *Scientia Horticulturae*, 113(3), 267-277. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.03.020
9. Araujo, M., Prada, J., Mariz-Ponte, N., Santos, C., Pereira, J. A., Pinto, D. C. G. A., Silva, A. M. S., & Dias, M. C. (2021). Antioxidant adjustments of olive trees (*Olea europaea*) under field stress conditions. *Plants*, 10(4), 684. https://doi.org/10.3390/plants10040684 EDN: https://elibrary.ru/vgimhc
10. Arias, N. S., Scholz, F. G., Goldstein, G., & Bucci, S. J. (2021). Low-temperature acclimation and legacy effects of summer water deficits in olive freezing resistance. *Tree Physiology*, 41(10), 1836-1847. https://doi.org/10.1093/treephys/tpab040 EDN: https://elibrary.ru/rkchei
11. Ayaz, M., Varol, N., & Yolcu, S. (2021). Three (Turkish) olive cultivars display contrasting salt stress-coping mechanisms under high salinity. *Trees*, 35, 1283-

1298. https://doi.org/10.1007/s00468-021-02115-w EDN: https://elibrary.ru/knukeu

12. 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.
13. Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., & Rallo, L. (2010). *Olive Growing*. Mundi-Prensa: Junta de Andalucía, Australian Olive Association Ltd. 756 p.
14. Bosabalidis, A. M., & Kofidis, G. (2002). Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. *Plant Science*, 163(2), 375-379. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00135-8 EDN: https://elibrary.ru/bbaieu
15. Brito, C., Dinis, L.-T., Silva, E., Gonçalves, A., Matos, C., Rodrigues, M. A., Moutinho-Pereira, J., Barros, A., & Correia, C. (2018). Kaolin and salicylic acid foliar application modulate yield, quality and phytochemical composition of olive pulp and oil from rainfed trees. *Scientia Horticulturae*, (237), 176-183.
16. Carr, M. K. V. (2013). The water relations and irrigation requirements of olive (*Olea europaea* L.): A review. *Experimental Agriculture*, 49(4), 597-639. https://doi.org/10.1017/S0014479713000276
17. Connor, D. J. (2005). Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1181-1189. https://doi.org/10.1071/AR05169
18. 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
19. 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.
20. Dias, M. C., Correia, S., Serodio, 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
21. 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

22. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). *Global Outlook on Climate Services in Agriculture: Investment Opportunities to Reach the Last Mile*. Rome, Italy: Food & Agriculture Org. ISBN: 978-92-5-135011-9
23. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT [Electronic resource] // Available online: URL: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize (accessed on 23 December 2023).
24. Gambella, F., Bianchini, L., Cecchini, M., Egidi, G., Ferrara, A., Salvati, L., Colantoni, A., & Morea, D. (2021). Moving toward the north? The spatial shift of olive groves in Italy. *Agricultural Economics*, 67(4), 129-135. https://doi.org/10.17221/467/2020-AGRICECON EDN: https://elibrary.ru/mejiyc
25. Gucci, R., Lombardini, L., & Tattini, M. (1997). Analysis of leaf water relations in leaves of two olive (*Olea europaea*) cultivars differing in tolerance to salinity. *Tree Physiology*, 17(1), 13-21.
26. Guerfel, M., Baccouri, O., Boujnah, D., Chaïbi, W., & Zarrouk, M. (2009). 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
27. Gul, N., Haq, Z. U., Ali, H., Munsif, F., Hassan, S. S. U., & Bungau, S. (2022). Melatonin Pretreatment Alleviated Inhibitory Effects of Drought Stress by Enhancing Anti-Oxidant Activities and Accumulation of Higher Proline and Plant Pigments and Improving Maize Productivity. *Agronomy*, 12(10), 2398. https://doi.org/10.3390/agronomy12102398 EDN: https://elibrary.ru/padsde
28. Hammer, G. M., Cooper, M., & Reynolds, M. P. (2021). Plant production in water-limited environments. *Journal of Experimental Botany*, 72(14), 5097-5101. https://doi.org/10.1093/jxb/erab273 EDN: https://elibrary.ru/zivrhc
29. Hammer, Ø., & Harper, D. A. T. (2001). PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontological Electronica*, 4, 4. URL: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
30. Islam, M. S., Hasan, K., Islam, R., Chowdhury, K., Pramanik, M. H., Iqbal, M. A., Rajendran, K., Iqbal, R., Soufan, W., Kamran, M., & Islam, M. S. (2023). Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA3). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1048768. https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1048768 EDN: https://elibrary.ru/qavfis
31. Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology*. 4th ed. Heidelberg/Berlin, Germany; New York, NY, USA: Springer-Verlag. 164 p.
32. Larsen, F. E., Higgins, S. S., & Al Wir, A. (1989). Diurnal water relations of apple, apricot, grape, olive and peach in an arid environment (Jordan). *Scientia Horticulturae*, 39(3), 211-222.

33. 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.
34. Martin-Palomo, M. J., Andreu, L., Perez-Lopez, D., Centeno, A., Galindo, A., Moriana, A., & Corell, M. (2022). Trunk growth rate frequencies as water stress indicator in almond trees. *Agricultural Water Management*, 271, 107765. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107765 EDN: https://elibrary.ru/batbay
35. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 651-681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911 EDN: https://elibrary.ru/mlwiix
36. Murzabulatova, F. K., & Zhigunov, O. Yu. (2019). Features of water regime of some species of Deutzia Thumb. genus in the South-Ural Botanical Garden (Ufa). *Bulletin of the State Nikit Botanical Garden*, (130), 137-140. https://doi.org/10.25684/NBG.boolt.130.2019.19 EDN: https://elibrary.ru/igsgfd
37. Nguyen, T. C., Jo, H., Tran, H. A., Lee, J., Lee, J.-D., Kim, J. H., Seo, H. S., & Song, J. T. (2024). Assessment of drought responses of wild soybean accessions at different growth stages. *Agronomy*, 14(3), 471. https://doi.org/10.3390/agronomy14030471 EDN: https://elibrary.ru/teqyzu
38. 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(7), 830. https://doi.org/10.3390/horticulturae9070830 EDN: https://elibrary.ru/wbwotr
39. Parry, K. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., & Hanson, C. E. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 22 p.
40. 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 Physiol. Biochem.*, (60), 1-11.
41. Proietti, P., Nasini, L., Del Buono, D., D'Amato, R., Tedeschini, E., & Businelli, D. (2013). Selenium protects olive (*Olea europaea* L.) from drought stress. *Scientia Horticulturae*, 164, 165-171. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.034 ISSN 0304-4238
42. Rallo, L., Diez, C. M., Morales-Sillero, A., Miho, H., Priego-Capote, F., & Rallo, P. (2018). Quality of olives: A focus on agricultural preharvest factors. *Sci. Hortic.*, 233, 491-509. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.034
43. 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
44. 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(7), 1323. https://doi.org/10.3390/genes14071323 EDN: https://elibrary.ru/qejysj
45. 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
46. The International Olive Council [Электронный ресурс]. URL: https://www.internationaloliveoil.org/ (дата обращения: 05.08.2024)
47. Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Morales-Sillero, A., Martin-Palomo, M. J., Mayr, S., Beikircher, B., & Fernandez, 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
48. Tsiupka, S. (2018). A historical review of olive germplasm evaluation and cultivar development in Crimea. *Acta Hortic.*, 1208, 97-104. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1208.13 EDN: https://elibrary.ru/valebr
49. 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

References

1. State Register of Selection Achievements Allowed for Use. Registry of Selection Achievements. URL: https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-2-porody-zhivot/ (accessed August 8, 2024).
2. Korcakova, S.P., & Korsakov, P.B. (2020). Climate Characteristics of Seasons in 2019 on the Southern Coast of Crimea. *Natural Notes of Martyan Cape Nature Reserve*, (11), 6-22. https://doi.org/10.36305/2413-3019-2020-11-06-22 EDN: https://elibrary.ru/ikwwkn
3. Lischuk, A.I. (1991). Method for Determining Water Retention Capacity During Leaf Dehydration in Fruit Crops. In: *Physiological and Biophysical Methods in Fruit Crop Breeding: Guidelines* (pp. 33-36). Moscow.
4. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 872 of May 13, 2022 "On Amending Resolution No. 996 of the Government of the Russian Fed-

eration of August 25, 2017". URL: https://base.garant.ru/404734015 (accessed August 13, 2024).
5. Samigullina, N.S. (2006). *Practicum on Selection and Sorting of Fruit and Berry Crops*: Textbook Edition. Michurinsk: Publishing House of Michurinsky State Agrarian University. 197 p.
6. Abdallah, M. B., Trupiano, D., Polzella, A., De Zio, E., Sassi, M., Scaloni, A., Zarrouk, M., Youssef, 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.
7. 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*, 64(15), 20-29. https://doi.org/10.14715/cmb/2017.64.15.4
8. Ahmed, C. B., Rouina, B. B., & Boukhris, M. (2007). Effects of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia. *Scientia Horticulturae*, 113(3), 267-277. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.03.020
9. Araujo, M., Prada, J., Mariz-Ponte, N., Santos, C., Pereira, J. A., Pinto, D. C. G. A., Silva, A. M. S., & Dias, M. C. (2021). Antioxidant adjustments of olive trees (*Olea europaea*) under field stress conditions. *Plants*, 10(4), 684. https://doi.org/10.3390/plants10040684 EDN: https://elibrary.ru/vgimhc
10. Arias, N. S., Scholz, F. G., Goldstein, G., & Bucci, S. J. (2021). Low-temperature acclimation and legacy effects of summer water deficits in olive freezing resistance. *Tree Physiology*, 41(10), 1836-1847. https://doi.org/10.1093/treephys/tpab040 EDN: https://elibrary.ru/rkchei
11. Ayaz, M., Varol, N., & Yolcu, S. (2021). Three (Turkish) olive cultivars display contrasting salt stress-coping mechanisms under high salinity. *Trees*, 35, 1283-1298. https://doi.org/10.1007/s00468-021-02115-w EDN: https://elibrary.ru/knukeu
12. 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.
13. Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., & Rallo, L. (2010). *Olive Growing*. Mundi-Prensa: Junta de Andalucía, Australian Olive Association Ltd. 756 p.
14. Bosabalidis, A. M., & Kofidis, G. (2002). Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. *Plant Science*, 163(2), 375-379. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00135-8 EDN: https://elibrary.ru/bbaieu

15. Brito, C., Dinis, L.-T., Silva, E., Gonçalves, A., Matos, C., Rodrigues, M. A., Moutinho-Pereira, J., Barros, A., & Correia, C. (2018). Kaolin and salicylic acid foliar application modulate yield, quality and phytochemical composition of olive pulp and oil from rainfed trees. *Scientia Horticulturae*, (237), 176-183.
16. Carr, M. K. V. (2013). The water relations and irrigation requirements of olive (*Olea europaea* L.): A review. *Experimental Agriculture*, 49(4), 597-639. https://doi.org/10.1017/S0014479713000276
17. Connor, D. J. (2005). Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1181-1189. https://doi.org/10.1071/AR05169
18. 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
19. 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.
20. Dias, M. C., Correia, S., Serodio, 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
21. 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
22. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). *Global Outlook on Climate Services in Agriculture: Investment Opportunities to Reach the Last Mile*. Rome, Italy: Food & Agriculture Org. ISBN: 978-92-5-135011-9
23. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT [Electronic resource] // Available online: URL: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize (accessed on 23 December 2023).
24. Gambella, F., Bianchini, L., Cecchini, M., Egidi, G., Ferrara, A., Salvati, L., Colantoni, A., & Morea, D. (2021). Moving toward the north? The spatial shift of olive groves in Italy. *Agricultural Economics*, 67(4), 129-135. https://doi.org/10.17221/467/2020-AGRICECON EDN: https://elibrary.ru/mejiyc

25. Gucci, R., Lombardini, L., & Tattini, M. (1997). Analysis of leaf water relations in leaves of two olive (*Olea europaea*) cultivars differing in tolerance to salinity. *Tree Physiology*, 17(1), 13-21.
26. Guerfel, M., Baccouri, O., Boujnah, D., Chaïbi, W., & Zarrouk, M. (2009). 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
27. Gul, N., Haq, Z. U., Ali, H., Munsif, F., Hassan, S. S. U., & Bungau, S. (2022). Melatonin Pretreatment Alleviated Inhibitory Effects of Drought Stress by Enhancing Anti-Oxidant Activities and Accumulation of Higher Proline and Plant Pigments and Improving Maize Productivity. *Agronomy*, 12(10), 2398. https://doi.org/10.3390/agronomy12102398 EDN: https://elibrary.ru/padsde
28. Hammer, G. M., Cooper, M., & Reynolds, M. P. (2021). Plant production in water-limited environments. *Journal of Experimental Botany*, 72(14), 5097-5101. https://doi.org/10.1093/jxb/erab273 EDN: https://elibrary.ru/zivrhc
29. Hammer, Ø., & Harper, D. A. T. (2001). PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontological Electronica*, 4, 4. URL: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
30. Islam, M. S., Hasan, K., Islam, R., Chowdhury, K., Pramanik, M. H., Iqbal, M. A., Rajendran, K., Iqbal, R., Soufan, W., Kamran, M., & Islam, M. S. (2023). Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA3). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1048768. https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1048768 EDN: https://elibrary.ru/qavfis
31. Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology*. 4th ed. Heidelberg/Berlin, Germany; New York, NY, USA: Springer-Verlag. 164 p.
32. Larsen, F. E., Higgins, S. S., & Al Wir, A. (1989). Diurnal water relations of apple, apricot, grape, olive and peach in an arid environment (Jordan). *Scientia Horticulturae*, 39(3), 211-222.
33. 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.
34. Martin-Palomo, M. J., Andreu, L., Perez-Lopez, D., Centeno, A., Galindo, A., Moriana, A., & Corell, M. (2022). Trunk growth rate frequencies as water stress indicator in almond trees. *Agricultural Water Management*, 271, 107765. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107765 EDN: https://elibrary.ru/batbay
35. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 651-681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911 EDN: https://elibrary.ru/mlwiix

36. Murzabulatova, F. K., & Zhigunov, O. Yu. (2019). Features of water regime of some species of Deutzia Thumb. genus in the South-Ural Botanical Garden (Ufa). *Bulletin of the State Nikit Botanical Garden*, (130), 137-140. https://doi.org/10.25684/NBG.boolt.130.2019.19 EDN: https://elibrary.ru/igsgfd
37. Nguyen, T. C., Jo, H., Tran, H. A., Lee, J., Lee, J.-D., Kim, J. H., Seo, H. S., & Song, J. T. (2024). Assessment of drought responses of wild soybean accessions at different growth stages. *Agronomy*, 14(3), 471. https://doi.org/10.3390/agronomy14030471 EDN: https://elibrary.ru/teqyzu
38. 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(7), 830. https://doi.org/10.3390/horticulturae9070830 EDN: https://elibrary.ru/wbwotr
39. Parry, K. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., & Hanson, C. E. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 22 p.
40. 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 Physiol. Biochem.*, (60), 1-11.
41. Proietti, P., Nasini, L., Del Buono, D., D'Amato, R., Tedeschini, E., & Businelli, D. (2013). Selenium protects olive (*Olea europaea* L.) from drought stress. *Scientia Horticulturae*, 164, 165-171. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.034 ISSN 0304-4238
42. Rallo, L., Diez, C. M., Morales-Sillero, A., Miho, H., Priego-Capote, F., & Rallo, P. (2018). Quality of olives: A focus on agricultural preharvest factors. *Sci. Hortic.*, 233, 491-509. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.034
43. 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
44. 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(7), 1323. https://doi.org/10.3390/genes14071323 EDN: https://elibrary.ru/qejysj
45. 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
46. The International Olive Council [Электронный ресурс]. URL: https://www.internationaloliveoil.org/ (дата обращения: 05.08.2024)
47. Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Morales-Sillero, A., Martin-Palomo, M. J., Mayr, S., Beikircher, B., & Fernandez, 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
48. Tsiupka, S. (2018). A historical review of olive germplasm evaluation and cultivar development in Crimea. *Acta Hortic.*, 1208, 97-104. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1208.13 EDN: https://elibrary.ru/valebr
49. 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

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Цюпка Сергей Юрьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»
ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация
tsupkanbg@mail.ru

Плугатарь Юрий Владимирович, чл.-корр. РАН, директор ФГБУН «НБС-ННЦ»
ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»
ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация
priemnaya-nbs-nnc@ya.ru

Цюпка Валентина Анатольевна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией геномики растений и биоинформатики, старший научный сотрудник
ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»
ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация
valentina.brailko@yandex.ru

Булавин Илья Владимирович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией клеточной биологии и анатомии, старший научный сотрудник
ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»
ул. Никитский спуск, 52, г. Ялта, 298648, Российская Федерация
cellbiolnbs@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Sergei Yu. Tsiupka, PhD, Senior Researcher
Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center
52, Nikitsky descent, Yalta, 298648, Russian Federation
tsupkanbg@mail.ru

Yuri V. Plugatar, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director
Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center
52, Nikitsky descent, Yalta, 298648, Russian Federation
priemnaya-nbs-nnc@ya.ru

Valentina A. Tsiupka, PhD, Head of the Laboratory of Plant Genomics and Bioinformatics, Senior Researcher
Nikitsky Botanical Garden-National Scientific Center
52, Nikitsky descent, Yalta, 298648, Russian Federation
valentina.brailko@yandex.ru

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

Поступила 05.09.2024 Received 05.09.2024
После рецензирования 12.10.2024 Revised 12.10.2024
Принята 07.11.2024 Accepted 07.11.2024

САДОВОДСТВО И ЛЕСОВОДСТВО

HORTICULTURE AND FORESTRY

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1028 **EDN: GAXHUR**
УДК 582.635.12:630(470.46)

CC BY NC ND

Научная статья

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ РАСТЕНИЙ *ULMUS PUMILA* L. К НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ФАКТОРАМ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.В. Калмыкова, К.А. Мельник, А.И. Передриенко

Аннотация

Обоснование. Исследования проводились в Астраханской области, где распространены пыльные бури и присутствует дефицит осадков. В данном регионе могут произрастать всего лишь несколько видов древесно-кустарниковых растений, одним из которых является *Ulmus pumila* L. Адаптация этого вида во многом зависит от способности приспосабливаться к засухе путем регулирования внутренней водной среды в период вегетации в условиях полупустыни. При дефиците влаги в почве у засухоустойчивых деревьев вяза приземистого в большей степени выражены защитные реакции саморегулирования.

Цель. Оценка физиологических параметров адаптации *Ulmus pumila* L. к неблагоприятным факторам среды в условиях Астраханской области.

Материалы и методы. Объектами являлись две группы растений: пойменные насаждения и насаждения зеленых зонтов *Ulmus pumila* L. в Харабалинском районе Астраханской области. Степень засухоустойчивости *Ulmus pumila* L. оценивалась по состоянию оводненности листьев и функционирования пигментных систем растения в жаркий летний период.

Результаты. Установлено, что наивысшие показатели водоудерживающей способности наблюдались у насаждений зеленых зонтов. Содержание хлорофилла в листьях *Ulmus pumila* L. варьирует в среднем от 31 до 30 мг/см в двух популяциях.

Заключение. Длительная засуха и высокая среднесуточная температура в Астраханской области, ухудшили показатели пигментов в листьях, но протекание жизненных процессов растений у двух насаждений происходит стабильно и угнетения таксонов не наблюдалось. *Ulmus pumila* L. имеет высокую адаптацию к малым пригодным почвам для растительности в Астраханской области.

Ключевые слова: адаптация; Ulmus pumila L.; пигменты зеленого листа; засухоустойчивость; оводненность

Для цитирования. Калмыкова, Е. В., Мельник, К. А., & Передриенко, А. И. (2025). Физиологические параметры формирования засухоустойчивости в процессе приспособления растений *Ulmus pumila* L. к неблагоприятным факторам среды в условиях Астраханской области. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 505-520. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1028

Original article

PHYSIOLOGICAL PARAMETERS FORMATION OF DROUGHT RESISTANCE IN THE PROCESS OF ADAPTATION OF PLANTS *ULMUS PUMILA* L. TO ADVERSE ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE CONDITIONS OF THE ASTRAKHAN REGION

E.V. Kalmykova, K.A. Melnik, A.I. Peredrienko

Abstract

Background. The studies were carried out in the Astrakhan region, where dust storms are common and there is a deficit of precipitation. Only a few species of trees and shrubs can grow in this region, one of which is *Ulmus pumila* L. The adaptation of this species largely depends on the ability to adapt to drought by regulating the internal water environment during the growing season in semi-desert conditions. When there is a lack of moisture in the soil, drought-resistant elm trees have more pronounced protective self-regulatory reactions.

Purpose. Assessment of physiological parameters of adaptation of *Ulmus pumila* L. to unfavorable environmental factors in the conditions of the Astrakhan region.

Materials and methods. The objects were two groups of plants: floodplain plantings and plantings of green umbrellas *Ulmus pumila* L. in the Kharabalinsky district of the Astrakhan region. The degree of drought resistance of *Ulmus pumila* L. was assessed by the state of water content of the leaves and the functioning of the plant pigment systems in the hot summer period.

Results. It was found that the highest indicators of water-holding capacity were observed in plantings of green umbrellas. The chlorophyll content in the leaves of *Ulmus pumila* L. varies on average from 31 to 30 mg/cm in two populations.

Conclusion. Prolonged drought and high average daily temperatures in the Astrakhan region worsened the indicators of pigments in the leaves, but the life processes of plants in two plantings were stable and no suppression of taxa was observed. *Ulmus pumila* L. has a high adaptation to small soils suitable for vegetation in the Astrakhan region.

Keywords: adaptation; Ulmus pumila L.; green leaf pigments; drought resistance; water content

For citation. Kalmykova, E. V., Melnik, K. A., & Peredrienko, A. I. (2025). Physiological parameters formation of drought resistance in the process of adaptation of plants *Ulmus pumila* L. to adverse environmental factors in the conditions of the Astrakhan region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 505-520. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1028

Введение

Опустынивание является серьезным и глобальным вопросом мирового уровня, который несёт за собой губительные последствия для видового разнообразия древесно-кустарниковой растительности. Суровый жаркий климат является одним из важнейших причин опустынивания [2-3; 11-12]. Практика защитного лесоразведения настоятельно требует изыскания путей и методов повышения биологической устойчивости лесных насаждений сухой степи [4; 6; 8; 20]. Значительный, теоретический и практический интерес среди засухоустойчивых растений представляют интродуцированные и адаптированные различные виды рода *Ulmus*. Одним из распространённых видов является *Ulmus pumila* L. [1; 5-6]. В этом регионе на позициях с тяжелыми лесорастительными условиями трудно подобрать другую древесную породу, превосходящую по устойчивости вяз или способную заменить его. Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о том, что вяз приземистый более устойчив

к засухе и засолению, чем берест, ясень зеленый, акация белая и другие породы [7; 14; 20].

Родина родового комплекса *Ulmus pumila* L. охватывает восточную часть Азии, северную часть Монголии, а также имеет северо-западную границу природного ареала в Восточном Казахстане. В России *U. pumila* используют в Забайкалье, среднем и нижнем Приамурье, Приморье, в качестве лесных защитных полос и живой изгороди. *Ulmus pumila L* представляет интерес для озеленения городов и поселков, особенно в районах с малоплодородными почвами с низкой лесистостью.

Засухоустойчивость растений – это один из приемов адаптивности в сухостепных условиях [9; 11; 13; 15-17]. Засухоустойчивые древесные виды растений рационально расходуют воду и минеральные - питательные вещества, это помогает стабилизировать и минимизировать негативный эффект от окружающей среды, а именно: изменять микроклимат, восстанавливать почвенный покров и создавать микроклимат под зелеными зонтами [1; 3-4; 10; 18-19].

Цель исследования – обосновать физиологические параметры формирования засухоустойчивости в процессе приспособления растений *Ulmus pumila* L. к неблагоприяным факторам среды в условиях Астраханской области.

Научная новизна заключается в том, что выявление адаптационных механизмов является важнейшим этапом комплексных исследований для определения перспективности вида Ulmus pumila в аридных условиях юга России. Такие исследования необходимы для последующего восстановления деградированных территорий и рационального использования Ulmus pumila.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на модельных деревьях на двух пробных площадках: пойменные насаждения и насаждения зеленых зонтов *Ulmus pumila* L., которые произрастали в Харабалинском районе Астраханской области.

Первая группа растений (пойменные насаждения *Ulmus pumila* L.) находится на участке, который расположен в прикаспийской провинции в зоне бурых полупустынных почв в Волго-Ахтубинской пойме.

Вторая группа растений (насаждения зеленых зонтов *Ulmus pumila* L.) расположена на территории участков пустынно-степного типа, где грунтовые воды не оказывают существенного влияния на режим почвенной влажности.

Данные насаждения *Ulmus pumila* L. находились на участках с различными водно-физическими и гранулометрическими свойствами почвы. Оба участка засоленные (от 14,3 до 51,1 мг/кг). Почвы очень бедные, так как органическое вещество не превышает 1,3 %, а важные питательные минеральные вещества (NPK) для растений в большом недостатке (таблица 1).

Таблица 1.

Почвенные свойства объектов исследования в условиях Харабалинского района Астраханской области

Наименование показателя	1 группа	2 группа
Хлорид (мг/кг)	51,1±7,7	14,3±2,2
Фосфор общий (%)	0,292±0,094	0,135±0,044
Азот общий (%)	0,12±0,07	0,03±0,06
Калий (мг/кг)	7,8±1,3	8,5±1,4
Органическое вещество (%)	1,3±0,26	0,204±0,041

Характерной особенностью климата является преобладание сильных ветров восточного и юго-восточного направления. Среднее количество дней в году с суховеями – 113. Относительная влажность воздуха подвержена колебаниям в течение вегетационного периода, в августе опускалась до 36 % (таблица 2).

По многолетним данным сумма осадков за год – 227 мм. Самый жаркий месяц – июль, так как среднемесячная температура составляет – 25,0 °С.

Таблица 2.

Климатические показатели Харабалинского района

Показатели		Месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура воздуха, °С	многолетние значения	-8,7	-7,6	-0,9	9,3	17,6	22,3	25,0	23,6	16,5	8,8	0,9	-6,1
	2023 г.	-5,8	-3,8	8,0	13,4	18,6	23,1	25,8	26,6	18,7	11,5	7,0	4,1
Осадки, мм	многолетние значения	17	15	22	15	18	23	22	17	17	20	20	21
	2023 г.	19	35	11	15	49	31	43	7	13	23	45	23
Относительная влажность воздуха, %	многолетние значения	84	83	78	58	52	49	50	52	53	70	80	85
	2023 г.	64	83	66	57	63	48	45	36	59	72	81	80

В 2023 году за весь период выпало всего 314 мм, что послужило хорошей влагозарядкой почвы и оптимальному развитию древесной растительности, за теплый период (апрель-сентябрь) выпало 158 мм осадков. В целом вегетационный период в 2023 году по температурному режиму оказался немного теплее среднемноголетних показателей на 2,5-3,1 °С.

Степень засухоустойчивости оценивалась по состоянию их водного режима и по визуальной оценке в период засухи. Обводненность листьев определялась путем высушивания растительных образцов до постоянной массы при температуре 105°С (в трехкратной повторности). Расчет общего количества воды (Р) в % от сырого веса навески проводился по формуле:

$$P=\frac{100(a-б)}{a},$$

где а - вес сырой навески, (г); б - вес сухой навески, (г)

Листья *Ulmus pumila* L. отбирались из средней части кроны южной стороны в трехкратной повторности в третьей декаде июля. У каждой повторности первоначальный вес составлял от 2,0 до 3,5 г (таблица 3).

Таблица 3.

Масса растительных образцов листьев *Ulmus pumila* L., г

Объект	Повторность	Вес сырой навески, г	Вес сухой навески, г
1 группа	I	3,48	1,52
	II	3,42	1,49
	III	2,25	0,92
2 группа	I	2,04	0,70
	II	2,04	0,77
	III	2,05	0,82

Пигменты в листьях вида *Ulmus pumila L* измерялись устройством DUALEX Scientific. Измерения проводили в середине апреля (20°С) и в конце июля (36°С).

Статистическая обработка результатов исследований проводилась методом дисперсионного анализа с использованием IBM и стандартного пакета MS Excel.

Результаты исследования

Проведенные исследования позволяют выявить разницу в водном режиме деревьев вяза, которые адаптировались к условиям произрастания с комплексом неблагоприятных факторов.

Оводненность листьев является в водном режиме важной характеристикой, определяющей засухоустойчивость растений. Данный показатель

варьировал от 54 до 66 %, в среднем общая оводненность насаждений зеленых зонтов была выше на 3 %, чем у растений в пойменных условиях (рисунок 1).

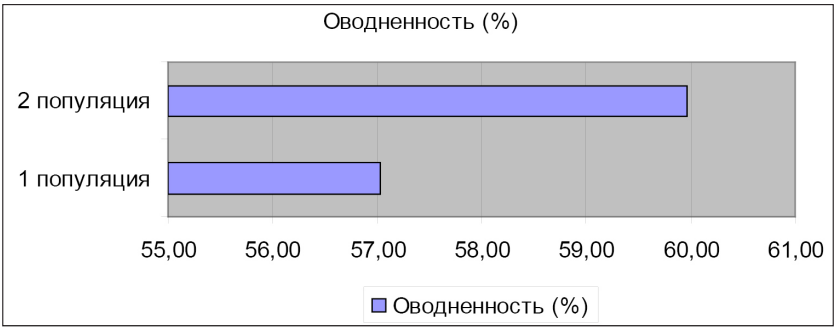


Рис. 1. Оводненность *Ulmus pumila* L. в засушливых условиях Астраханской области

Экспериментально доказано, что в период почвенной засухи в насаждениях зеленых зонтов складывается более благоприятный внутренний водный баланс, чему способствует высокая потенциальная поглотительная способность корней, экономное расходование воды листьями на испарение и способность тканей корней и побегов повышать сопротивление обезвоживанию.

Сохранение жизнедеятельности растений при недостаточном водоснабжении тесно связано с функционированием пигментных систем. Важным фактором, влияющим на пигментный комплекс фотосинтезирующего организма, является влагообеспеченность. Растения с высокой устойчивостью к засухе теряют меньше воды и у них более стабилен хлорофилл – белковолипоидный комплекс пластид.

При сравнительном анализе содержания фотосинтетических пигментов в листьях *Ulmus pumila* L. в течение вегетационного периода отмечены изменения. Показатели хлорофилла снизились во время засушливого периода в июле, разница составила 1,54 мкг/см^2. Содержание флавоноидов и антоцианов повысилось к третьей декаде июля до 2,07 и 0,39 мкг/см^2, соответственно (рисунок 2).

Проведенные исследования позволяют выявить разницу в содержании фотосинтетических пигментов между двумя группами растений.

Анализ экспериментальных данных показал, что показатель хлорофилла в листьях вяза в насаждениях зеленых зонтов выше (29,39 мкг/см^2), чем в пойменных насаждениях. Увеличение содержания хлорофиллов говорит

о более выраженной приспособительной реакции растений к недостатку влаги в почве и воздухе.

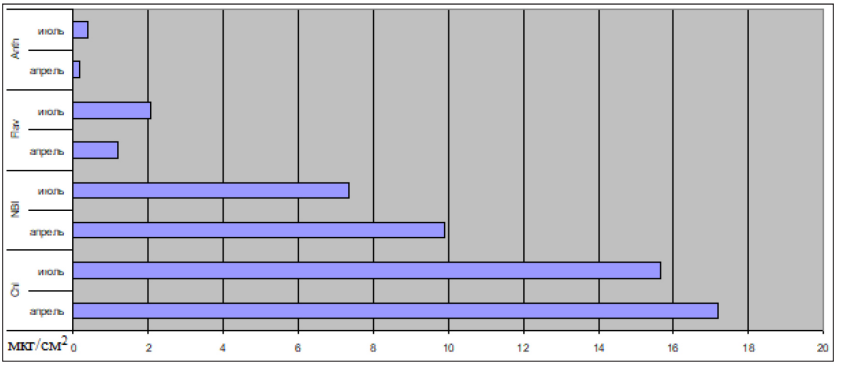


Рис. 2. Изменения содержания фотосинтетических пигментов в листьях *Ulmus pumila* L (хлорофилл (Chl), флавоноиды (Flan), антоцианы (Anth), NBI – индекс азотного баланса) в течение вегетационного периода 2023 г.

Количественное значение флавоноидов и антоцианов в листьях *Ulmus pumila* L у двух популяций колеблется незначительно от 0,94 до 1,95 мкг/см^2 (флавоноиды) и от 0,31 до 0,45 мкг/см^2 (антоцианы). В листьях растений, произрастающих в районе зеленых зонтов, отмечено низкое содержание флавоноидов 0,94 мкг/см^2, что можно связать с меньшим уровнем защитных функций, которые регулируются этим показателем.

Анализируя соотношение количества хлорофилла и флавоноидов, выраженное индексом азотного питания, отмечаем наибольший недостаток азота у растений в пойме (8,39 мкг/см^2).

Среднее значение индекса азотного баланса в насаждениях зеленых зонтов находится на уровне 31,58 мкг/см^2, что указывает на оптимальные условия фотосинтеза азотного питания, повышения динамики протекание процессов синтеза метаболитов, на активный рост и развитие растений (рисунок 3).

Изменения статистических параметров в содержании флавоноидов у двух популяций *Ulmus pumila* L имели незначительную разницу, это говорит о том, что в течение всего эксперимента данные таксоны не подвергались заражению болезнями и вредителями. Общий физиобиологический анализ двух популяций *Ulmus pumila* L показал, что популяция 1 находится в более благоприятных условиях, так как среднее количество содержанию хлорофилла выше 10 ($p<0,05$). Вторая популяция превосходит первую (5-6 у.е.) по среднему содержанию индекса азотного баланса, что указывает на

боле высокий уровень азотного питания, который влияет на активный рост и развитие растений (рисунок 4).

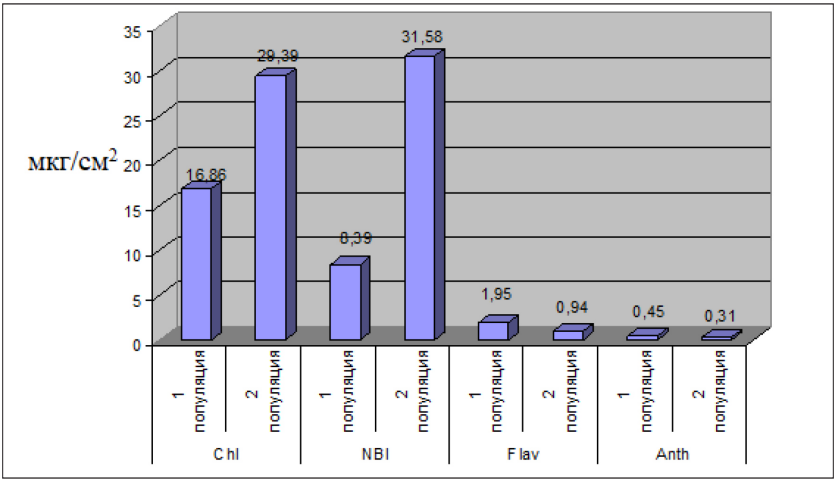


Рис. 3. Физиологическое состояние деревьев вяза приземистого в условиях Астраханской области

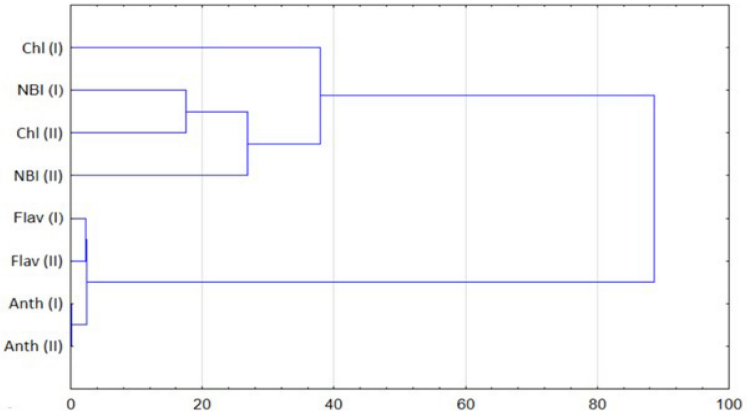


Рис. 4. Изменения статистических параметров в содержании пигментов зеленого листа *Ulmus pumila* L. в условиях Астраханской области

По измерениям пигментов в листьях хлорофилла (Chl), флавоноидов (Flan), антоцианов (Anth) установлено, что протекание жизненных процессов растений у двух популяций происходит стабильно и угнетения таксо-

нов не наблюдалось. Однако, к более засухоустойчивым можно отнести деревья, произрастающие в насаждениях зеленых зонтов Харабалинского района Астраханской области.

Следовательно, в результате приспособления засухоустойчивые деревья приобретают физиологические признаки, обеспечивающие существование в условия сухой степи и полупустыни.

Заключение

В результате исследования выявлено, при дефиците влаги в почве у засухоустойчивых деревьев вяза приземистого в большей степени отмечены защитные реакции саморегулирования. Результаты показали, что наивысшие показатели водоудерживающей способности были зафиксированы у второй популяции *Ulmus pumila* L, так как расположен таксон в более неблагоприятных условиях и вынужден проявлять более выраженные приспособительные реакции растений к недостатку влаги в почве и воздухе.

Экспериментально доказано, что в период почвенной засухи в насаждениях зеленых зонтов складывается более благоприятный внутренний водный баланс, чему способствует высокая потенциальная поглотительная способность корней, экономное расходование воды листьями на испарение и способность тканей корней и побегов повышать сопротивление обезвоживанию.

Установлено, что в начале вегетационного периода содержание хлорофилла высокое – в среднем до 18 мг/см^2, а в середине лета показатели падают на 9 %. При сравнительном анализе содержания фотосинтетических пигментов в листьях *Ulmus pumila* L. в течение вегетационного периода отмечены изменения. Содержание флавоноидов и антоцианов повышалось к третьей декаде июля до 2,07 и 0,39 мкг/см^2. Наименьшее колебание показателей пигментной системы зеленого листа в период вегетации зафиксированы у антоцианов.

В результате исследования выявлено, что *Ulmus pumila* L. является засухоустойчивым видом в Харабалинском районе, так как в засушливом климате имеет способность удерживать запас воды, при этом относительно благополучно произрастает в полупустыне. Данный вид адаптировался к малым пригодным почвам для растительности, хорошо переносит засоление почвы и высокую температуру.

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

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено по Государственному заданию №FNFE-2020-0004 (регистрационный номер 121041200195-4) ФНЦ агроэкологии РАН.

Список литературы

1. Иозус, А. П., Завьялов, А. А., & Крючков, С. Н. (2018). Биоэкологическая характеристика древесных видов в условиях выращивания в сухой. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, (10), 131-134. EDN: https://elibrary.ru/vlprlq
2. Кулик, К. Н., Манаенков, А. С., & Есмагулова, Б. Ж. (2021). Лесная мелиорация пастбищ засушливой зоны РФ и пути повышения её эффективности. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, 3(63), 30-40. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-03-02 EDN: https://elibrary.ru/xeaavz
3. Манаенков, А. С., & Рыбашлыкова, Л. П. (2020). Повышение эффективности восстановления растительного покрова в современных очагах дефляции на пастбищах Северо-Западного Прикаспия. *Аридные экосистемы*, 26(4), 116-126. EDN: https://elibrary.ru/kgyqkq
4. Манаенков, А. С., Рыбашлыкова, Л. П., Сивцева, С. Н., и др. (2023). Лесопастбищное освоение опустыненных земель Прикаспия. *Аридные экосистемы*, 29(1), 15-24. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-15-24 EDN: https://elibrary.ru/cznxb
5. Лепеско, В. В., & Рыбашлыкова, Л. П. (2021). Долговечность вяза приземистого Ulmus pumila L. в защитном лесоразведении на полупустынных землях Астраханского Заволжья. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*, 16(1), 77-85. https://doi.org/10.22363/2312-797X-2021-16-1-77-85 EDN: https://elibrary.ru/cravrd
6. Соломенцева, А. С., Крючков, С. Н., & Егоров, С. А. (2024). Влияние гуминового удобрения на рост и развитие гибридов Ulmus pumila L. *Природообустройство*, (1), 122-129. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-122-129 EDN: https://elibrary.ru/wpvnmp
7. Сурхаев, Г. А., & Сурхаева, Г. М. (2022). Эколого-биологические аспекты формирования пастбищезащитных насаждений вяза в фитомелиорации Западного Прикаспия. *Научно-агрономический журнал*, 4(119), 44-49. https://doi.org/10.34736/FNC.2022.119.4.007.44-49 EDN: https://elibrary.ru/wpgqjd
8. Agina, E. A., Mohamed, S. M., Ghatas, Y., & Shayeb, N. (2021). Influence of water regime treatments on growth of Rosmarinus Officinalis L. plant. *Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants*, 401-410. https://doi.org/10.21608/sjfop.2021.211809 EDN: https://elibrary.ru/xdules

9. Blum, A. (2018). Drought Resistance. *Plant Breeding for Stress Environments*, 43-77. https://doi.org/10.1201/9781351075718-3
10. Carley, D. S., Gragg, L. A., Taggart, M. J., et al. (2021). Estimation of water stress tolerance of six woody plant species. *Horticult Int J*, 5(2), 64, pp. 72. https://doi.org/10.15406/hij.2021.05.00205 EDN: https://elibrary.ru/ueadts
11. De Jonge, I. K., Olff, H., Mayemba, E. P., Berger, S. J., & Veldhuis, M. P. (2023). Understanding woody plant encroachment: a plant functional trait approach. *bioRxiv*, pp. 548581. https://doi.org/10.1101/2023.07.11.548581
12. Lepesko, V. V., Belyaev, A. I., Pleskachev, Yu. N., Pugacheva, A. M., Rybashlykova, L. P., & Fomin, S. D. (2019). Monitoring the state and ecological ameliorative effect of tree and shrub coulisse and row plantings on pastures in the arid conditions of the northern Caspian. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 341. https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012103 EDN: https://elibrary.ru/vbxilc
13. McCormick, E., Dralle, D. N., Khan, W. J., & Tune, A. K. (2021). Widespread woody plant use of water stored in bedrock. *Nature*, 597(7875), 225-229. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03761-3
14. Murdiyarso, D., Iska, L., Bayu, B., Hanggara, M., & Fitriani, S. (2021). Managing Water Regimes. In *Wetland Carbon and Environmental Management* (pp. 355-369). https://doi.org/10.1002/9781119639305.ch19
15. Sayed, J. K., Sayed, H. M., & Zahra, J. A. (2019). Drought resistance index to select drought resistant plant species based on leaf water potential measurements. *Journal of Arid Land*, pp. 623-635. https://doi.org/10.1007/s40333-019-0024-7
16. Simunic, I., Likso, T., Miseckaite, O., & Palma, O. L. (2019). Climate changes and soil water regime. In *Marine lake (Rogoznica) as a model for EcoSystem functioning in a changing environment*. https://doi.org/10.17707/AgricultForest.65.3.01 EDN: https://elibrary.ru/rglehh
17. Vlasenko, M., & Trubakova, K. (2019). Water regime Poaceae family species in the drought conditions. *Agrarian Bulletin*, pp. 2-8. https://doi.org/10.32417/article_5dcd861e230788.72509133
18. Wesche, K., Walther, D., von Wehrden, H., & Hensen, I. (2011). Trees in the desert: reproduction and genetic structure of fragmented Ulmus pumila forests in Mongolian drylands. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 206, 91-99. https://doi.org/10.1016/j.flora.2010.01.012 EDN: https://elibrary.ru/okwfi
19. Xiao, Yu., Ruo-X., Yuan, C., & Shen, Chao. (2021). Growth stability of four drought resistant plant species in different regions. *Journal of Applied Ecology*, pp. 4212-4222. https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202112.011

20. Yuan, Y., Ge, L., Yang, H., & Wei, Z. (2018). Meta-analysis of experimental warming effects on woody plant growth and photosynthesis in forests. *Journal of Forestry Research*, 29(3), 727-733. https://doi.org/10.1007/s11676-017-0499-z EDN: https://elibrary.ru/oxozom

References

1. Iozus, A. P., Zavyalov, A. A., & Kryuchkov, S. N. (2018). Bioecological characteristics of tree species under cultivation in dry conditions. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, *(10)*, 131-134. EDN: https://elibrary.ru/vlprlq
2. Kulik, K. N., Manayenkov, A. S., & Esmaulova, B. Zh. (2021). Forest reclamation of pastures in the arid zone of the Russian Federation and ways to improve its efficiency. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo Agrouniversitetskogo Kompleksa: Nauka i Vysshee Professionalnoe Obrazovanie*, *3(63)*, 30-40. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-03-02 EDN: https://elibrary.ru/xeaavz
3. Manayenkov, A. S., & Rybashlykova, L. P. (2020). Improving the efficiency of vegetation recovery in modern deflation foci on pastures of the Northwestern Caspian region. *Arid Ecosystems*, *26(4)*, 116-126. EDN: https://elibrary.ru/kgyqkq
4. Manayenkov, A. S., Rybashlykova, L. P., Sivtseva, S. N., et al. (2023). Silvopastoral development of desertified lands of the Caspian region. *Arid Ecosystems*, *29(1)*, 15-24. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-15-24 EDN: https://elibrary.ru/cznxb
5. Lepesko, V. V., & Rybashlykova, L. P. (2021). Longevity of Ulmus pumila L. in protective afforestation on semi-desert lands of the Astrakhan Trans-Volga region. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, *16(1)*, 77-85. https://doi.org/10.22363/2312-797X-2021-16-1-77-85 EDN: https://elibrary.ru/cravrd
6. Solomentseva, A. S., Kryuchkov, S. N., & Egorov, S. A. (2024). Effect of humic fertilizer on the growth and development of Ulmus pumila L. hybrids. *Land Management*, *(1)*, 122-129. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-122-129 EDN: https://elibrary.ru/wpvnmp
7. Surkhaev, G. A., & Surkhaeva, G. M. (2022). Ecological and biological aspects of pasture-protective plantations of elm in the phytoreclamation of the Western Caspian region. *Scientific and Agricultural Journal*, *4(119)*, 44-49. https://doi.org/10.34736/FNC.2022.119.4.007.44-49 EDN: https://elibrary.ru/wpgqjd
8. Agina, E. A., Mohamed, S. M., Ghatas, Y., & Shayeb, N. (2021). Influence of water regime treatments on growth of Rosmarinus Officinalis L. plant. *Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants*, 401-410. https://doi.org/10.21608/sjfop.2021.211809 EDN: https://elibrary.ru/xdules

9. Blum, A. (2018). Drought Resistance. *Plant Breeding for Stress Environments*, 43-77. https://doi.org/10.1201/9781351075718-3
10. Carley, D. S., Gragg, L. A., Taggart, M. J., et al. (2021). Estimation of water stress tolerance of six woody plant species. *Horticult Int J*, 5(2), 64, pp. 72. https://doi.org/10.15406/hij.2021.05.00205 EDN: https://elibrary.ru/ueadts
11. De Jonge, I. K., Olff, H., Mayemba, E. P., Berger, S. J., & Veldhuis, M. P. (2023). Understanding woody plant encroachment: a plant functional trait approach. *bioRxiv*, pp. 548581. https://doi.org/10.1101/2023.07.11.548581
12. Lepesko, V. V., Belyaev, A. I., Pleskachev, Yu. N., Pugacheva, A. M., Rybashlykova, L. P., & Fomin, S. D. (2019). Monitoring the state and ecological ameliorative effect of tree and shrub coulisse and row plantings on pastures in the arid conditions of the northern Caspian. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 341. https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012103 EDN: https://elibrary.ru/vbxilc
13. McCormick, E., Dralle, D. N., Khan, W. J., & Tune, A. K. (2021). Widespread woody plant use of water stored in bedrock. *Nature*, 597(7875), 225-229. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03761-3
14. Murdiyarso, D., Iska, L., Bayu, B., Hanggara, M., & Fitriani, S. (2021). Managing Water Regimes. In *Wetland Carbon and Environmental Management* (pp. 355-369). https://doi.org/10.1002/9781119639305.ch19
15. Sayed, J. K., Sayed, H. M., & Zahra, J. A. (2019). Drought resistance index to select drought resistant plant species based on leaf water potential measurements. *Journal of Arid Land*, pp. 623-635. https://doi.org/10.1007/s40333-019-0024-7
16. Simunic, I., Likso, T., Miseckaite, O., & Palma, O. L. (2019). Climate changes and soil water regime. In *Marine lake (Rogoznica) as a model for EcoSystem functioning in a changing environment*. https://doi.org/10.17707/AgricultForest.65.3.01 EDN: https://elibrary.ru/rglehh
17. Vlasenko, M., & Trubakova, K. (2019). Water regime Poaceae family species in the drought conditions. *Agrarian Bulletin*, pp. 2-8. https://doi.org/10.32417/article_5dcd861e230788.72509133
18. Wesche, K., Walther, D., von Wehrden, H., & Hensen, I. (2011). Trees in the desert: reproduction and genetic structure of fragmented Ulmus pumila forests in Mongolian drylands. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 206, 91-99. https://doi.org/10.1016/j.flora.2010.01.012 EDN: https://elibrary.ru/okwfi
19. Xiao, Yu., Ruo-X., Yuan, C., & Shen, Chao. (2021). Growth stability of four drought resistant plant species in different regions. *Journal of Applied Ecology*, pp. 4212-4222. https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202112.011

20. Yuan, Y., Ge, L., Yang, H., & Wei, Z. (2018). Meta-analysis of experimental warming effects on woody plant growth and photosynthesis in forests. *Journal of Forestry Research*, 29(3), 727-733. https://doi.org/10.1007/s11676-017-0499-z EDN: https://elibrary.ru/oxozom

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Калмыкова Елена Владимировна, главный научный сотрудник, зав. лабораторией биоэкологии древесных растений, д-р с.-х. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской Академии Наук» (ФНЦ агроэкологии РАН)
пр. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
kalmykova.elena-1111@yandex.ru

Мельник Кристина Андреевна, младший научный сотрудник, лаборатория биоэкологии древесных растений
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской Академии Наук» (ФНЦ агроэкологии РАН)
пр. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
melnik-k@vfanc.ru

Передриенко Анна Ивановна, аспирант, инженер-исследователь лаборатории биоэкологии древесных растений
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской Академии Наук» (ФНЦ агроэкологии РАН)
пр. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
peredrienko-a@vfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Kalmykova, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Bioecology of Woody Plants, Dr. agricultural Sciences, Associate Professor
Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences" (FSC Agroecology RAS)
97, Universitetskiy Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation
kalmykova.elena-1111@yandex.ru
SPIN-code: 1736-9543
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8530-9995
ResearcherID: AAY-3733-2020
Scopus Author ID: 57216752208

Kristina A. Melnik, Junior Researcher, Laboratory of Bioecology of Woody Plants
Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences" (FSC Agroecology RAS)
97, Universitetskiy Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation
melnik-k@vfanc.ru
SPIN-code: 1736-9543
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7103-6436
ResearcherID: AAE-5262-2021
Scopus Author ID: 57458285500

Anna I. Peredrienko, Graduate Student, Research Engineer at the Laboratory of Bioecology of Woody Plants
Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences" (FSC Agroecology RAS)
97, Universitetskiy Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation
peredrienko-a@vfanc.ru
SPIN-code: 7382-9521
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1717-1725

Поступила 15.04.2024
После рецензирования 09.06.2024
Принята 26.06.2024

Received 15.04.2024
Revised 09.06.2024
Accepted 26.06.2024

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

PUBLIC HEALTH AND PREVENTIVE MEDICINE

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1181 **EDN: DUKZPM**
УДК 614.2:616.9

Научные обзоры

ИНВАЛИДНОСТЬ ВЗРОСЛОГО НАСЕЛЕНИЯ ПО ПРИЧИНЕ ВИЧ-ИНФЕКЦИИ: РЕГИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

И.А. Джиоева, З.Б. Дзираева, З.Р. Аликова

Аннотация

Обоснование. Проблема ВИЧ-инфекции вследствие ВИЧ-инфекции имеет высокую медико-социальную значимость в связи с инвалидностью и смертностью населения. Актуальным является изучение региональных тенденций и особенностей инвалидности населения вследствие ВИЧ-инфекции.

Цель работы. Проанализировать региональные особенности инвалидности взрослого населения Республики Северная Осетия-Алания по причине ВИЧ-инфекции.

Материалы и методы. Проанализированы данные Федерального казенного учреждения «Главное бюро медико-социальной экспертизы по Республике Северная Осетия-Алания» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации (ф. № 7) за период с 2018–2022 гг. и акты освидетельствования впервые признанных инвалидами по ВИЧ-инфекции.

Результаты. Отмечается аналогичная с Российской Федерацией стабильная тенденция снижения в 2020-2022 гг. региональных показателей впервые признанных инвалидами. Снижение показателей первичной инвалидности в Республике Северная Осетия-Алания отражает общероссийские тенденции, связанные с снижением выявляемости заболевания в период пандемии COVID-19. Снижение показателей первичной инвалидности сопровождалось

утяжелением инвалидности и превалированием II группы инвалидности более чем в 2 раза, по сравнению с 2019 г. В возрастно-половой структуре инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции преобладают лица молодого возраста и мужчины. В порядке ранжирования определены три сельских муниципальных района, в которых уровень инвалидности коррелируется с уровнем заболеваемости вследствие ВИЧ-инфекции.

Заключение. Выявленные региональные особенности первичной инвалидности взрослого населения вследствие ВИЧ-инфекции позволяют спрогнозировать ее тенденции и пригодны для планирования мероприятий по ее снижению, в том числе проведению эффективной антиретровирусной терапии. Стратегически важным является вопрос сохранения здоровья людей молодого возраста.

Ключевые слова: ВИЧ-инфекция; взрослое население; инвалидность; группа инвалидности; показатели

Для цитирования. Джиоева, И. А., Дзираева, З. Б., & Аликова, З. Р. (2025). Инвалидность взрослого населения по причине ВИЧ-инфекции: региональный аспект. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 521-534. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1181

Scientific Reviews

DISABILITY OF THE ADULT POPULATION DUE TO HIV INFECTION: A REGIONAL ASPECT

Dzhioeva I.A., Z.B. Dziraeva, Z.R. Alikova

Abstract

Background. The problem of HIV infection due to HIV infection has a high medical and social significance due to disability and mortality of the population. The study of regional trends and peculiarities of disability of the population due to HIV infection is relevant.

Purpose. To analyze the regional peculiarities of disability of the adult population of the Republic of North Ossetia-Alania due to HIV infection.

Materials and methods. The data of the Federal state Institution "Main Bureau of Medical and Social Expertise for the Republic of North Ossetia-Alania" of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation (f. No. 7) for the period from 2018-2022 and certificates of examination of those first recognized as disabled due to HIV infection are analyzed.

Results. There is a stable downward trend similar to the Russian Federation in 2020-2022. Regional indicators of people with disabilities recognized for the first time. The decrease in primary disability rates in the Republic of North Ossetia-Alania reflects the all-Russian trends associated with a decrease in the detection of the disease during the COVID-19 pandemic. The decrease in the indicators of primary disability was accompanied by an aggravation of disability and the prevalence of disability group II by more than 2 times, compared with 2019. The age-sex structure of disability due to HIV infection is dominated young people and men. In order of ranking, three rural municipal districts have been identified in which the level of disability is correlated with the level of morbidity due to HIV infection.

Conclusion. The identified regional features of the primary disability of the adult population due to HIV infection make it possible to predict its trends and are suitable for planning measures to reduce it, including effective antiretroviral therapy. The issue of preserving the health of young people is strategically important.

Keywords: HIV infection; adult population; disability; disability group; indicators

For citation. Dzhioeva, I. A., Dziraeva, Z. B., & Alikova, Z. R. (2025). Disability of the adult population due to HIV infection: A regional aspect. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 521-534. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1181

Введение

ВИЧ-инфекция остается одной из основных проблем глобального общественного здравоохранения и является социально-значимым заболеванием [3; 4; 8]. В настоящее время ВИЧ-инфекция рассматривается как хроническое, медикаментозно управляемое заболевание. Несмотря на широкое применение современных профилактических программ и антиретровирусной терапии (АРТ), ежегодно выявляются новые случаи заражения ВИЧ-инфекции [6; 12]. В 2022 г. в мире насчитывалось около 39,0 миллионов человек, живущих с ВИЧ-инфекцией (ЛЖВ). Только за 2022 г. в Российской Федерации было зарегистрировано 55573 новых случая ВИЧ-инфекции, при этом заболеваемость в России уверенно снижается [9]. ВИЧ-инфекция – заболевание, сопровождающееся целым рядом социальных проблем. По данным ВОЗ вирус унес более 40 миллионов человеческих жизней. По данным ВОЗ, 1,3 млрд. человек во всем мире – 16% населения планеты – имеют ту или иную форму инвалидности [5; 11; 15]. В Российской Федерации в 2022 г. инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции составила 23187 человек и выросла по сравнению с 2018 г. в 1,3 раза

[7; 10; 14]. Установление инвалидности по ВИЧ-инфекции является важным механизмом социальной поддержки ЛЖВ, позволяющим улучшить качество жизни, минимизировать социальные последствия заболевания и обеспечить достойные условии для жизни [1; 2; 13; 14].

Цель исследования. Проанализировать и выявить региональные особенности инвалидности взрослого населения Республики Северная Осетия-Алания (РСО-Алания) вследствие ВИЧ-инфекции.

Материалы и методы

Проанализированы данные Федерального казенного учреждения «Главное бюро медико-социальной экспертизы по Республике Северная Осетия-Алания» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации (ф. № 7) за 2018–2022 гг., а также акты освидетельствования впервые признанных инвалидами вследствие ВИЧ-инфекции. Использованы данные территориального органа Федеральной службы государственной статистики по РСО-Алания. Рассчитан интенсивный показатель первичной инвалидности на 10 тыс. взрослого населения. Проанализирована возрастно-половая структура инвалидности с учетом группы инвалидности за пятилетний период.

Результаты

В РСО-Алания на конец 2022 г. общая численность инвалидов составила 54508 человек, т.е. каждый восьмой человек в республике (7,9% от всего населения) имеет группу инвалидности. При этом число лиц, впервые признанных инвалидами (ВПИ) по всем классам заболеваний, среди взрослого населения РСО-Алания в 2022 г. уменьшилось с 2974 человек в 2018г. и составило 2516 человек.

Уровень первичной инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции по РСО-Алания в 2018 г. (0,6 на 10 тыс. населения) был выше уровня по Северо-Кавказскому федеральному округу (СКФО) (0,3 на 10 тыс. населения) и на одном уровнем с показателем Российской Федерации (0,6 на 10 тыс. населения). В 2019 г. имеется значительное снижение (в 2 раза) показателя первичной инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции по РСО-Алания, который составил 0,3 на 10 тыс. населения. Вместе с тем отмечается рост данного показателя по Российской Федерации (до 0,7) и по СКФО (до 0,4 на 10.тыс. населения). Значительное снижение региональных показателей и их стабильность наряду с показателями впервые признанных инвалидами в Российской Федерации в 2020 -2022 гг. может быть связано

с снижением выявляемости заболевания в период пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 (рис. 1).

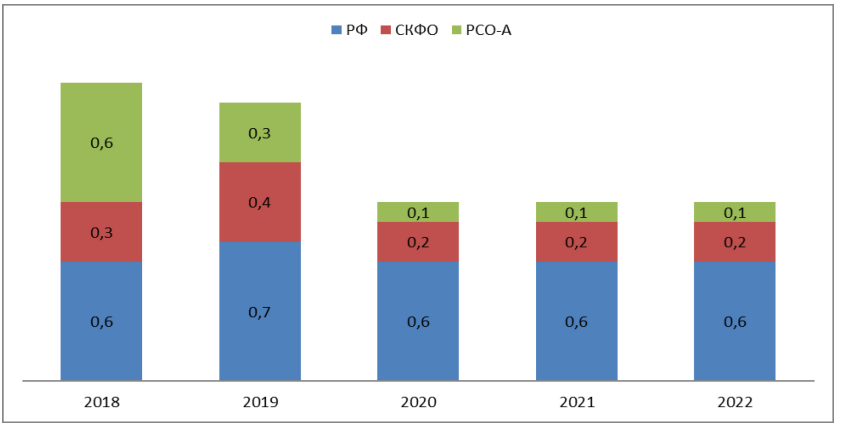


Рис. 1. Показатели первичной инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции в РСО-Алания, СКФО, Российской Федерации (на 10 тыс. взрослого населения старше 18 лет).

Существует несколько вероятных причин, по которым в 2018 году инвалидность вследствие ВИЧ-инфекции выше, чем в последующие годы. Первая - это изменение в нормативной базе. За последние годы внесены изменения в критерии и порядок установления инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции. И вторая причина - это развитие медицинских технологий. Совершенствование методов диагностики и лечения ВИЧ-инфекции повышает эффективность терапии, что приводит к меньшей выраженности ограничений жизнедеятельности у пациентов.

Анализ показателей инвалидности за 5 лет по причине ВИЧ-инфекции в РСО-Алания выявил стабильное их снижение. Наиболее высокий показатель инвалидности взрослого населения республики в 2021г. и 2022 г., составивший 1,1 и 1,2 на 10 тыс. взрослого населения соответственно. При этом показатель впервые признанных инвалидами снизился в 2022 г. по сравнению с 2018 г. на 83,3% (табл.1).

С учетом сложной эпидемиологической ситуации, связанной с распространением новой коронавирусной инфекции (COVID-19) в 2020 г. произошли изменения в работе: снизились целевые показатели в медико-психолого-социальном патронировании и консультировании ВИЧ+ и в определении группы инвалидности.

Таблица 1.

Инвалидность взрослого населения по причине ВИЧ-инфекции в РСО-Алания за 2018- 2022 гг. (абс., на 10 тыс. населения)

	Всего		Из них впервые	
	Абс. число	Показатель	Абс. число	Показатель
2018	71	1,0	31	0,6
2019	69	0,9	18	0,3
2020	57	0,8	3	0,1
2021	84	1,2	4	0,1
2022	78	1,1	6	0,1
Темп прироста/ убыли (%)		10,0		-83,3

Во исполнение постановления Правительства Российской Федерации от 09.04.2020 г. за № 467«О временном порядке признания лица инвалидом» (далее - Временный порядок), в целях предотвращения распространения новой коронавирусной инфекции в РФ и обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения РФ предусмотрено автоматическое продление группы инвалидности и категории «ребенок-инвалид» на срок 6 месяцев, тем гражданам, срок переосвидетельствования которых наступает в период с 1 марта 2020 г. по 1 октября 2020 г., далее с 2 октября 2020 г. по 1 марта 2021 г. Временный порядок предусматривал исключительно заочную форму освидетельствования, без личного участия граждан, проходящих медико-социальную экспертизу.

Анализ показателей распространенности первичной инвалидности в трех возрастных группах взрослого населения РСО-Алания в 2018-2022 гг. выявил относительную их стабильность среди лиц молодого и трудоспособного возраста и практически отсутствие инвалидности по причине ВИЧ-инфекции среди лиц старше трудоспособного возраста. Отмечаются различия показателя с ее превышением в средней возрастной группе трудоспособного возраста по сравнению с возрастной группой молодого возраста в 2019 г. до 0,9 и в 2022 г. до 0,2 на 10 тыс. населения. Только в 2019 г. регистрируется показатель распространенности ВИЧ-инфекции среди лиц старше трудоспособного возраста (0,1 на 10 тыс. соответствующего населения) (табл. 2).

Особенности распределения инвалидов в возрастной структуре инвалидности по ВИЧ-инфекции за пятилетний период указывают на преобладание лиц молодого возраста 18-44 лет над лицами трудоспособного и старше трудоспособного возраста. Доля лиц 18-44 лет в возрастной структуре впервые признанных инвалидами в 2018 г. была наибольшей за весь

исследуемый период и составила 77,4%, тогда как доля инвалидов трудоспособного возраста составила 22,6% и была наименьшей в течение пяти лет (табл. 2).

Таблица 2.

Показатели первичной инвалидности и доля инвалидов в структуре инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции с учетом возраста в РСО-Алания за 2018- 2022 гг. (абс. число, на 10 тыс. соответствующего населения, %)

	Всего	18-44 лет			Жен. 45-54 лет; Муж. 45-59 лет.			Жен. 55 лет и старше; Муж. 60 лет и старше.		
	Абс.	абс.	на 10 тыс.	%	абс.	на 10 тыс.	%	абс.	на 10 тыс.	%
2018	31	24	0,6	77,4	7	0,6	22,6	0	0,0	0,0
2019	18	10	0,3	55,6	6	0,6	33,3	2	0,1	11,1
2020	3	2	0,1	66,7	1	0,1	33,3	0	0,0	0,0
2021	4	2	0,1	50,0	2	0,1	50,0	0	0,0	0,0
2022	6	4	0,1	66,7	2	0,2	33,3	0	0,0	0,0

Данное распределение инвалидов в двух возрастных группах в 2018-2022 гг. было стабильным. Так доля инвалидов среди лиц молодого возраста 18-44 лет составила в 2022 г. 66,7%, а доля лиц трудоспособного возраста 45-54 лет (женщины) и 45-58 лет (мужчины) составила 33,3%. Все годы, кроме 2019 г., инвалиды среди лиц старше 55 лет (женщины) и старше 60 лет (мужчины) не регистрировались. В 2019 г. доля данной возрастной категории в структуре инвалидности взрослого населения РСО-Алания составила 11,1 % (табл.2). Таким образом, именно возрастной диапазон 18-44 лет является наиболее продуктивным и социально-активным, что делает вопрос сохранения здоровья данной группы стратегически важным.

Анализ первичной инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции по половому признаку выявил преобладание мужчин, особенно заметное в 2028 г., когда показатель у мужчин составил 0,8 на 10 тыс. взрослого населения, у женщин 0.4 на 10 тыс. взрослого населения (рис.2).

Исключением является 2019 год, когда показатель среди женщин и мужчин составил 0,3 на 10 тыс. населения. С 2020 г. наряду с снижением показателя первичной инвалидности в целом по республике, уровень первичной инвалидности у мужчин (0,08) заметно выше аналогичного показателя по сравнению с женщинами (0,03 на 10 тыс. взрослого населения). В 2021-2022 гг. инвалиды среди женщин отсутствуют (рис.2).

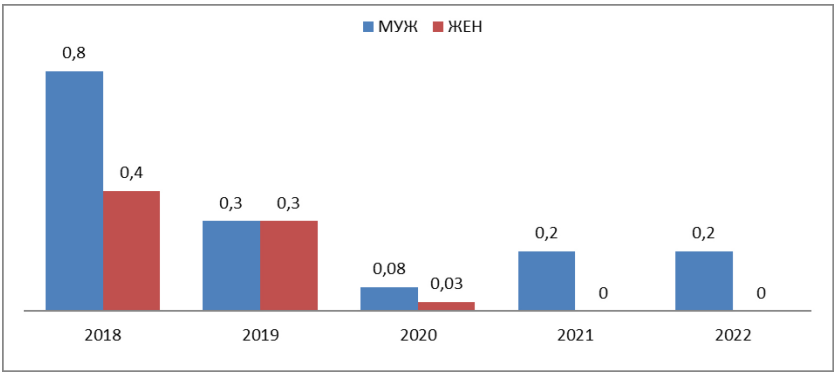


Рис. 2. Распределение инвалидности по причине ВИЧ-инфекции в РСО-Алания по полу за 2018-2022 гг. (на 10 тыс. взрослого населения)

В структуре инвалидности взрослого населения по тяжести состояния вследствие ВИЧ-инфекции в РСО-Алания преобладали лица с III группой инвалидности с удельным весом 67,7% в 2018 г. и 50,0% в 2019 г. В 2020 г. удельный вес инвалидов во всех трех группах в структуре инвалидности составил 33,3%.

Таблица 3.

Показатели первичной инвалидности взрослого населения и удельный вес групп инвалидности в структуре инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции в РСО-Алания в 2018-2022 гг. (абс. число, %, на 10 тыс. населения)

	Всего	I группа			II группа			III группа		
	абс.	абс.	%	на 10 тыс.	абс.	%	на 10 тыс.	абс.	%	на 10 тыс.
2018	31	2	6,5	0,0	8	25,8	0,1	21	67,7	0,4
2019	18	2	11,1	0,1	7	38,9	0,1	9	50,0	0,2
2020	3	1	33,3	0,0	1	33,3	0,0	1	33,3	0,0
2021	4	0	0,0	0,0	3	75,0	0,1	1	25,0	0,0
2022	6	0	0,0	0,0	4	66,7	0,1	2	33,3	0,0

В последующие 2021г. и 2022 г. отмечается значительное превалирование удельного веса II группы инвалидности инвалидности по сравнению с III группой в 3 и 2 раза соответственно. Удельный вес инвалидности по причине ВИЧ-инфекции в I группе был минимален и в 2021-2022 гг. равнялся нулю (табл. 3).

При сравнительном анализе показателей инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции по сельским муниципальным районам, выявлена неста-

бильная динамика. В 2018–2019 гг. наиболее высокий показатель инвалидности выявлен в Дигорском районе (3,1 и 4,7 на 10 тыс. населения), что может быть связано с высоким показателем заболеваемости в данном районе. В 2020-2021 гг. наиболее высокий показатель инвалидности отмечается в Алагирском районе (1,5 и 2,6 на 10 тыс. населения), а в 2022 г. первенство поделили между собой Правобережный и Пригородный районы (2,1 на 10 тыс. населения). Обращает на себя внимание тот факт, что за весь анализируемый период, самый низкий показатель инвалидности фиксируется в Моздокском районе (0,3 на 10 тыс. населения).

Заключение

Отмечается аналогичная с Российской Федерацией стабильная тенденция снижения в 2020-2022 гг. региональных показателей впервые признанных инвалидами. Снижение показателей первичной инвалидности в Республике Северная Осетия-Алания отражает общероссийские тенденции, связанные с снижением выявляемости заболеваения в период пандемии COVID-19.

Снижение показателей первичной инвалидности сопровождалось утяжелением инвалидности и превалированием II группы инвалидности более, чем в 2 раза, по сравнению с 2019 г. В возрастно-половой структуре инвалидности вследствие ВИЧ-инфекции преобладают лица молодого возраста 18-44 лет и мужчины. В порядке ранжирования определены три сельских муниципальных района, в которых уровень инвалидности коррелируется с уровнем заболеваемости вследствие ВИЧ-инфекции. Выявленные региональные особенности первичной инвалидности взрослого населения вследствие ВИЧ-инфекции позволяют спрогнозировать ее тенденции и пригодны для планирования мероприятий по ее снижению, в том числе проведению эффективной антиретровирусной терапии. Стратегически важным является вопрос сохранения здоровья людей молодого возраста.

Список литературы

1. Аглиуллина, С. Т. (2018). Современные стратегии профилактики ВИЧ-инфекции (обзор литературы). *Acta biomedica scientifica*, 3(1), 26-33. https://doi.org/10.29413/ABS.2018-3.1.4 EDN: https://elibrary.ru/ysmbti
2. Баринова, А. Н. (2017). Оценка эффективности программ комплексной профилактики ВИЧ-инфекции с точки зрения предотвращения потери лет, откорректированных на инвалидность. *Медико-социальная экспертиза и реабилитация*, 20(2), 95-99. https://doi.org/10.18821/1560-9537-2017-20-2-95-99 EDN: https://elibrary.ru/yuhnjl

3. Воропинова, О. А. (2020). Статистика социально значимых заболеваний. В *Статистический анализ социально-экономического развития федеральных округов Российской Федерации: опыт, реалии, перспективы* (с. 273-276).
4. Голоднова, С. О., Фельдблюм, И. В., & Юркова, Л. В. (2020). Факторы инфицирования и распространения ВИЧ среди лиц из групп социального риска. *Анализ риска здоровью*, (4), 130-136. https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.4.15 EDN: https://elibrary.ru/hfpqoi
5. Дымочка, М. А., Гришина, Л. П., & Волкова, З. М. (2017). Особенности динамики показателей инвалидности среди взрослого и детского населения Российской Федерации. *Медико-социальные проблемы инвалидности*, (3), 8-16.
6. Покровский, В. В., Юрин, О. Г., Кравченко, А. В., Беляева, В. В., Буравцова, Е. В., Деулина, М. О. и др. (2021). Рекомендации по лечению ВИЧ-инфекции и связанных с ней заболеваний, химиопрофилактике заражения ВИЧ. *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы*, 11(4), 104 с. https://doi.org/10.18565/epidem.2021.11.4.104-6 EDN: https://elibrary.ru/owuymu
7. Дзираева, З. Б., & Аликова, З. Р. (2023). Организация диспансерного наблюдения за детьми с ВИЧ-инфекцией в Республике Северная Осетия – Алания. В *Материалы VI Международной научно-практической конференции «Мировые исследования в области естественных и технических наук»* (с. 71-73). Ставрополь.
8. Покровский, В. В. (2016). Инфекция, вызываемая вирусом иммунодефицита человека, в России. *Терапевтический архив*, 88(11), 4-11. https://doi.org/10.17116/terarkh201688114-11 EDN: https://elibrary.ru/xeaxmh
9. Пузин, С. Н., Гречко, А. В., Пряников, И. В., Шургая, М. А., & Погосян, Г. Э. (2019). Медико-социальная реабилитация как основа преодоления ограничений жизнедеятельности граждан с нарушением здоровья и их социализации. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*, 1(3), 44-53. https://doi.org/10.36425/2658-6843-2019-2019-3-44-53 EDN: https://elibrary.ru/bqbcs
10. Пузин, С. Н., Шургая, М. А., Дмитриева, Н. В., Погосян, Г. Э., Лялина, И. В., Маммараева, А. М., Иванова, Т. А., & Идрисова, Л. С. (2019). Эпидемиология инвалидности взрослого населения в Российской Федерации. *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика*, 18(5), 14-23. https://doi.org/10.31631/2073-3046-2019-18-5-14-23 EDN: https://elibrary.ru/vhtfxi
11. Радзиховская, М. В., Москвичева, М. Г., & Брылина, Н. Ю. (2018). Глобальные тенденции в развитии распространения ВИЧ-инфекции. *Вестник совета молодых учёных и специалистов Челябинской области*, 2(2), 3-10.

12. Редько, А. Н., Лебедева, И. С., Лебедев, П. В., & Шведова, М. О. (2023). Аспекты социально-экономической значимости ВИЧ-инфекции. *Естественно-гуманитарные исследования*, (45), 187-193.
13. Степанова, Е. В., Леонова, О. Н., & Бузунова, С. А. (2022). Анализ установленной группы инвалидности у пациентов с ВИЧ-инфекцией. *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы*, 12(1), 46-52. https://doi.org/10.18565/epidem.2022.12.1.46-52 EDN: https://elibrary.ru/wljisa
14. Аликова, З. Р., Дзираева, З. Б., & Ведмеденко, Ф. В. (2024). Социологическая оценка уровня информированности населения по вопросам ВИЧ-инфекции в разных возрастных группах (на примере Республики Северная Осетия-Алания). *Медико-фармацевтический журнал "Пульс"*, 26(4), 105-112. https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2024-26-4-105-112 EDN: https://elibrary.ru/gzdyvv
15. Пузин, С. Н., Шургая, М. А., Меметов, С. С., и др. (2018). Инвалидность в XXI веке. Состояние проблемы медико-социальной реабилитации и абилитации инвалидов в современной России. *Медико-социальная экспертиза и реабилитация*, 21(1), 10-17. https://doi.org/10.18821/1560-9537-2018-21-1-10-17

References

1. Agliulina, S. T. (2018). Modern strategies for HIV prevention (literature review). *Acta biomedica scientifica*, *3(1)*, 26-33. https://doi.org/10.29413/ABS.2018-3.1.4 EDN: https://elibrary.ru/ysmbti
2. Barinova, A. N. (2017). Evaluation of the effectiveness of comprehensive HIV prevention programs in terms of preventing disability-adjusted life years loss. *Medical and Social Expertise and Rehabilitation*, *20(2)*, 95-99. https://doi.org/10.18821/1560-9537-2017-20-2-95-99 EDN: https://elibrary.ru/yuhnjl
3. Voropinova, O. A. (2020). Statistics of socially significant diseases. In *Statistical analysis of socio-economic development of the federal districts of the Russian Federation: experience, realities, prospects* (pp. 273-276).
4. Golodnova, S. O., Feldblum, I. V., & Yurkova, L. V. (2020). Factors of infection and spread of HIV among persons at social risk. *Health Risk Analysis*, *(4)*, 130-136. https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.4.15 EDN: https://elibrary.ru/hfpqoi
5. Dymochka, M. A., Grishina, L. P., & Volkova, Z. M. (2017). Features of the dynamics of disability indicators among adult and child populations of the Russian Federation. *Medical and Social Problems of Disability*, *(3)*, 8-16.
6. Pokrovsky, V. V., Yurin, O. G., Kravchenko, A. V., Belyaeva, V. V., Buravtsova, E. V., Deulina, M. O., et al. (2021). Recommendations for the treatment of HIV infection and associated diseases, chemoprophylaxis of HIV infection.

Epidemiology and Infectious Diseases. Current Issues, *11(4)*, 104 p. https://doi.org/10.18565/epidem.2021.11.4.104-6 EDN: https://elibrary.ru/owuymu

7. Dziraeva, Z. B., & Alikova, Z. R. (2023). Organization of dispensary monitoring of children with HIV infection in the Republic of North Ossetia-Alania. In *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference "World Research in Natural and Technical Sciences"* (pp. 71-73). Stavropol.
8. Pokrovsky, V. V. (2016). Human immunodeficiency virus infection in Russia. *Therapeutic Archive*, *88(11)*, 4-11. https://doi.org/10.17116/terarkh201688114-11 EDN: https://elibrary.ru/xeaxmh
9. Puzin, S. N., Grechko, A. V., Pryanikov, I. V., Shurgaya, M. A., & Pogosyan, G. E. (2019). Medical and social rehabilitation as the basis for overcoming the limitations of the vital activity of citizens with health problems and their socialization. *Physical and Rehabilitation Medicine, Medical Rehabilitation*, *1(3)*, 44-53. https://doi.org/10.36425/2658-6843-2019-2019-3-44-53 EDN: https://elibrary.ru/bqbcs
10. Puzin, S. N., Shurgaya, M. A., Dmitrieva, N. V., Pogosyan, G. E., Lialina, I. V., Mammaraeva, A. M., Ivanova, T. A., & Idrisova, L. S. (2019). Epidemiology of adult disability in the Russian Federation. *Epidemiology and Vaccination*, *18(5)*, 14-23. https://doi.org/10.31631/2073-3046-2019-18-5-14-23 EDN: https://elibrary.ru/vhtfxi
11. Radzikovskaya, M. V., Moskvicheva, M. G., & Brylina, N. Yu. (2018). Global trends in the development of HIV infection spread. *Bulletin of the Council of Young Scientists and Specialists of the Chelyabinsk Region*, *2(2)*, 3-10.
12. Redko, A. N., Lebedeva, I. S., Lebedev, P. V., & Shvedova, M. O. (2023). Aspects of the socio-economic significance of HIV infection. *Natural and Humanitarian Studies*, *(45)*, 187-193.
13. Stepanova, E. V., Leonova, O. N., & Buzunova, S. A. (2022). Analysis of the established disability group among patients with HIV infection. *Epidemiology and Infectious Diseases. Current Issues*, *12(1)*, 46-52. https://doi.org/10.18565/epidem.2022.12.1.46-52 EDN: https://elibrary.ru/wljisa
14. Alikova, Z. R., Dziraeva, Z. B., & Vedmedenko, F. V. (2024). Sociological assessment of the level of public awareness on HIV issues in different age groups (on the example of the Republic of North Ossetia-Alania). *Medical and Pharmaceutical Journal "Pulse"*, *26(4)*, 105-112. https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2024-26-4-105-112 EDN: https://elibrary.ru/gzdyvv
15. Puzin, S. N., Shurgaya, M. A., Memetov, S. S., et al. (2018). Disability in the XXI century. The state of the problem of medical and social rehabilitation and habilitation of disabled people in modern Russia. *Medical and Social Expertise*

and Rehabilitation, *21(1)*, 10-17. https://doi.org/10.18821/1560-9537-2018-21-1-10-17

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Джиоева Ирина Акимовна, кандидат медицинских наук, доцент
ФГБОУ ВО «Северо-Осетинская государственная медицинская академия» Минздрава России
ул. Пушкинская, 40, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, 362019, Российская Федерация
fuzza80@mail.ru

Дзираева Зарина Борисовна, аспирант
ФГБОУ ВО «Северо-Осетинская государственная медицинская академия» Минздрава России
ул. Пушкинская, 40, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, 362019, Российская Федерация
zarina.dziraeva@bk.ru

Аликова Зара Рамазановна, доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой
ФГБОУ ВО «Северо-Осетинская государственная медицинская академия» Минздрава России
ул. Пушкинская, 40, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, 362019, Российская Федерация
alikova_zr@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Irina A. Dzhioeva, Cand. Sc. (Medicine), Associate Professor
North Ossetian State Medical Academy
40, Pushkinskaya Str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, 362019, Russian Federation
fuzza80@mail.ru

Zarina B. Dziraeva, Postgraduate Student
North Ossetian State Medical Academy
40, Pushkinskaya Str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, 362019, Russian Federation
zarina.dziraeva@bk.ru

Zara R. Alikova, MD, Professor, Head of Department
North Ossetian State Medical Academy
40, Pushkinskaya Str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, 362019, Russian Federation
alikova_zr@mail.ru

Поступила 23.10.2024
После рецензирования 08.11.2024
Принята 15.11.2024

Received 23.10.2024
Revised 08.11.2024
Accepted 15.11.2024

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

INTERDISCIPLINARY RESEARCH

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1119 **EDN: DYMPRI**
UDC 519.2:519.85:332.362:631.153/631.15.017.1

CC BY NC ND

Original article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE DEVELOPMENT POTENTIAL OF PLANT PRODUCTION IN THE MUNICIPAL DISTRICT

Ya.M. Ivanyo, S.A. Petrova

Abstract

The work examines a comprehensive assessment of the variability of natural-climatic and production-economic characteristics to determine the potential for the development of crop production in a municipal district. This approach allows optimizing the resources of agricultural producers, improving forecasts, plans and increasing labor productivity. The goal of the work is to analyze the variability of climatic factors and production-economic characteristics to assess the potential for agricultural development in the municipal district. The scientific novelty of the study is associated with a comprehensive assessment of climatic and production-economic characteristics using mathematical modeling for forecasting and planning production for a long-term perspective, taking into account various conditions of the agricultural producer's activities. To achieve this goal, long-term changes in precipitation and temperatures for each month of the growing season were analyzed. The influence of these factors on crop yields was determined and the most significant of them were identified. Multi-level trends were highlighted in the series of bioproductivity of grain crops, vegetables and potatoes. Crop yield losses were determined. Based on a parametric programming problem with probabilistic characteristics, plans for obtaining volumes of the main types of agricultural products until 2026 were built. At the same time, predictive and stochastic values of crop yields were previously determined. Solutions to the extreme problem were obtained for average, favorable and unfavorable conditions of activity of agricultural producers.

The methodology for a comprehensive assessment of the potential for agricultural development is applicable to enterprises, municipal and agricultural landscape areas. In the article, the methodology was tested for the Irkutsk district.

Keywords: comprehensive assessment; meteorological factors; crop production; trend; yield; probability; optimization; municipal district

For citation. Ivanyo, Ya. M., & Petrova, S. A. (2025). Comprehensive assessment of the development potential of plant production in the municipal district. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 535-552. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1119

Научная статья

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА МУНИЦИПАЛЬНОГО РАЙОНА

Я.М. Иваньо, С.А. Петрова

Аннотация

В работе рассмотрена комплексная оценка изменчивости природно-климатических и производственно-экономических характеристик для определения потенциала развития растениеводства муниципального района. Такой подход позволяет оптимизировать ресурсы сельскохозяйственного товаропроизводителя, улучшая прогнозы, планы и увеличивая производительность труда. Целью работы является анализ изменчивости климатических факторов и производственно-экономических характеристик для оценки потенциала развития сельского хозяйства на территории муниципального района. Научная новизна исследования связана с комплексной оценкой климатических и производственно-экономических характеристик с помощью математического моделирования для прогнозирования и планирования продукции на многолетнюю перспективу с учетом различных условий деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя. Для достижения поставленной цели проанализированы многолетние изменения осадков и температур за каждый месяц вегетационного периода. Определено влияние этих факторов на урожайность сельскохозяйственных культур и выявлены наиболее значимые из них. Выделены многоуровневые тренды в рядах биопродуктивности зерновых культур, овощей и картофеля. Определены потери урожайности сельскохозяйственных культур. На основе задачи параметрического программирования

с вероятностными характеристиками построены планы получения объемов основных видов сельскохозяйственной продукции до 2026 года с предварительной прогностической и стохастической оценкой урожайности культур. Решения экстремальной задачи получены для усредненных, благоприятных и неблагоприятных условий деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей. Методика комплексной оценки потенциала развития сельского хозяйства применима для предприятий, муниципальных и агроландшафтных районов. В работе она апробирована для Иркутского района.

Ключевые слова: комплексная оценка; метеорологические факторы; растениеводство; тренд; урожайность; вероятность; оптимизация; муниципальный район

Для цитирования. Иваньо, Я. М., & Петрова, С. А. (2025). Комплексная оценка потенциала развития растениеводства муниципального района. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 535-552. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1119

Introduction

The economy of the country and regions, including agriculture, is being transformed at a rapid pace due to the development of new technologies and their widespread dissemination. The digital transformation of production processes plays a significant role in this evolution [8; 18; 29]. One of the key advantages of digital transformation is the possibility to collect and to process data related to agricultural production and to use this information in order to increase the efficiency of agriculture.

Much attention must be paid to climate change [14; 16; 21; 22; 25]. The factors of these changes influence the location of agricultural sectors [2], crop yields, volumes and quality of produced goods in different regions of the country and the world [5; 9; 10]. At the same time, variability in temperatures and precipitation in different eras can have different effects on crop yields [15].

As crop production plays an important role for national economy and food security [28; 29], ability to evaluate and to forecast impact of various factors (technological, geographical, climatic etc.) on productivity is crucial for efficient agricultural management.

Goal of the research. The purpose of the article is to consider the variability of climatic factors and production and economic characteristics to assess the possibility of agricultural development in the municipal district. To achieve the goal, the following tasks were solved:

- assessment of the variability of long-term air temperatures and precipitation during the growing season;

- the influence of meteorological factors on the productivity of agricultural crops;
- identification of significant multi-level trends in the bioproductivity of agricultural crops and assessment of probable yield losses;
- determination of optimal plans for the development of agricultural producers in the municipal district by increasing production volumes.

In essence, the solution to the set tasks is a method for a comprehensive assessment of the possibility of developing agriculture in a certain territory, for example, a municipal district.

Materials and methods

To determine the variability of meteorological factors, data on daily air temperatures and precipitation during the growing season in Irkutsk for 1996-2023 according to the Federal State Budgetary Institution "Irkutsk HMSD" were used.

When constructing the dependence of bioproductivity on meteorological factors, data on the yield of grain crops, potatoes, and vegetable crops of the Irkutskstat department for 1996-2023 in the Irkutsk district were involved. Statistical analysis of data and optimization of production volumes concerned all categories of farms.

To determine the characteristics of the parametric programming model, accounting reports of agricultural organizations were analyzed.

When constructing multi-level trends and multi-factor models, regression analysis was used. The determination of multi-level trends was based on the preliminary selection of local minima and maxima from time series [3].

Parametric programming methods under conditions of uncertainty were used to plan crop production volumes.

Results and discussion

Meteorological conditions greatly influence agricultural production even for stable producers. This was confirmed by the drought of 2015, which was observed in 14 municipal districts of the Irkutsk region. Agricultural organizations and peasant farms suffered significant losses in 2019, in which there was a catastrophic rain flood in the Iya River basin.

Research into the state of agriculture and modeling of its development must be carried out taking into account a complex of various factors: climatic, environmental, production and economic, social and others.

Let us consider the potential for the development of agriculture, or rather crop production, using the example of the Irkutsk district. To do this, it is proposed to analyze the variability of climate characteristics, assess trends in crop

yields, identify the impact of meteorological factors on bioproductivity, forecast crop yields in the medium term, calculate probable losses in crop yields, and build optimal plans for production volumes.

In the development of works [5; 6], time series of average air temperatures and daily precipitation amounts for each month of the warm season (May – August) and the entire period were analyzed. Fig. 1 and 2 show the trends of average air temperature T^0C and precipitation amounts for May–August Z. Based on the results obtained, the trends for these characteristics are insignificant. The coefficient of determination for the trend of average air temperatures was 0.067, and for precipitation amounts almost 0.

Similar conclusions can be made by identifying the trend for the series of heat and humidity characteristics for each month of the specified season. In other words, there are no trends in the series of precipitation amounts and air temperatures during the warm period of the year. At the same time, no significant first autocorrelation coefficients were found in the series of meteorological characteristics.

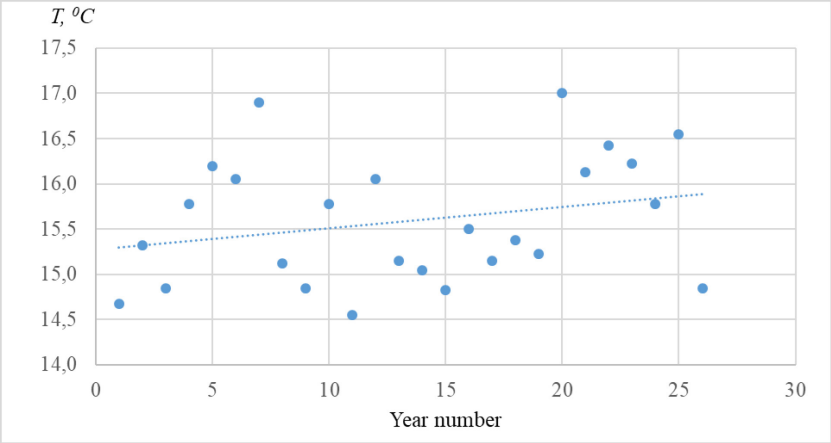


Figure 1. Changes in average air temperature
for May – August according to Irkutsk data for 1996–2021

When determining trends of three levels (middle, lower and upper), the method of identifying local minima and maxima [3], criteria for assessing the significance of regression expressions (coefficient of determination R^2, Fisher's F-criterion, its significance level a, Student's t-statistics), as well as different functions, of which the most acceptable are logistic, linear and power functions, were used (Table 1).

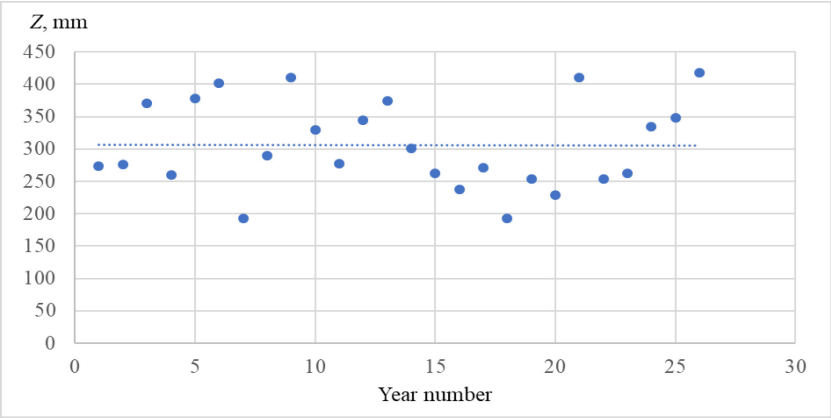


Figure 2. Changes in precipitation amounts for May – August according to data Irkutsk for 1996–2021

Table 1.

Multi-level trends in agricultural yields and their statistical estimates based on data from the Irkutsk district for 1997–2023

Series levels	Equation	R^2	Fisher's *F*-test	Significance level, *a*	Student's *t*-statistic	Number of events
Wheat yield						
Average (AL)	$y=24.6/(1+e^{-0.0693t})$	0.53	27.4	2.63×10^{-5}	-5.23	2
Lower (LL)	$y=17.6/(1+e^{-0.16t})$	0.64	11.0	0.0210	-3.32	
Upper (UL)	$y=24.6/(1+e^{-0.140t})$	0.64	10.9	0.0216	-3.29	
Oat yield						
Average (AL)	$y=20.4/(1+e^{-0.09t})$	0.54	27.2	0.0000311	-5.22	5
Lower (LL)	$y=16.8/(1+e^{-0.136t})$	0.53	6.8	0.0479	-2.61	
Upper (UL)	$y=20.4/(1+e^{-0.153t})$	0.63	11.9	0.0138	-3.44	
Cabbage yield						
Average (AL)	$y=7.54t+170.9$	0.61	35.9	0.00000413	5.99	5
Lower (LL)	$y=7.11t+147.0$	0.68	13.0	0.0113	3.60	
Upper (UL)	$y=9.42t+170.7$	0.69	11.35	0.0199	3.37	
Beet yield						
Average (AL)	$y=119.3t^{0.175}$	0.50	23.1	7.45×10^{-5}	4.81	5
Lower (LL)	$y=108.1t^{0.169}$	0.53	7.0	0.038	2.65	
Upper (UL)	$y=126.2t^{0.204}$	0.65	9.2	0.0288	3.03	

For the given expressions, the relative errors of each level are determined. In addition to the average values, the maximum values corresponding to rare events were calculated. The calculated errors of multilevel trend models are shown in Table 2. For all crop yields, approximately the same results were obtained. Oat yield has the greatest errors.

It should be noted that the yield series for barley and potatoes turned out to be random. For the first crop, the average value was 16.3 c/ha, the coefficients of variation and asymmetry were 0.085 and -0.32. Similar statistical parameters for potatoes correspond to 158.2 c/ha, 0.085 and 0.11.

The average values of local minima are equal to 12.6 and 149.7 c/ha for barley and potato yields. According to [7], the probability of losses associated with events, the number of which is given in the last column, can be defined as the difference between the actual values and the levels of the sequence of local minima corresponding to negative numbers. The smallest of them represent the most significant losses Δymin. Losses can also be considered in comparison with the trend of the entire series Δyc, which characterizes the average conditions of activity of an agricultural producer (Table 3). The calculated maximum losses correspond to the probability p_{min}. Grain yields obtained in the dry year of 2015 were rare.

Table 2.

Relative errors of multi-level trend models shown in table 1

Culture	Relative average error of the model, %			Relative maximum error of the model, %	
	AL	LL	UL	UL	LL
Wheat	9.5	7.4	9.3	17.8	51.3
Oat	15.2	11.1	14.0	31.9	79.4
Cabbage	12	9.2	7.0	18.1	33.2
Beet	11.5	6.4	7.4	19.3	24.2

Table 3.

Probabilistic assessment of agricultural yield losses crops according to data from the Irkutsk district for 1997–2023

Culture	p_{min}	Year	y_{min}, c/ha	Year	y_{mim}, c/ha	Δy_{min}, c/ha	Δy_c, c/ha
Wheat	0.00872	2015	11.1	2001	10.7	-4.4	-8.3
Oat	0.0138	2015	8.8	2003	7.9	-6.8	-8.9
Cabbage	0.0165	2013	201.1	1998	180.2	-66.7	-98.1
Beet	0.0213	2011	137.3	1998	114.9	-33.2	-54.5
Barley	0.0131	2015	6.7	2015	6.7	-5.9	-9.6
Potato	0.0428	1998	135.4	1998	135.4	-14.3	-22.8

Let us analyze the influence of air temperatures and precipitation amounts on the yield of grain crops. Many authors, in search of significant factors affecting crop yield, propose different options for obtaining a significant factor model [4; 13; 19; 20].

In addition to this, attention should be paid to the technological and agroecological aspects of harvesting [12, 17]. The results of correlation analysis show that meteorological factors have the greatest influence on wheat yield. Moreover, these factors manifest themselves best in May, at the initial stage of vegetation. This confirms the conclusions presented in the work [6]. Of the possible options, two are highlighted:

$$y_t = a_0 + a_1 T_t + a_2 Z_t \ (t \in S) \quad (1)$$

$$y_t = a_0 + a_1 T_t + a_2 t, \quad (2)$$

where a_0, a_1, a_2 are the free term and coefficients of expressions; T, Z are average air temperature and total precipitation for May; S is the number of years.

The coefficient of determination of the first expression is 0.43, which is lower than the required value of 0.50. However, it is necessary to keep in mind the significant positive relationship between precipitation ($R = 0.41$) and wheat yield, as well as the negative significant relationship between air temperature ($R = -0.58$) and the outcome variable.

As for the second dependence, in which the factors are air temperature and time, it is significant. The determination coefficient is 0.53, Fisher's F-criterion is 12.2 with a significance level of 0.00027, and Student's t-statistics correspond to -2.8 and 3.0.

The identified properties of the characteristics are applicable to optimize the production volumes for planning. Time series characteristics described by significant multi-level trends can be forecasted. Stochastic characteristics are estimated by probabilities. This applies to events that affect the loss of agricultural products. Hence, to build a model for optimizing production of products with a criterion in the form of maximum revenue, a parametric programming problem with probabilistic characteristics is used [1]. In addition, such tasks take into account expert assessments [23; 24] and risks [26]. Table 4 shows optimal solutions to the parametric programming problem with probabilistic values of barley and potato yields.

In this problem, the probability p of the average value of the potato yield series is 0.505, and the probabilities of the average of local minima and maximums correspond to 0.267 and 0.250. For barley yield, similar probabilities are 0.477, 0.174 and 0.236.

According to the results obtained for the average operating conditions of an agricultural commodity producer, which correspond to trends in agricultural

yields of complete time series and average sample values, revenue from the production of the agricultural crops in question can increase from 1.710 to 1.822 million rubles for 2024 – 2026. An increase in revenue for this period is achievable by 6.6 %, and production volumes by 6.1 %. For unfavorable conditions, production growth rates are slightly lower. Revenue could increase by almost 6.0 %, and production volumes by 6.4 %. At the same time, losses in comparison with average values amount annually to about 8.0 % in monetary terms and 6.6 % in volume. Favorable developments make it possible to obtain an additional annual increase of slightly more than 8.5 % of production and increase revenue by almost 8.9 % in comparison with the values obtained under average conditions.

Table 4.

Optimal solutions to the parametric programming problem with probabilistic characteristics according to data from the Irkutsk district for 1997–2023

Year	Characteristics	Wheat, x_1	Barley, x_2	Oats, x_3	Potatoes, x_4	Cabbage, x_5	Beetroot, x_6	Objective function, million rubles.
Average level								
2024	Volume, t	7938.7	3510.5	2891.3	57268.7	9330.5	2848.3	1 709.72
	Yield forecast, t/ha	2.15	1.82	1.92	15.59	38.22	21.4	
2025	Volume, t	8172.8	3580,7	2993.5	58414.1	9989.2	3152.2	1 764.77
	Yield forecast, t/ha	2.17	1.82	1.93	15.59	38.97	21.53	
2026	Volume, t	8413.0	3652.3	3099.3	59582.4	10693.2	3488.4	1 822.45
	Yield forecast, t/ha	2.19	1.82	1.94	15.59	39.73	21.66	
Lower level								
2024	Volume, t	6424.8	2430.3	2469.6	54991.2	8446.7	2520.9	1598.48
	Yield forecast, t/ha	1.74	1.26	1.64	14.97	34.60	18.9	
2025	Volume, t	6553.3	2478.9	2543.7	56091.0	9051.1	2789.1	1648.22
	Yield forecast, t/ha	1.74	1.26	1.64	14.97	35.31	19.05	
2026	Volume, t	6722.8	2528.5	2636.0	57212.9	9694.7	3085.7	1701.03
	Yield forecast, t/ha	1.75	1.26	1.65	14.97	36.02	19.16	
Upper level								
2024	Volume, t	8898.7	3684.0	3026.8	61383.0	10607.2	3311.5	1860.64
	Yield forecast, t/ha	2.41	1.91	2.01	16.71	43.45	24.88	
2025	Volume, t	9114.3	3757.7	3133.1	62610.6	11381.1	3669.0	1919.35
	Yield forecast, t/ha	2.42	1.91	2.02	16.71	44.4	25.06	
2026	Volume, t	9296.6	3832.9	3227.1	63862.9	12203.2	4063.3	1984.86
	Yield forecast, t/ha	2.42	1.91	2.02	16.71	45.34	25.23	

The results obtained allow us to conclude that the Irkutsk district has high potential for agricultural development. However, it is necessary to take into account the likely yield losses due to the frequent occurrence of extreme events, among which drought stands out.

It is obvious that each category of agricultural producers has different development dynamics [26]. In particular, peasant (farm) enterprises in a number of areas of production are developing somewhat faster than agricultural organizations.

Therefore, in addition to analyzing and assessing the potential of all categories of farms, it is necessary to consider the characteristics of the activities of different commodity producers.

Particular attention should be paid to crisis phenomena that have a significant impact on the development of agriculture [11].

Therefore, planning the activities of agricultural producers in favorable, average and unfavorable conditions must be supplemented by an assessment of the situation with unfavorable rare events that can significantly slow down the development process [27]. Moreover, this is not so much about prediction as about the readiness of the producer to overcome crisis phenomena.

Conclusion

A comprehensive study of the state and development potential of agricultural producers was carried out using the example of the Irkutsk district. The variability of air temperatures and precipitation amounts by month of the warm season over a long-term period was determined. The absence of trends in the series of meteorological characteristics in the 21st century is shown. A significant relationship between wheat yields and average air temperatures and precipitation amounts for May was identified. A significant factor dependence of wheat bioproductivity on average air temperatures for May and time was constructed. Multilevel trends for the yield series of wheat, oats, cabbage and beets were identified. Probability distribution laws for the bioproductivity of potatoes and barley were constructed. The problem of parametric programming with probabilistic characteristics with the definition of optimal plans for production volumes of the main grain and vegetable crops was solved. This made it possible to assess the potential for crop production development in the Irkutsk district.

Sponsorship information. This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-21-00502.

References

1. Barsukova, M. N., & Ivanyo, Ya. M. (2017). Applications of parametric programming for solving optimization problems of food production. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, *21(4)*, 57-66. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-57-66 EDN: https://elibrary.ru/yljjgf
2. Svetlov, N. M., Sipts, S. O., Romanenko, I. A., & Evdokimova, N. E. (2019). Impact of climate change on the location of agricultural industries in Russia. *Problems of Forecasting*, *(4)*, 59-74. https://doi.org/10.1134/S1075700719040154 EDN: https://elibrary.ru/ztsibe
3. Druzhinin, I. P., Smaha, V. R., & Shevny, A. N. (1991). *Dynamics of long-term fluctuations in river runoff*. Moscow: Nauka. 176 p.
4. Evdokimov, M. G., Yusov, V. S., & Pakhotina, I. V. (2020). Dependence of yield and quality of durum spring wheat on meteorological factors in the southern forest-steppe of Western Siberia. *Grain Farming of Russia*, *5(71)*, 26-31. https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-71-5-26-31 EDN: https://elibrary.ru/owkiuo
5. Ivanyo, Ya. M. (2009). Variability of climatic characteristics of Eastern Siberia and agricultural production. In *Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 31-38). Irkutsk: NC RNH VSNRC RAMS.
6. Ivanyo, Ya. M., & Stolopova, Yu. V. (2019). Climate variability and agrometeorological conditions of Pre-Baikalia: experimental studies and modeling of grain crop yields. *Meteorology and Hydrology*, *(10)*, 117-124.
7. Ivanyo, Ya. M., & Petrova, S. A. (2022). On one algorithm for detecting anomalous levels of a time series for risk assessment. *Current Issues of Agricultural Science*, *(42)*, 48-57.
8. Sanzhina, O. P., Itigilova, E. Yu., Vanchikova, E. N., et al. (2022). Study of approaches to assessing the factors of digital transformation of agriculture. *Bulletin of Kazan State Agrarian University*, *17(3)*, 163-169. https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-167-173 EDN: https://elibrary.ru/xcarle
9. Kolyada, V. V. (2022). Impact of climate trends on the dynamics of grain crop yields in Minsk and Mogilev regions. *Nature Management*, *(1)*, 36-44. https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-36-44 EDN: https://elibrary.ru/nnxtim
10. Kundyus, V. A., Perova, T. N., & Galkin, D. G. (2022). Study of the impact of climate change on the efficiency of agriculture in the region. *Economics of Agriculture of Russia*, *(3)*, 27-31. https://doi.org/10.32651/223-27 EDN: https://elibrary.ru/dxmmvw
11. Ovcharov, A. O., & Terekhov, A. M. (2022). Impact of economic crises on the development of agriculture: theoretical approaches and multifactorial analy-

sis. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*, *15(3)*, 129-140. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_129 EDN: https://elibrary.ru/almgws

12. Dmitriev, N. N., Solodun, V. I., Sultanov, F. S., Zaitsev, A. M., et al. (2018). *Features of agricultural crop cultivation technologies taking into account the moisture supply of arable land in the Irkutsk region: scientific and practical recommendations*. Irkutsk. 62 p.
13. Otambekova, M. G., Solikhov, B. T., Khusenov, B. Yu., & Muminjanov, Kh. A. (2020). Limiting factors and prospects for sustainable yield increase of wheat in Tajikistan. *Bulletin of Kazan State Agrarian University*, *15(3)*, 31-36. https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-31-36 EDN: https://elibrary.ru/lnojnr
14. Khan, V. M., Vilfand, R. M., Tishchenko, V. A., Emelina, S. V., et al. (2023). Assessment of temperature regime changes in Northern Eurasia over the next five years based on the RAS Earth System Model forecasts and their possible consequences for agriculture. *Meteorology and Hydrology*, *(9)*, 14-28. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-14-28 EDN: https://elibrary.ru/fdioum
15. Pavlova, V. N., & Karachenkova, A. A. (2023). Changes in agroclimatic resources of grain-producing regions of Russia and grain crop productivity in the new climate period of 1991-2020. *Meteorology and Hydrology*, *(9)*, 29-42. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-29-42 EDN: https://elibrary.ru/epvmpc
16. Perevedentsev, Yu. P., & Vasilyev, A. A. (2023). Climate change and its impact on agriculture. *Meteorology and Hydrology*, *(9)*, 5-13. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-5-13 EDN: https://elibrary.ru/ingeqc
17. Solodun, V. I., & Lugovnina, V. V. (2023). Agroecological aspects of the formation of arable land use structure in the Irkutsk region. *Geography and Natural Resources*, *44(3)*, 111-116. https://doi.org/10.15372/GIPR20230311 EDN: https://elibrary.ru/jtmtas
18. Sharipov, Sh. I., Mutuyev, Ch. M., & Kurbanov, Z. M. (2019). Digital transformation of agriculture: trends and ways of stimulation. *Achievements of Science and Technology of Agroindustrial Complex*, *33(11)*, 88-90. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11119 EDN: https://elibrary.ru/glekba
19. Shpanev, A. M., & Smyk, V. V. (2022). Influence of abiotic and anthropogenic factors on spring rapeseed yield formation in the North-West of the Russian Federation. *Agrarian Science of Euro-North-East*, *23(3)*, 351-359. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.351-359 EDN: https://elibrary.ru/xxzcov
20. Yaromenko, N. N., Kulak, A. A., & Ovsyenko, A. A. (2020). Econometric analysis of factors affecting grain yield (on the example of agricultural organizations of the central zone of the Krasnodar Territory). *Natural and Humanitarian Studies*, *30(4)*, 269-274. https://doi.org/10.24411/2309-4788-2020-10428 EDN: https://elibrary.ru/liswuu

21. Zakrutkin, V. E., Ryshkov, M. M., Shishkina, D. Yu., & Tsvylev, E. M. (2002). Agricultural ecosystems of extreme natural conditions, their economic capacity and the prospects of stable functioning. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, (3), 69-78. EDN: https://elibrary.ru/mpmkcd
22. Rogatnev, Y. M., Dolmatova, O. N., Aleschenko, V. V. et al. (2018). Evaluation of conditions for effective agricultural land-use as a basis for sustainable development of plant-growing production in the Omsk Region. *Ecology, Environment and Conservation*, 24(4), 1546-1554. EDN: https://elibrary.ru/auhtlm
23. Ivanyo, Ya. M., Asalkhanov, P. G., & Bendik, N. V. (2019). Management of the agro-industrial enterprise: optimization uncertainty expert assessments. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019*. P. 8934788.
24. Ivanyo, Ya. M., & Petrova, S. A. (2019). Optimization models of food processing wild-growing products with expert assessments. *Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security (IWCI 2019)*. Proceedings of the VIth International Workshop, pp. 108-113.
25. Ivanyo, Ya. M., Petrova, S. A., & Kovaleva, E. A. (2022). Ecological-Mathematical Modeling in Planning Production of Agricultural Products in Conditions of Risks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 022083. https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022083 EDN: https://elibrary.ru/guydcd
26. Kotliarov, I. D. (2022). Heterogeneity of stakeholders as an obstacle to the development of agricultural cooperatives in Russia. *Russian Peasant Studies*, 7(4), 20-32. https://doi.org/10.22394/2500-1809-2022-7-4-20-32 EDN: https://elibrary.ru/ljkeen
27. Ivanyo, Ya. M., Petrova, S. A., Polkovskaya, M. N., & Fedurina, N. I. (2018). Modeling of the production of agrarian products under the conditions of influence of droughts, rainfall and their combinations. *Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security*. Proceedings of the Vth International workshop, pp. 78-84. https://doi.org/10.2991/iwci-18.2018.14 EDN: https://elibrary.ru/idrnl
28. Plotnikov, V., Nikitin, Y., Maramygin, M., & Ilyasov, R. (2021). National food security under institutional challenges (Russian experience). *International Journal of Sociology and Social Policy*, 41(1-2), 139-153. https://doi.org/10.1108/IJSSP-03-2020-0074 EDN: https://elibrary.ru/ffrhyz
29. Bakharev, V. V., Mityashin, G. Yu., Stelmashonok, E. V. et al. (2023). Trends of evolution of food security: digital transformation, social entrepreneurship and human dignity. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(2), 363-391. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-363-391 EDN: https://elibrary.ru/kbwsda

Список литературы

1. Барсукова, М. Н., & Иваньо, Я. М. (2017). Приложения параметрического программирования для решения задач оптимизации получения продовольственной продукции. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 21(4), 57-66. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-57-66 EDN: https://elibrary.ru/yljjgf
2. Светлов, Н. М., Сиптиц, С. О., Романенко, И. А., & Евдокимова, Н. Е. (2019). Влияние изменения климата на размещение отраслей сельского хозяйства России. *Проблемы прогнозирования*, (4), 59-74. https://doi.org/10.1134/S1075700719040154 EDN: https://elibrary.ru/ztsibe
3. Дружинин, И. П., Смага, В. Р., & Шевнин, А. Н. (1991). *Динамика многолетних колебаний речного стока*. Москва: Наука, 176 с.
4. Евдокимов, М. Г., Юсов, В. С., & Пахотина, И. В. (2020). Зависимость урожайности и качества зерна твердой яровой пшеницы от метеорологических факторов в южной лесостепи Западной Сибири. *Зерновое хозяйство России*, 5(71), 26-31. https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-71-5-26-31 EDN: https://elibrary.ru/owkiuo
5. Иваньо, Я. М. (2009). Изменчивость климатических характеристик Восточной Сибири и аграрное производство. В *Климат, экология, сельское хозяйство Евразии*: Материалы международной научно-практической конференции (с. 31-38). Иркутск: НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН
6. Иваньо, Я. М., & Столопова, Ю. В. (2019). Климатическая изменчивость и агрометеорологические условия Предбайкалья: экспериментальные исследования и моделирование урожайности зерновых культур. *Метеорология и гидрология*, (10), 117-124.
7. Иваньо, Я. М., & Петрова, С. А. (2022). Об одном алгоритме выделения аномальных уровней временного ряда для оценки рисков. *Актуальные вопросы аграрной науки*, (42), 48-57.
8. Санжина, О. П., Итыгилова, Е. Ю., Ванчикова, Е. Н. и др. (2022). Исследование подходов к оценке факторов цифровой трансформации сельского хозяйства. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*, 17(3), 163-169. https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-167-173 EDN: https://elibrary.ru/xcarle
9. Коляда, В. В. (2022). Влияние климатических трендов на динамику урожайности зерновых культур в Минской и Могилёвской областях. *Природопользование*, (1), 36-44. https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-36-44 EDN: https://elibrary.ru/nnxtim
10. Кундиус, В. А., Перова, Т. Н., & Галкин, Д. Г. (2022). Исследование воздействия изменений климата на эффективность сельского хозяйства в

регионе. *Экономика сельского хозяйства России*, (3), 27-31. https://doi.org/10.32651/223-27 EDN: https://elibrary.ru/dxmmvw

11. Овчаров, А. О., & Терехов, А. М. (2022). Влияние экономических кризисов на развитие сельского хозяйства: теоретические подходы и многофакторный анализ. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 15(3), 129-140. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_129 EDN: https://elibrary.ru/almgws
12. Дмитриев, Н. Н., Солодун, В. И., Султанов, Ф. С., Зайцев, А. М. и др. (2018). *Особенности технологий возделывания сельскохозяйственных культур с учетом влагообеспеченности пашни в Иркутской области: научно-практические рекомендации*. Иркутск, 62 с.
13. Отамбекова, М. Г., Солихов, Б. Т., Хусенов, Б. Ю., & Муминджанов, Х. А. (2020). Ограничивающие факторы и перспективы устойчивого повышения урожайности пшеницы в Таджикистане. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*, 15(3), 31-36. https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-31-36 EDN: https://elibrary.ru/lnojnr
14. Хан, В. М., Вильфанд, Р. М., Тищенко, В. А., Емелина, С. В. и др. (2023). Оценка изменений температурного режима в Северной Евразии на предстоящее пятилетие по прогнозам модели земной системы ИВМ РАН и их возможных последствий для сельского хозяйства. *Метеорология и гидрология*, (9), 14-28. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-14-28 EDN: https://elibrary.ru/fdioum
15. Павлова, В. Н., & Караченкова, А. А. (2023). Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991-2020 гг. *Метеорология и гидрология*, (9), 29-42. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-29-42 EDN: https://elibrary.ru/epvmpc
16. Переведенцев, Ю. П., & Васильев, А. А. (2023). Изменение климата и его влияние на сельское хозяйство. *Метеорология и гидрология*, (9), 5-13. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-5-13 EDN: https://elibrary.ru/ingeqc
17. Солодун, В. И., & Луговнина, В. В. (2023). Агроэкологические аспекты формирования структуры использования пашни в Иркутской области. *География и природные ресурсы*, 44(3), 111-116. https://doi.org/10.15372/GIPR20230311 EDN: https://elibrary.ru/jtmtas
18. Шарипов, Ш. И., Мутуев, Ч. М., & Курбанов, З. М. (2019). Цифровая трансформация сельского хозяйства: тенденции и пути стимулирования. *Достижения науки и техники АПК*, 33(11), 88-90. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11119 EDN: https://elibrary.ru/glekba

19. Шпанев, А. М., & Смук, В. В. (2022). Влияние абиотических и антропогенных факторов на формирование урожайности ярового рапса на Северо-Западе Российской Федерации. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 23(3), 351-359. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.351-359 EDN: https://elibrary.ru/xxzcov
20. Яроменко, Н. Н., Кулак, А. А., & Овсиенко, А. А. (2020). Эконометрический анализ факторов, влияющих на урожайность зерновых (на примере сельскохозяйственных организаций центральной зоны Краснодарского края). *Естественно-гуманитарные исследования*, 30(4), 269-274. https://doi.org/10.24411/2309-4788-2020-10428 EDN: https://elibrary.ru/liswuu
21. Zakrutkin, V. E., Ryshkov, M. M., Shishkina, D. Yu., & Tsvylev, E. M. (2002). Agricultural ecosystems of extreme natural conditions, their economic capacity and the prospects of stable functioning. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, (3), 69-78. EDN: https://elibrary.ru/mpmkcd
22. Rogatnev, Y. M., Dolmatova, O. N., Aleschenko, V. V. et al. (2018). Evaluation of conditions for effective agricultural land-use as a basis for sustainable development of plant-growing production in the Omsk Region. *Ecology, Environment and Conservation*, 24(4), 1546-1554. EDN: https://elibrary.ru/auhtlm
23. Ivanyo, Ya. M., Asalkhanov, P. G., & Bendik, N. V. (2019). Management of the agro-industrial enterprise: optimization uncertainty expert assessments. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019*. P. 8934788.
24. Ivanyo, Ya. M., & Petrova, S. A. (2019). Optimization models of food processing wild-growing products with expert assessments. *Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security (IWCI 2019)*. Proceedings of the VIth International Workshop, pp. 108-113.
25. Ivanyo, Ya. M., Petrova, S. A., & Kovaleva, E. A. (2022). Ecological-Mathematical Modeling in Planning Production of Agricultural Products in Conditions of Risks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 022083. https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022083 EDN: https://elibrary.ru/guydcd
26. Kotliarov, I. D. (2022). Heterogeneity of stakeholders as an obstacle to the development of agricultural cooperatives in Russia. *Russian Peasant Studies*, 7(4), 20-32. https://doi.org/10.22394/2500-1809-2022-7-4-20-32 EDN: https://elibrary.ru/ljkeen
27. Ivanyo, Ya. M., Petrova, S. A., Polkovskaya, M. N., & Fedurina, N. I. (2018). Modeling of the production of agrarian products under the conditions of influence of droughts, rainfall and their combinations. *Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber*

security. Proceedings of the Vth International workshop, pp. 78-84. https://doi.org/10.2991/iwci-18.2018.14 EDN: https://elibrary.ru/idrnl

28. Plotnikov, V., Nikitin, Y., Maramygin, M., & Ilyasov, R. (2021). National food security under institutional challenges (Russian experience). *International Journal of Sociology and Social Policy*, 41(1-2), 139-153. https://doi.org/10.1108/IJSSP-03-2020-0074 EDN: https://elibrary.ru/ffrhyz
29. Bakharev, V. V., Mityashin, G. Yu., Stelmashonok, E. V. et al. (2023). Trends of evolution of food security: digital transformation, social entrepreneurship and human dignity. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(2), 363-391. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-363-391 EDN: https://elibrary.ru/kbwsda

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Иваньо Ярослав Михайлович, д-р тех. наук, профессор, проректор по цифровой трансформации, профессор кафедры информатики и математического моделирования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского»
п. Молодежный, Иркутский р-он, Иркутская обл., 664038, Российская Федерация
iasa_econ@rambler.ru

Петрова Софья Андреевна, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры информатики и математического моделирования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского»
п. Молодежный, Иркутский р-он, Иркутская обл., 664038, Российская Федерация
sofia.registration@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Yaroslav M. Ivanyo, Dr. of Eng. Sc., Prof., Vice-Rector for Digital Transformation, Professor Department of Computer Science and Mathematical Modeling
Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
Molodezhny village, Irkutsk district, Irkutsk region, 664038, Russian Federation

iasa_econ@rambler.ru
SPIN-code: 9654-8057
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4118-7185
ResearcherID: E-4197-2014
Scopus Author ID: 57201781356

Sofya A. Petrova, Cand. of Eng. Sc., Asc. Prof., Associate Professor Department of Computer Science and Mathematical Modeling
Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
Molodezhny village, Irkutsk district, Irkutsk region, 664038, Russian Federation
sofia.registration@mail.ru
SPIN-code: 7258-4269
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9586-583X
ResearcherID: E-4170-2014
Scopus Author ID: 57218917557, 57225787587

Поступила 26.07.2024
После рецензирования 24.09.2024
Принята 23.10.2024

Received 26.07.2024
Revised 24.09.2024
Accepted 23.10.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1105 **EDN: BRAOCI**
УДК 619:616.9:579.82186:791.8:636.04

CC BY NC ND

Научная статья

ФЕНО-ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНТЕРОМИКРОБИОТЫ ДИКИХ И ЗООПАРКОВЫХ ЖИВОТНЫХ КАК ПРИРОДНОГО РЕЗЕРВУАРА АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНЫХ ШТАММОВ МИКРООРГАНИЗМОВ

В.И. Плешакова, Н.А. Лещёва, Т.И. Лоренгель

Аннотация

Обоснование. Повышенное внимание ученых вызывает увеличение количества случаев обнаружения бактерий с антимикробной резистентностью в дикой природе. Дикие животные участвуют в передаче антибиотикорезистентных микроорганизмов. Генетические детерминанты устойчивости возникли в микроорганизмах окружающей среды, поэтому необходим тщательный анализ их мест обитания для прогнозирования процессов эволюции и распространения данного феномена.

Цель – изучение фено-генотипического профиля антибиотикорезистентности микроорганизмов, выделенных из энтеромикробиоты диких и содержащихся в неволе (зоопарковых) животных.

Материалы и методы. Для идентификации микроорганизмов использовали бактериологический метод и времяпролетную масс-спектрометрию. Детекцию генетических детерминант антибиотикорезистентности осуществляли методом ПЦР.

Результаты. Установлено, что микробиота пищеварительного тракта диких и содержащихся в зоопарках животных, представлена 5 семействами, в частности Streptococcaceae, Enterobacteriaceae, Bacillaceae, Staphylococcaceae и Pseudomonadaceae. Определена высокая резистентность некоторых видов бактерий (E. coli, Klebsiella pneumonia, Enterococcus faecalis и др.) к препаратам группы биосинтетических пенициллинов и ингибиторам β-лактамаз. У половины изолятов E. coli обнаружен ген blaCTX-M, кодирующий β-лактомазу расширенного спектра действия, у 15,2% E. coli - ген blaOXA10, который кодирует β-лактамазы класса D.

Заключение. Анализ фактических данных микробиологического и молекулярно-генетического мониторинга может служить важной и эффективной оценкой распространения клинически значимой микрофлоры, устойчивой к антимикробным препаратам среди диких животных.

Ключевые слова: дикие и зоопарковые животные; энтеромикробиота; антибиотикорезистентность; гены резистентности

Для цитирования. Плешакова, В. И., Лещёва, Н. А., & Лоренгель, Т. И. (2025). Фено-генотипическая характеристика энтеромикробиоты диких и зоопарковых животных как природного резервуара антибиотикорезистентных штаммов микроорганизмов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 553-569. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1105

Original article

PHENO-GENOTYPIC CHARACTERIZATION OF THE ENTEROMICROBIOTA OF WILD AND ZOO ANIMALS AS A NATURAL RESERVOIR OF ANTIBIOTIC-RESISTANT MICROBIAL STRAINS

V.I. Pleshakova, N.A. Lescheva, T.I. Lorengel

Abstract

Background. Currently, there is increasing attention to the rise in the number of cases of bacteria with multiple antimicrobial resistance found in the environment, including in wildlife. Wild animals may play a significant role in the transmission of antibiotic resistance on the local and global levels. The genetic determinants of antibiotic resistance originated in environmental microorganisms, thus a thorough analysis of habitats is necessary to predict the processes of evolution and spread of antibiotic resistance.

There is increasing attention of cases of antimicrobial-resistant bacteria being detected in wildlife is attracting increased attention from scientists. Wild animals are involved in the transmission of antibiotic resistance in microorganisms. The genetic determinants of resistance arose in environmental microorganisms, so a thorough analysis of their habitats is necessary to predict the processes of evolution and spread of this phenomenon.

Purpose. The objective of the study is to examine the pheno-genotypic profile of antibiotic resistance in microorganisms isolated from the enteromicrobiota of wild and captive (zoo) animals.

Materials and methods. Microorganisms were identified using bacteriological methods and time-of-flight mass spectrometry. The detection of genetic determinants of antibiotic resistance was performed using PCR.

Results. The studies have shown that the microbiota of the digestive tract of wild and zoo animals is represented by five families: Streptococcaceae, Enterobacteriaceae, Bacillaceae, Staphylococcaceae, and Pseudomonadaceae. A high resistance of certain bacterial species (E. coli, Klebsiella pneumoniae, Enterococcus faecalis, and others) to antimicrobial agents of the biosynthetic penicillin group and β-lactamase inhibitors has been established. Additionally, half of the E. coli isolates were found to carry the blaCTX-M gene, which encodes an extended-spectrum β-lactamase. The blaOXA10 gene, encoding class D β-lactamases, was detected in 15.2% of E. coli cultures.

Conclusion. The analysis of actual data from microbiological and molecular-genetic monitoring can serve as an important and effective assessment of the dissemination of clinically significant antimicrobial-resistant microbiota among wild animals.

Keywords: wild and zoo animals; enteromicrobiota; antibiotic resistance; resistance genes

For citation. Pleshakova, V. I., Lescheva, N. A., & Lorengel, T. I. (2025). Pheno-genotypic characterization of the enteromicrobiota of wild and zoo animals as a natural reservoir of antibiotic-resistant microbial strains. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 553-569. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1105

Введение

Всесторонний анализ имеющегося фактического материала, основанного на многочисленных прикладных исследованиях ученых, показывает, что к важным предпосылкам глобального распространения феномена антибиотикорезистентности можно отнести: чрезмерное, не всегда оптимальное использование антибиотических препаратов в сельском хозяйстве, в клинической медицинской и ветеринарной практике; неблагоприятную санитарно-эпидемиологическую и эпизоотическую ситуацию в развивающихся странах, что приводит к попаданию в окружающую среду неметаболизированных антибиотиков [1; 2; 5-7; 9-11; 18; 20].

Кроме того, Всемирное экономическое сообщество рассматривает проблему антибиотикорезистентности в разрезе глобальной экологической катастрофы, требующей как срочных, так и долгосрочных исследований [11].

Особую обеспокоенность вызывает увеличение случаев обнаружения бактерий с множественной антибиотической устойчивостью в окружающей среде, в том числе и дикой природе. В последние годы возросло ко-

личество опубликованных научных работ, посвященных исследованию диких животных, как переносчиков и вторичных источников микроорганизмов, резистентных к антибиотическим препаратам, для человека и сельскохозяйственных животных [13-17]. Большинство исследователей считают, что феномен антибиотикорезистентности необходимо рассматривать с одной стороны, как приобретенное свойство в процессе воздействия на микробную клетку антимикробных препаратов, а с другой стороны, как природно-обусловленную характеристику, сформировавшуюся в процессе эволюции бактерий в виде защите от природных антибиотиков [10; 18; 20].

Существует, по меньшей мере, несколько объяснений устойчивости микроорганизмов к противомикробным препаратам в нормальной микробиоте диких животных. Во-первых, устойчивость может развиваться в результате спонтанных мутаций, во-вторых, может быть приобретенной путем горизонтального переноса генов от других бактерий. Многие микробы и грибы являются естественными источниками генов лекарственной устойчивости и могут служить резервуарами в окружающей среде. В третьих, бактерии с устойчивостью к противомикробным препаратам могут быть занесены в регион либо перелетными птицы, либо мигрирующими животными [3; 4; 8]. Данный феномен подчеркивает уникальную природу адаптации бактерий и сложность механизмов распространения устойчивости к противомикробным препаратам. Дикая природа является не только своеобразным маркером загрязнения окружающей среды антибиотикорезистентными микроорганизмами, но и может служить их естественным резервуаром, а так же играть определенную роль в возникновении и горизонтальном распространении устойчивости к антибиотикам среди бактерий. Так же дикая природа, в том числе животные, могут играть важную роль в передаче антибиотикорезистентности на двух уровнях: локальном и глобальном [12; 19]. С учетом того, что генетические детерминанты устойчивости к антибиотикам возникли в микроорганизмах окружающей среды, необходим тщательный анализ их как клинических, так и в особенности неклинических (экологических) мест обитания для понимания и прогнозирования процессов эволюции и распространения антибиотикорезистентности [5; 14]. При этом, по нашему мнению, особое внимание следует уделять поиску генетических детерминант, связанных с устойчивостью к антибиотикам среди животного мира в дикой природе. С учетом вышеизложенного, расшифровка механизмов природной (естественной) устойчивости микроорганизмов к антибактериальным препаратам является важной и актуальной задачей как ветеринарной, так и гуманитарной медицины.

Целью настоящего исследования явилось изучение фено-генотипического профиля антибиотикорезистентности микроорганизмов, выделенных из энтеромикробиоты диких и содержащихся в неволе (зоопарковых) животных.

Материалы и методы исследования

Материалом для бактериологических исследований служили культуры микроорганизмов, изолированные из проб фекалий диких животных, обитающих в неволе (Большереченский зоопарк им. Соломатина В.Д., городской детский экологический центр), а так же в дикой природе (охотничьи угодья ряда районов Омской области) в весенне-летний период (2023-2024 гг.). Выделение и идентификацию культур бактерий осуществляли с учетом нормативных инструкций по применению унифицированных бактериологических методов исследования в диагностических лабораториях, по лабораторной диагностике эшерихиоза, стафилококкоза сельскохозяйственных животных. Также, идентификацию выделенных из фекальных проб микроорганизмов осуществляли методом времяпролетной масс-спектрометрии с матрично ассоциированной лазерной десорбцией/ионизацией (MALDI-TOF MS) с использованием системы VITEK MS и программного обеспечения «Biotyper RTC» (ФРГ). Рекомендуемое значение Score ≥ 2,0 использовали для оптимальной идентификации. Для определения устойчивости/чувствительности выделенных культур бактерий использовали диско-диффузионный метод. Интерпретацию результатов чувствительности отдельных культур бактерий осуществляли с учетом рекомендаций EUCAST (версия 8,0, январь, 2020). Учитывали пограничные значения диаметров зон подавления роста, калиброванные по отношению к гармонизированным европейским пограничным значениям (http://www.eucast.org).

Наличие в генах выделенных штаммов микроорганизмов Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae, Streptococcus spp. генетических детерминант устойчивости к антибиотическим препаратам определяли методом ПЦР с использованием специфических праймеров. Выделение ДНК бактерий осуществляли из 11 чистых культур Escherichia coli, 8 - Klebsiella pneumoniae, 16 - Streptococcus spp. с использованием пакета-набора «ДНК - сорбент ВЕТ» (производство ООО НПФ «Литех», РФ). Для выявления в пробах специфического участка ДНК бактериальных клеток (E. coli, K. pneumonia, Streptococcus spp.) применяли наборы реагентов тест-систем «Резистом. ESBL- E. coli», «Резистом . CRE – Klebsiella» и «РЕЗИСТОМ.ErmB» (производство ООО НПФ «Литех», РФ). ПЦР-ис-

следования осуществляли в режиме реального времени с применением анализатора CFX-96 производства BIO-RAD. ПЦР-детекцию генетических детерминант (маркеров) антибиотикорезистентности blaKPC, blaOXA-18, blaCTX-M, blaOXA 10, blaNDM, blaDHA, ermB осуществляли с использованием наборов ООО НПФ «Литех», РФ.

Статистическую обработку полученного цифрового материала проводили с использованием программного пакета Statistica v. 12 (Stat Soft). Оценку статистической значимости показателей и различий между исследуемыми группами проводили с учетом критерия Стьюдента при уровне значений $P \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Нами впервые в региональном масштабе установлена персистенция антибиотикорезистентных штаммов ряда микроорганизмов в микробиоте кишечного тракта диких животных.

Проведенные исследования показали, что микробиота пищеварительного тракта диких и содержащихся в неволе животных была представлена 5 семействами, а именно: Streptococcaceae, Enterobacteriaceae, Bacillaceae, Staphylococcaceae, Pseudomonadaceae. Установлено, что наибольшим видовым разнообразием характеризовалось семейство Streptococcaceae (4 вида), несколько меньшим семейство Bacillaceae (3вида). Затем с одинаковым количественным разнообразием следовали семейства Enterobacteriaceae и Staphylococcaceae (по 2 вида). Семейство Pseudomonadaceae было представлено только одним видом Pseudomonas fragi (табл. 1).

Таблица 1.

Состав сочленов энтеробактериоценоза диких и зоопарковых животных в Омском Прииртышье

Вид животного	Количество особей	Место локации	Выделенные микроорганизмы
Лиса (лат. Vulpes)	4	Охотничьи угодья	Streptococcus infantarius, Enterococcus faecalis, Bacillus pumilus
Косуля (лат. Capreolus)	8	Охотничьи угодья	Streptococcus gallolyticus, Bacillus pumilus, Bacillus cereus, Escherichia coli, Pantoea agglomerans, Bacillus licheniformis
Зелёная мартышка (лат. Chlorocebus sabaeus)	3	Экопарк	Klebsiella pneumoniae, Candida nivariensis

Сурок (лат. Marmota)	3	Экопарк	Escherichia coli, Candida albicans, Bacillus altitudinis
Лемур (лат. Lemuridae)	2	Экопарк	Escherichia coli, Enterococcus hirae, Candida albicans
Кенгуру (лат. Macropus)	2	Экопарк	Escherichia coli
Дикобраз (лат. Hystricidae)	2	Экопарк	Escherichia coli
Гуанако (лат. Lama guanicoe)	2	Экопарк	Escherichia coli, Staphylococcus succinus
Енот (лат. Procyon)	2	Экопарк	Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae, Staphylococcus delphini, Candida albicans
Песец (лат. Vulpes lagopus)	3	Экопарк	Escherichia coli, Enterococcus faecium, Bacillus licheniformis, Staphylococcus equorum, Pseudomonas fragi
Дикий кабан (лат. Sus scrofa)	3	Охотничьи угодья	Escherichia coli, Bacillus licheniformis,
Дальневосточный лесной кот (лат. Prionailurus bengalensis euptilurus)	2	Экопарк	Enterococcus faecium, Bacillus pumilus, Lactococcus garvieae

Необходимо отметить, что какой либо достоверной связи между видом животного и таксономической принадлежностью микроорганизмов не установлено. В тоже время, наиболее часто в исследованных пробах фекалий диких и содержащихся в неволе животных выделяли микроорганизмы вида Escherichia coli - 75%. Несколько реже бактерии рода Bacillus - 66,6%, затем Staphylococcus - 33,3% и в единичных случаях представителей рода Streptococcus, Pseudomonas. Кроме того в 33,3% проб были изолированы культуры грибов Candida albicans. Нами установлено, что в подавляющем большинстве случаев (83,5%) вышеперечисленные микроорганизмы были изолированы в ассоциациях. При этом наиболее часто встречались энтеромикробиоценозы состоящие из трех сочленов, и в частности E. coli + Enterococcus spp.+ Bacillus spp.. В единичных случаях фекальный микробиоценоз был представлен 4 и более бактериями, в частности: E. coli, Streptococcus spp., Klebsiella pneumonia, Candida albicans, Bacillus spp., Lactococcus garvilae.

Анализ таксономического разнообразия фекальной энтеромикробиоты не показал какой-либо достоверной взаимосвязи между локацией обитания животных (в условиях дикой природы или в зоопарках) и выделенными микроорганизмами.

Проведенные исследования показали, что профиль фенотипической антибиотикоустойчивости изолированных из проб фекалий бактерий представлен в достаточно широком диапазоне. Установлено, что 100%-ную антибиотикорезистентность к трем тестируемым антимикробным препаратам показали культуры следующих микроорганизмов: Streptococcus infatarias и E. coli (табл. 2, 5).

Таблица 2.

Антибиотикорезистентность микроорганизмов семейства Streptococcaceae, выделенных из проб фекалий диких и зоопарковых животных

Антибиотические препараты	Streptococcus infantarius (n=6)			Enterococcus faecalis (n=7)			Streptococcus gallolyticus (n=10)			Lactococcus garvieae (n=9)		
	R (%)	I (%)	S (%)	R (%)	I (%)	S (%)	R (%)	I (%)	S (%)	R (%)	I (%)	S (%)
Бензилпенициллин	100	-	-	100	-	-	-	-	100	-	-	100
Амоксициллин	100	-	-	14,2	-	85,8	-	-	100	100	-	-
Ампициллин	100	-	-	-	-	100	-	-	100	100	-	-
Клиндамицин	66,7	33,3	-	-	-	100	-	20,0	80,0		33,3	66,7
Линкомицин	83,4	16,6	-		14,2	85,8	-	10,0	90,0	22,2	-	77,8
Норфлоксацин	16,6	-	83,4	-	-	100		30,0	70,0	11,1	-	88,9
Гентамицин	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	11,1	88,9
Эритромицин	-	50,0	50,0	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Сульбактам	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	33,3	66,7
Цифрофлоксацин	-	-	100	-	42,8	57,2		20,0	80,0	-	-	100
Левофлоксацин		33,3	66,7	-	42,8	57,2	-	40,0	60,0		44,4	55,6
Тетрациклин	-	-	100	-	-	100	-	-	100	11,1	-	88,9
Рокситрамицин	-	-	100	14,2	-	85,8	-	-	100	-	-	100
Азитромицин		33,3	66,7	-	-	100	-	-	100	1		
Офлоксацин	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Кларитромицин	16,6	33,3	50,0	-	-	100	-	-	100		4	

Условные обозначения: R - резистентные культуры; I – умеренно-чувствительные культуры; S - чувствительные культуры

Причем, данные культуры микроорганизмов в двух случаях проявили 100% резистентность к амоксицилину и ампициллину, относящимся к фармакологической группе биосинтетических пенициллинов. Кроме того, 100% устойчивость к бензилпенициллину отмечена у культур бактерий рода Staphylococcus (табл. 3).

Таблица 3.

Антибиотикорезистентность микроорганизмов семейства Staphylococcaceae, выделенных из проб фекалий диких и содержащихся в неволе животных

Антибиотические препараты	Staphylococcus succinus (n=7)			Staphylococcus hominis (n=9)		
	R (%)	I (%)	S (%)	R (%)	I (%)	S (%)
Бензилпенициллин	100	-	-	100	-	-
Амоксициллин	-	-	100	-	11,1	88,9
Ампициллин	-	-	100	-	11,1	89,9
Клиндамицин	-	-	100		-	100
Линкомицин	-	-	100	100	-	-
Норфлоксацин	-	14,2	85,8	-	22,2	77,8
Гентамицин	-	-	100	-	-	100
Эритромицин	-	-	100		-	100
Сульбактам		14,2	85,8	-	22,2	77,8
Ципрофлоксацин	-	-	100	-	-	100
Левофлоксацин		28,5	71,5	-	33,3	66,7
Тетрациклин	-	-	100	-	-	100
Рокситрамицин		14,2	85,8	-	-	100
Азитромицин	-	-	100	-	-	100
Офлоксацин	-	14,2	85,8	-	-	100
Кларитромицин		14,2	85,8	-	-	100
Клавулоновая кислота	100	-	-	88,9	-	11,1

Условные обозначения: R - резистентные культуры; I – умеренно-чувствительные культуры; S - чувствительные культуры

В двух случаях отмечена высокая (более 50%) резистентность культур Streptococcus infatarius к клиндамицину (66,7%) и линкомицину (83,4%). Отмечено, что все выделенные культуры Lactococcus garvilae демонстрировали высокую устойчивость к амоксициллину и ампициллину. Вместе с тем, проведенный нами анализ профиля фенотипической антибиотикорезистентности выделенных культур энтеромикробиоты диких и содержащихся в неволе животных позволил выявить антибиотические препараты, обладающие высокой антибиотической и бактерицидной способностью к выделенным микроорганизмам. Так, подавляющее большинство выделенных культур обладали 100% чувствительностью к гентамицину, эритромицину, офлоксацину, левофлоксацину, тетрациклину. Установлено, что выделенные микроорганизмы семейств Staphylococcaceae и Bacillaceae показали высокую резистентность (более 50%) к препарату относящемуся к фармакологической группе ингибиторов бета-лактамаз, а именно клавулоновой кислоте (табл. 3,4).

Таблица 4.

Антибиотикорезистентность микроорганизмов семейства Bacillaceae, выделенных из проб фекалий диких и содержащихся в неволе животных

Антибиотические препараты	Bacillus pumilus (n=5)			Bacillus cereus (n=6)			Bacillus licheniformis (n=5)		
	R (%)	I (%)	S (%)	R (%)	I (%)	S (%)	R (%)	I (%)	S (%)
Бензилпенициллин	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Амоксициллин	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Ампициллин	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Клиндамицин	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Линкомицин	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Норфлоксацин	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Гентамицин	-	20,0	80,0	-	-	100	-	-	100
Эритромицин	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Сульбактам	-	-	100	-	-	100	-	-	100
Ципрофлоксацин	-	20,0	80,0		20,0	80,0	-	40,0	60,0
Левофлоксацин	-	-	100		40,0	60,0		20,0	80,0
Тетрациклин	-	40,0	60,0		20,0	80,0			
Рокситрамицин	-	-	100					20,0	80,0
Азитромицин	-	-	100		20,0	80,0	-	-	100
Офлоксацин		40,0	60,0	-	-	100	-	20,0	80,0
Кларитромицин		20,0	80,0	-	-	100	-	40,0	60,0
Клавулоновая кислота	80,0	-	20,0	80,0	20,0	-	20,0	80,0	-

Условные обозначения: R - резистентные культуры; I – умеренно-чувствительные культуры; S - чувствительные культуры

Так же обнаружено, что 100% культур микроорганизмов E. coli и Klebsiella pneumonia, относящихся к семейству Enterobacteriaceae, проявили резистентность к препарату сульбактам, входящему в группу ингибиторов β-лактамаз (табл. 5).

Таблица 5.

Антибиотикорезистентность микроорганизмов семейства Enterobacteriaceae, выделенных из проб фекалий диких и содержащихся в неволе животных

Антибиотические препараты	Escherichia coli (n=11)			Klebsiella pneumoniae (n=8)		
	R (%)	I (%)	S (%)	R (%)	I (%)	S (%)
Бензилпенициллин	-	-	100			
Амоксициллин	100	-	-	100	-	-
Ампициллин	100	-	-	100	-	-
Клиндамицин	-	-	100	-	-	100

Линкомицин	-	27,2	72,8	-	12,5	87,5
Норфлоксацин		9,0	91,0	-	-	100
Гентамицин	-	-	100	-	-	100
Эритромицин	-	36,3	63,7	-	12,5	87,5
Сульбактам	100	-	-	100	-	-
Ципрофлоксацин	-	30,0	70,0	-	25,0	75,0
Левофлоксацин	-	-	100	-	-	100
Тетрациклин	-	-	100	-	-	100
Рокситрамицин	-	-	100	-	-	100
Азитромицин	-	-	100	-	-	100
Офлоксацин	-	18,1	81,9		12,5	87,5
Кларитромицин	-	-	100		12,5	87,5

Условные обозначения: R - резистентные культуры; I – умеренно-чувствительные культуры; S - чувствительные культуры

Проведенные молекулярно-генетические исследования показали, что среди культур E. coli, выделенных из проб фекалий диких животных, в 67,30% были выявлены гены blaCTX-M, в 15,20% blaOXA 10 в 5,16% blaDHA, кодирующие β-лактамазы. Установлено, что у 28,31% культур K. pneumoniae обнаружены гены резистентности к карбопенемам blaOXA-18. В то же время у 26,31% культур K. pneumoniae генов резистентности к карбопенемам blaKPC, blaNDM и blaDHA не выявлено. Среди культур Streptococcus spp.ген *ermB* был выявлен у 48,53% изолятов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что энтеромикробиота диких животных, обитающих на территории Западно-Сибирского региона, представлена 5 семействами, при этом в подавляющем количестве случаев они встречались в ассоциациях. Установлена высокая резистентность некоторых видов бактерий (E. coli, Klebsiella pneumonia, Enterococcus faecalis и др.) к антибиотическим препаратам относящимся к фармакологическим группам биосинтетических пенициллинов, ингибиторам β-лактомаз.

Молекулярно-генетическими тестами установлено, что более чем у половины штаммов E. coli выявлен ген blaCTX-M, кодирующий β-лактамазу расширенного спектра действия, опосредующую резистентность к β-лактамным антибиотикам. У 15,20% E. coli обнаружен ген blaOXA10, который кодирует β-лактамазы класса D. Данные тенденции можно объяснить достаточно широким распространением гена blaCTX-M и отражает селек-

тивное давление на фоне часто используемых β-лактамных антибиотиков в ветеринарной практике.

Полученные нами данные свидетельствуют о достаточно широком распространении антибиотикорезистентных бактерий в составе энтеромикробиоты диких животных, которые вероятно, не подвергались воздействию антибиотических препаратов. Следовательно, анализ фактических данных микробиологического и молекулярно-генетического мониторинга может служить важной и эффективной количественной и качественной оценкой распространения резистентности клинически значимой микрофлоры к антимикробным препаратам, что позволит получить новую научную информацию о циркуляции антибиотикоустойчивых микроорганизмов среди диких животных на региональном и глобальном уровнях.

Кроме того, результаты исследований позволяют констатировать, что важными звеньями по предупреждению развития и распространения антибиотикорезистентности должны являться мероприятия, направленные на оптимальное использование антибиотиков, проведение целенаправленного эпидемиологического и эпизоотологического надзора, соблюдение принципов изоляции возбудителей инфекций, использование альтернативных антибиотикам препаратов (пробиотики, иммуномодуляторы и т.п.)

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (соглашение № 23-26-00118 от 13.01.2023).

Sponsorship information. This work was supported by the Russian Science Foundation grant (Agreement No. 23-26-00118 dated January 13, 2023).

Список литературы

1. Ерещенко, М. И., Денисенко, Т. Е., & Болтунов, А. Н. (2019). Биологические свойства микроорганизмов, выделенных от атлантического моржа. В *Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии и биотехнологии*: Сборник трудов, 453-454. EDN: https://elibrary.ru/vcxlox
2. Землянко, О. М., Рогоза, Т. М., & Журавлева, Г. А. (2018). Механизмы множественной устойчивости бактерий к антибиотикам. *Экологическая генетика*, 16(3), 4-17. https://doi.org/10.17816/ecogen1634-17 EDN: https://elibrary.ru/ynfkb
3. Лях, Ю. Г., Гринёк, А. Н., Сухоцкая, Е. А., & Солодкий, М. А. (2019). Значение диагностики, анализ носительства возбудителей бактериальных инфекций у охотничьих водоплавающих птиц Беларуси. В *Зоологические*

чтения - 2019: Сборник статей международной научно-практической конференции, 172-174.
4. Калашникова, В. А., & Демерчян, А. В. (2018). Антибиотикорезистентность бактерий, выделенных у обезьян при кишечных инфекциях. *Ветеринарная клиника*, (7), 12-15. EDN: https://elibrary.ru/rkmbvk
5. Киселева, С. В., & Денисенко, Т. Е. (2017). Индикация антибиотикорезистентности штаммов стафилококков у различных видов домашних и диких животных. В *Тезисы докладов 70-й Всероссийской конференции*, 81-102. EDN: https://elibrary.ru/ysmkvk
6. Ларцева, Л. В., & Истелюева, А. А. (2011). Геоэкологические особенности антибиотикорезистентности микрофлоры внутренних водотоков г. Астрахани. *Геология, география и глобальная энергия*, (3), 180-186. EDN: https://elibrary.ru/nykzkh
7. Лыков, И. Н., & Битков, М. П. (2022). Антибиотикорезистентность микрофлоры кузнечиков. *Международный научно-исследовательский журнал*, (11), 11. https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.107 EDN: https://elibrary.ru/wmdhsm
8. Обухова, О. В., & Ларцева, Л. В. (2014). Особенности антибиотикорезистентности энтеробактерий в дельте р. Волги. *Гигиена и санитария*, (3), 21-23. EDN: https://elibrary.ru/sjsxoh
9. Давидович, Н. В., Кукалевская, Н. Н., Башилова, Е. Н., & Бажукова, Т. А. (2020). Основные принципы эволюции антибиотикорезистентности у бактерий. *Клиническая лабораторная диагностика*, 65(6), 387-393. https://doi.org/10.18821/0869-2084-2020-65-6-387-393 EDN: https://elibrary.ru/ejuexx
10. Манжурина, О. А., Скогорева, А. М., Ромашов, Б. В., & Ромашова, Н. Б. (2017). Современные тенденции антибиотикорезистентности микробиоты домашних и диких животных. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, (1), 41-45. https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.1.41 EDN: https://elibrary.ru/yqunuv
11. Устойчивость к противомикробным препаратам [Электронный ресурс]. Всемирная организация здравоохранения. URL: https://www.who.int/ru/health-topics/antimicrobial-resistance (дата обращения: 11.06.2024).
12. Martinez, J. L., Fajardo, A., Garmendia, L., Hernandez, A., Linares, J. F., Martinez-Solano, L., & Sanchez, M. B. (n.d.). A global view of antibiotic resistance. *FEMS Microbiol. Rev.*, 33, 44-65.
13. Baquero, F., Alvarez-Ortega, C., & Martinez, J. L. (2009). Ecology and evolution of antibiotic resistance. *Environ Microbiol Rep*, 1(6), 469-476.
14. Bonnedahl, J., & Järhult, J. D. (2014). Antibiotic resistance in wild birds. *Ups J Med Sci*, 119(2), 113-116.

15. Koeck, R., Daniels-Haardt, I., Becker, K., Mellmann, A., Friedrich, A. W., Mevius, D., & Schwarz, S., Jurke, A. (2018). Carbapenem-resistant Enterobacteriaceae in wildlife, food-producing, and companion animals: a systematic review. *Clin Microbiol Infect*, 10, 441-449.
16. Dolejska, M., & Literak, I. (2019). Wildlife is overlooked in the epidemiology of medically important antibiotic-resistant bacteria. *Antimicrob Agents Chemother*, 63(8), 142-151.
17. Guenther, S., Ewers, C., & Wieler, L. H. (2011). Extended-spectrum beta-lactamases producing E. coli in wildlife, yet another form of environmental pollution? *Front Microbiol*, 128-158.
18. Martínez, J. L. (2012). Natural antibiotic resistance and contamination by antibiotic resistance determinants: the two ages in the evolution of resistance to antimicrobials. *Front Microbiol*, 1-3.
19. Wellington, E. M., Boxall, A. B., Cross, P., Feil, E. J., Gaze, W. H., Hawkey, P. M. et al. (2013). The role of the natural environment in the emergence of antibiotic resistance in gram-negative bacteria. *Lancet Infect Dis*, 13(2), 155-165.
20. Furness, L. E., Campbell, A., Zhang, L., Gaze, W. H., & McDonald, R. A. (2017). Wild small mammals as sentinels for the environmental transmission of antimicrobial resistance. *Environ Res*, 3, 1121-1129.

References

1. Ereschenko, M. I., Denisenko, T. E., & Boltunov, A. N. (2019). Biological properties of microorganisms isolated from Atlantic walrus. In *Actual problems of veterinary medicine, animal husbandry and biotechnology: Proceedings* (pp. 453-454). EDN: https://elibrary.ru/vcxlox
2. Zemlyanko, O. M., Rogoza, T. M., & Zhuravleva, G. A. (2018). Mechanisms of multiple antibiotic resistance in bacteria. *Ecological Genetics*, *16(3)*, 4-17. https://doi.org/10.17816/ecogen1634-17 EDN: https://elibrary.ru/ynfkb
3. Lyakh, Yu. G., Grinek, A. N., Sukotskaya, E. A., & Solodkyi, M. A. (2019). Importance of diagnostics, analysis of carriage of bacterial infection pathogens in hunting waterfowl of Belarus. In *Zoological readings - 2019: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 172-174).
4. Kalashnikova, V. A., & Demerchyan, A. V. (2018). Antibiotic resistance of bacteria isolated from monkeys with intestinal infections. *Veterinary Clinic*, *(7)*, 12-15. EDN: https://elibrary.ru/rkmbvk
5. Kiseleva, S. V., & Denisenko, T. E. (2017). Indication of antibiotic resistance of staphylococcus strains in various species of domestic and wild animals. In *Ab-*

stracts of the 70th All-Russian Conference (pp. 81-102). EDN: https://elibrary.ru/ysmkvk

6. Lartseva, L. V., & Isteleva, A. A. (2011). Geoecological features of antibiotic resistance of microflora of internal waterways of Astrakhan. *Geology, Geography and Global Energy*, *(3)*, 180-186. EDN: https://elibrary.ru/nykzkh
7. Lykov, I. N., & Bitkov, M. P. (2022). Antibiotic resistance of grasshopper microflora. *International Research Journal*, *(11)*, 11. https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.107 EDN: https://elibrary.ru/wmdhsm
8. Obukhova, O. V., & Lartseva, L. V. (2014). Features of antibiotic resistance of enterobacteria in the Volga Delta. *Hygiene and Sanitation*, *(3)*, 21-23. EDN: https://elibrary.ru/sjsxoh
9. Davidovich, N. V., Kukalevskaya, N. N., Bashilova, E. N., & Bazhukova, T. A. (2020). Main principles of evolution of antibiotic resistance in bacteria. *Clinical Laboratory Diagnostics*, *65(6)*, 387-393. https://doi.org/10.18821/0869-2084-2020-65-6-387-393 EDN: https://elibrary.ru/ejuexx
10. Manzhurina, O. A., Skogoreva, A. M., Romashov, B. V., & Romashova, N. B. (2017). Current trends in antibiotic resistance of microbiota of domestic and wild animals. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*, *(1)*, 41-45. https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.1.41 EDN: https://elibrary.ru/yqunuv
11. Antimicrobial resistance. (2024). World Health Organization. Retrieved from https://www.who.int/ru/health-topics/antimicrobial-resistance (Accessed: June 11, 2024)
12. Martinez, J. L., Fajardo, A., Garmendia, L., Hernandez, A., Linares, J. F., Martinez-Solano, L., & Sanchez, M. B. (n.d.). A global view of antibiotic resistance. *FEMS Microbiol. Rev.*, 33, 44-65.
13. Baquero, F., Alvarez-Ortega, C., & Martinez, J. L. (2009). Ecology and evolution of antibiotic resistance. *Environ Microbiol Rep*, 1(6), 469-476.
14. Bonnedahl, J., & Järhult, J. D. (2014). Antibiotic resistance in wild birds. *Ups J Med Sci*, 119(2), 113-116.
15. Koeck, R., Daniels-Haardt, I., Becker, K., Mellmann, A., Friedrich, A. W., Mevius, D., & Schwarz, S., Jurke, A. (2018). Carbapenem-resistant Enterobacteriaceae in wildlife, food-producing, and companion animals: a systematic review. *Clin Microbiol Infect*, 10, 441-449.
16. Dolejska, M., & Literak, I. (2019). Wildlife is overlooked in the epidemiology of medically important antibiotic-resistant bacteria. *Antimicrob Agents Chemother*, 63(8), 142-151.
17. Guenther, S., Ewers, C., & Wieler, L. H. (2011). Extended-spectrum beta-lactamases producing E. coli in wildlife, yet another form of environmental pollution? *Front Microbiol*, 128-158.

18. Martínez, J. L. (2012). Natural antibiotic resistance and contamination by antibiotic resistance determinants: the two ages in the evolution of resistance to antimicrobials. *Front Microbiol*, 1-3.
19. Wellington, E. M., Boxall, A. B., Cross, P., Feil, E. J., Gaze, W. H., Hawkey, P. M. et al. (2013). The role of the natural environment in the emergence of antibiotic resistance in gram-negative bacteria. *Lancet Infect Dis*, 13(2), 155-165.
20. Furness, L. E., Campbell, A., Zhang, L., Gaze, W. H., & McDonald, R. A. (2017). Wild small mammals as sentinels for the environmental transmission of antimicrobial resistance. *Environ Res*, 3, 1121-1129.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Плешакова Валентина Ивановна, профессор, доктор ветеринарных наук, профессор
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
vi.pleshakova@omgau.org

Лещёва Надежда Алексеевна, зав. кафедрой, кандидат ветеринарных наук, доцент
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
na.lescheva@omgau.org

Лоренгель Татьяна Иосифовна, доцент, кандидат ветеринарных наук
ФГБОУ ВО Омский ГАУ
Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
ti.lorengel@omgau.org

DATA ABOUT THE AUTHORS

Valentina I. Pleshakova, Doctor of Veterinary Sciences, Professor
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 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. Leshcheva, Head of the Department, Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
na.lescheva@omgau.org
SPIN-code: 1482-8172
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6334-0422
ResearcherID: AIF-2193-22
Scopus Author ID: 57223669914

Tatyana I. Lorengel, Associate Professor, Candidate of Veterinary Sciences
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
ti.lorengel@omgau.org
SPIN-code: 4352-5240
Scopus Author ID: 57214329921

Поступила 05.07.2024 Received 05.07.2024
После рецензирования 14.09.2024 Revised 14.09.2024
Принята 16.10.2024 Accepted 16.10.2024

ОПЫТ РЕГИОНОВ

EXPERIENCE OF REGIONS

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1436 **EDN: CKGBXQ**
УДК 616:576.895.131:639.3.091

Научная статья

ПАРАЗИТОФАУНА РЫБ ТАВУШСКИХ ВОДОЕМОВ

Л.Г. Григорян, А.Р. Акобян, Ж.С. Мелконян, С.В. Ерибекян, Г.С. Баласанян, В.В. Григорян

Аннотация

Обоснование. Животный и растительный мир речных бассейнов Республики Армения довольно богат и весьма разнообразен. Особый интерес представляет жизнь обитающих в них рыб, паразитарные заболевания, которые мало изучениы.

Цель. Целью исследования является изучение паразитофауны рыб рек Тавуш и Варагаджур, Тавушского и Ахумского водохранилищ.

Материал и методы. Исследование проводилось в 2022-2023 гг. в лаборатории научно-исследовательского центра ветеринарной медицины и ветеринарно-санитарной экспертизы Армянского Национального Аграрного Университета. Материалом для исследований послужили рыбы, выловленные из рек Тавуш и Варагаджур, Тавушского и Ахумского водохранилищ. Методом полного паразитологического вскрытия (по методу Быховской-Павловской, 1985) была препарирована 231 особь. Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью компьютерной программы «BioStat 2009».

Результаты. В ходе паразитологических исследований, проведенных в водоемах Тавушской области, у исследуемых видов рыб - ручьевой форели, куринского усача, куринской храмули, сазана, восточной быстрянки, серебряного карася, кавказского голавля были обнаружены 4 вида гельминтов: моногенетический эктопаразит *Dactylogyrus vastator,* метацеркарии трематод *Diplostomum spathaceum* и *Diplostomum rutili*, нематоды *Rhabdochona fortunatowi* и 3 вида простейших *Chilodonella cyprini, Ichthyophthirius multifiliis u Trichodina nigra.*

Заключение. В результате исследования паразитофауны было выявлено, что из 7 изученных видов рыб ручьевая форель наиболее подвержена паразитарным заболеваниям, среди которых наиболее распространенным является рабдохоноз. Он был обнаружен у всех изученных видов рыб.

Ключевые слова: Тавуш; ручьевая форель; трематода; нематода; простейшие; Rhabdochona fortunatowi

Для цитирования. Григорян, Л. Г., Акобян, А. Р., Мелконян, Ж. С., Еribекян, С. В., Баласанян, Г. С., & Григорян, В. В. (2025). Паразитофауна рыб Тавушских водоемов. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 570-589. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1436

Original article

FISH PARASITOFAUNA OF TAVUSH RESERVOIRS

L.G. Grigoryan, A.R. Hakobyan, Zh.S. Melkonyan, S.V. Yeribekyan, H. S. Balasanyan, V.V. Grigoryan

Abstract

Background. The flora and fauna of the river basins of the Republic of Armenia is quite rich and very diverse. Of particular interest is the life of the fish living in them and parasitic diseases, which have received little study.

Purpose. The purpose of the research is to study the parasite fauna of fishes of Tavush and Varagajur rivers, Tavush and Hakhumi reservoirs.

Material and methods. The research was carried out in 2022-2023. In the laboratory of "Veterinary Medicine and Veterinary Sanitary Expertise Research Center" of the Armenian National Agrarian University. Fish caught from Tavush and Varagajur rivers, Tavush and Hakhum reservoirs were the materials for research. 231 individuals were dissected by the method of complete parasitological dissection (by the method of Bykhovskaya-Pavlovskaya, 1985). The statistical processing of the data was carried out with the "BioStat 2009" computer program.

Results. During the parasitological research conducted in the water basins of the Tavush region, 4 types of helminths were found in the fish species examined: broun trout, kura barbel, caucasian scraper, wild common carp, sout caspian sprilin, prussian carp and caucasian chub europiean chub *Dactylogyrus vastator* monogenetic ectoparasite, *Diplostomum spathaceum* and *Diplostomum rutili* trematode metacercariae, Rhabdochona fortunatowi nematodes and 3 types of protozoa *Chilodonella cyprini, Ichthyophthirius multifiliis* and *Trichodina nigra*.

Conclusion. As a result of the research of the parasitofauna, it was revealed that out of the 7 studied fish species, the broun trout is the most susceptible to parasitic diseases, and the most common of the diseases is rhabdochonosis, which was found in all the studied fish species.

Keywords: Tavush; broun trout; trematode; nematode; protozoa; Rhabdochona fortunatowi

For citation. Grigoryan, L. G., Hakobyan, A. R., Melkonyan, Zh. S., Yeribekyan, S. V., Balasanyan, H. S., & Grigoryan, V. V. (2025). Fish parasitofauna of Tavush reservoirs. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 570-589. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1436

Введение

Рыбоводство бурно развивается в РА, однако его полноценному развитию препятствуют различные заболевания. Среди этих болезней особое место занимают паразитарные заболевания.

Изменения экологической ситуации – загрязнение водоемов органическими и минеральными удобрениями, сточными водами животноводческих ферм, пестицидами, отходами промышленных и городских предприятий и расчищенных полей влияют на состояние жизни рыб в водоемах. Изменение гидрологоческих и гидрохимических параметров термического режима водоема и других показателей может привести к снижению естественной кормовой базы и существенно повлиять на скорость роста и жизнеспособность особей. Кроме того, на пищевую и биологическую ценность рыбы негативно влияет современное интенсивное рыбоводство [2; 15; 16].

Паразитарная ситуация водоема является неотъемлемой частью его экологического состояния. В результате исследований установлено, что паразиты являются естественными компонентами биоценоза водоема и его видового разнообразия, образуя особый структурный уровень экосистем [14].

Результаты анализа ветеринарных отчетов показали, что инвазионные болезни рыб составляют 66% от общего числа инфекционных болезней [11].

Чаще всего регистрируют гельминтозы, вызываемые моногенетичными трематодами, ленточными и круглыми червями, а также скребнями. Перечисленные паразиты встречаются у рыб как в естественных водоемах, так и в прудах. Некоторые гельминты, паразитируя в различных органах и тканях рыб в личиночном состоянии, в организме человека и плотоядных животных становятся половозрелыми, вызывая у них тяжелые заболевания.

Мягкий климат Тавушской области, богатая кормовая база девственных лесов и лугов создали благоприятные условия для роста и развития многих диких животных, птиц и рыб.

Река Тавуш с одноименным водохранилищем и река Варагаджур с Ахумским водохранилищем расположены в Тавушской области Республики Армения. Эти реки берут начало с северо-западных склонов горы Миапор на высоте около 2500 м и сливаются с рекой Кура. Реки и водохранилища имеют важное значение для организации хозяйственного, туристического и рекреационного отдыха населения.

Разнообразная и красочная природа региона, включая его фауну и паразитфауну изучена сравнительно мало.

Целью исследований является изучение паразитофауны рыб рек Тавуш и Варагаджур, Тавушского и Ахумского водохранилищ.

Научной новизной нашей работы является многостороннее изучение паразитофауны рыб, обитаюших в некоторых водоемах Тавушской области, которое проведено впервые нами.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в 2022-2023 годах в лаборатории научно-исследовательского центра ветеринарной медицины и ветеринарно-санитарной экспертизы Армянского Национального Аграрного Университета.

Материалом для исследований послужила рыба, выловленная в реках Тавуш и Варагаджур, Тавушском и Ахумском водохранилищах, прилегающих к поселкам Паравакар, Варагаван, Верин Цахкаван, Ицакар, Тавуш, Берд. Рыбу ловили на крючок и голыми руками. Методом полного паразитологического вскрытия (метод Быховской-Павловской, 1985) препарирована 231 особь, из них лососевые (Salmonidae) 1 вид ручьевая форель (Salmo trutta) 25 рыб и 6 видов карповых - серебристый карась (Carassius auratus gibelio Bloch, 1782) 32 рыбы, куринская храмуля (Capoeta capoeta Guldenstadt, 1773) 35 штук, кавказский голавль (Squalius orientalis Heckel, 1847) 14 рыб, восточная быстрянка (Alburnoides eichwaldii) 16 штук, куринский усач (Barbus cyri) 36 штук, сазан (Cyprinus carpio L., 1758) 73 штук [3].

Для выявления гельминтов у рыб был использован широко распространенный метод Быховской-Павловской [7; 8; 17]. Для выяснения видового состава рыб и гельминтов мы использовали специальные определители [4-6].

Для количественной характеристики популяции гельминтов определяли следующие показатели: экстенсивность и интенсивность инвазии,

индекс численности. Для характеристики зараженности простейшими рассчитывали только степень зараженности. Интенсивность зараженности и индекс численности рассчитать не удалось, поскольку не было возможности определить общее количество паразитических простейших в одной рыбе.

Статистическую обработку данных проводили с помощью компьютерной программы «БиоСтат 2009». Достоверность разницы показателей степени заражения разных видов рыб одним и тем же паразитом определяли с помощью критерия Фишера, а достоверность разницы в интенсивности заражения - с помощью критерия Стьюдента.

Результаты

Паразитологическому исследованию подверглись 231 рыба, выловленные в Тавушском и Ахумском водохранилищах Тавушской области, а также в реках Тавуш и Варагаджур. Моногенеии – *Dactylogyrus vastator* Nybelin, 1924 (Monogenea: Dactylogyridae), трематоди - *Diplostomum spathaceum* Rudolphi, 1819 и *Diplostomum rutili* Razmashkin, 1969 (Trematoda: Diplostomidae), нематоды - *Rhabdochona fortunatowi* Dinnik, 1933 (Nematoda: Thelaziidae), простейшие - *Chilodonella cyprini* Strand, 1928 (Ciliophora: Chilodonellidae), *Ichthyophthirius multifiliis* Fouquet, 1876 (Ciliophora: Ichthyophthiriidae), *Trichodina nigra* Lom, 1960 (Ciliophora: Trichodinidae). Результаты исследования сведены в таблицу N1.

Таблица 1.

Инвазированность обследованных рыб паразитами

Виды гельминтов	Хозяин	Локализация	ЭИ, %	ИИ ср., экз.	ИО, экз.
Dactylogyrus vastator Nybelin, 1924 (Monogenea: Dactylogyridae)	ручьевая форель, (Salmo trutta)	наружное покрытие, жабры	16%	4,0±0,48	0,64
	серебряный карась, (Carassius auratus gibelio)	наружное покрытие, жабры	21.8%	3,57± 0,37	0,78
	куринская храмуля, (Capoeta capoeta)	наружное покрытие, жабры	8,6%	4,33 ±0,04	0,42
	восточная быстрянка, (Alburnoides eichwaldii)	наружное покрытие, жабры	25%	4,75 ±0,13	1,19
	куринский усач, (Barbus lacerta)	наружное покрытие, жабры	22,2%	5,0 ±0,53	1,11
	сазан, (Cyprinus carpio)	наружное покрытие, жабры	17,8%	4,77 ±0,8	0,85

Diplostomum spathaceum Rudolphi, 1819 (Trematoda: Diplostomidae)	ручьевая форель (Salmo trutta)	хрусталик	12%	5,33 ±0,33	3,6
	куринская храмуля, (Capoeta capoeta)	хрусталик	74,3%	5,81 ±0,33	4,31
	куринский усач (Barbus lacerta)	хрусталик	61,1%	6,05±0,39	3,69
	сазан (Cyprinus carpio)	хрусталик	45,2%	4,52±0,25	2, 04
Diplostomum rutili Razmashkin, 1969 (Trematoda: Diplostomidae)	ручьевая форель (Salmo trutta)	хрусталик	56,0%	1,57 ±0,14	0.88
	куринский усач (Barbus lacerta)	хрусталик	16,7%	3,83±0,31	0,77
Rhabdochona fortunatowi Dinnik, 1933 (Nematoda: Thelaziidae)	ручьевая форель (Salmo trutta)	кишки	8,0%	4,0 ±1,0	0,32
	серебряный карась, (Carassius auratus gibelio	кишки	9,4%	5,33 ±0,33	0,5
	куринский усач (Capoeta capoeta	кишки	14,3%	6,0±0,32	0,86
	кавказский голавль (Squalius orientalis	кишки	21,4%	6,0 ±0,58	1,29
	восточная быстрянка (Alburnoides eichwaldii)	кишки	12,5%	3,50±0,50	0,38
	куринский усач (Barbus lacerta)	кишки	16,7%	3,83±0,31	0,77
	сазан (Cyprinus carpio)	кишки	11,0%	5,25 ±0,45	0,58
Chilodonella cyprini Strand, 1928 (Ciliophora: Chilodonellidae)	ручьевая форель, (Salmo trutta)	верхняя поверхность, плавник, жабры	16,0%	-	-
	серебряный карась, (Carassius auratus gibelio)	верхняя поверхность, плавник, жабры	15,6%	-	-
	восточная быстрянка (Alburnoides eichwaldii	верхняя поверхность, плавник, жабры	18,75%	-	-
	куринская храмуля (Capoeta capoeta)	верхняя поверхность, плавник, жабры	14,3%	-	-
	кавказский голавль (Squalius orientalis	верхняя поверхность, плавник, жабры	21,4%	-	-

Ichthyophthirius multifiliis Fouquet, 1876 (Ciliophora: Ichthyophthi-ri-idae)	восточная быстрянка (Alburnoides eichwaldii)	жабры	25%	-	-
	куринский усач (Capoeta capoeta	жабры	13,9%	-	-
	сазан (Cyprinus carpio	жабры	17,8%	-	-
Trichodina nigra Lom, 1960 (Ciliophora: Trichodinidae)	ручьевая форель, (Salmo trutta)	жабры	12%	-	-
	серебряный карась, (Carassius auratus gibelio)	жабры	9,4%	-	-
	восточная быстрянка (Alburnoides eichwaldii	жабры	25%	-	-
	куринский усач (Barbus lacerta)	жабры	13%	-	-

Примечания: * – p < 0,05 по критерию Фишера
** - p < 0,05 по критерию Стьюдента

Обсуждение

Как видно из данных таблицы N1, в ходе исследований обнаружены 4 вида гельминтов и 3 вида простейших.

У ручьевой форели обнаружено 4 вида гельминтов и 2 вида простейших. В наружном покрытии и жабрах ручьевой форели обнаружены возбудители *Dactylogyrus vastator* моногении, в хрусталике обнаружены метацеркарии трематод *Diplostomum spathaceum* и *Diplostomum rutili,* в кишечнике - нематоды *Rhabdochona fortunatowi*, простейшие *Chilodonella cyprini* и *Trichodina nigra* в жабрах, плавниках и внешнем покрове.

У серебристой форели были обнаружены 2 вида гельминтов и 2 вида простейших. Возбудители моногенеи *Dactylogyrus vastator* были обнаружены в наружном покрове и жабрах серебристой форели, нематоды *Rhabdochona fortunatowi* в кишечнике, простейшие *Chilodonella cyprini* и *Trichodina nigta* в жабрах, плавниках, на внешнем покрове.

У куринской храмули обнаружено 3 вида гельминтов и 1 вид простейших. В наружном покрове и в жабрах обнаружены *Dactylogyrus vastator* моногенеи, в хрусталике глаза метацеркарии трематоды *Diplostomum spathaceum*, в кишечнике нематоды *Rhabdochona fortunatowi*, в жабрах и плавниках *Chilodonella cyprini* простейшие.

У восточной быстрянки обнаружены 2 вида гельминтов и 3 вида простейших. Возбудители моногенеи *Dactylogyrus vastator* обнаружены во внешнем покрове и жабрах восточной быстрянки, нематоды *Rhabdochona*

fortunatowi в кишечнике, простейшие *Chilodonella cyprini, Ichthyophthirius multifiliis, Trichodina nigra* на внешнем покрове, жабрах и плавниках.

У куринского усача было обнаружено 4 вида гельминтов и 2 вида простейших. Возбудители моногенеи *Dactylogyrus vastator* были обнаружены на наружном покрове и жабрах куринского усача, метацеркари трематод *Diplostomum spathaceum u Diplostomum rutili* в хрусталике, патогены нематод *Rhabdochona fortunatowi* в кишечнике, простейшие *Ichthyophthirius multifiliis*, *Trichodina nigra* в жабрах.

У вида рыб сазан было обнаружено 3 вида гельминтов и 1 вид простейших. Возбудители моногенеи *Dactylogyrus spathaceum* обнаружены на наружном покрове и жабрах сазана, метацеркарии трематоды *Diplostomum spathaceum* обнаружены в хрусталике, патогены нематоды *Rhabdochona fortunatowi* в кишечнике, простейшие *Ichthyophthirius multifilii* обнаружены в жабрах.

У кавказского голавля обнаружен 1 вид гельминтов и 1 вид простейших. Патогены нематод *Rhabdochona fortunatowi* и простейшие *Chilodonella cyprini* были обнаружены в кишечнике кавказского голавля.

На основе наличия паразитов, обнаруженных у рыб, был проведен анализ результатов исследований.

Половозрелая форма нематоды *Rhabdochona fortunatowi* была обнаружена в кишечнике всех исследованных видов рыб. У ручьевой форели интенсивность инвазии составила 8%, у серебрянного карася -9,4%, у куринской храмули- 14,3%, у кавказского голавля -21,4%, у восточной быстрянки -12,5%, у курского усача -16,7%, у сазана - 11,0%.

Никаких видимых клинических признаков у рыб-носителей не наблюдались. Возбудители накапливались преимущественно в среднем отделе кишечника рыб, где и наблюдались кровоизлияния и очаговые воспаления слизистой оболочки. В процессе течения заболевания рабдохоном, по - видимому, нарушаются обменные процессы у рыб, поскольку они потребляют питательные вещества хозяина (рис. 1).

Согласно результатам наших предыдущих исследований, в кишечнике рыб, обитающих в реке Варагаджур, протекающей через Тавушскую область, были обнаружены круглые черви *Rhabdachona fortunatowi*, у куринского усача (Barbus lacerta), у куринский храмули (Capoeta capoeta). За пределами озера Севан эти нематоды были впервые обнаружены у рыб в реке Варагаджур [10].

Промежуточным хозяином нематоды *Rhabdachona fortunatowи* являются личинки мух, принадлежащих к родам Ephemerella, Walsh, 1862 и Heptagnia Walsh, 1863 [26].



Рис. 1. *Rhabdochona fortunatowi*

По данным некоторых исследователей (Иран, 2007г.) было выявлено, что интенсивность заражения рыб реки Шируд в определенной степени зависит от возраста рыб и климатических условий, при этом интенсивность заражения была наиболее высокой в октябре [23].

В бассейне реки Тигрис (Северный Ирак) были обнаружены два новых вида нематод, принадлежащих к семейству *Rhabdochonidae. Rhabdochona tigeridis* (Rahmo, 1978) и *Rhabdochona grandipapillata* (Rahmo, Kasim, 1979), которые отличались по своим структурным особенностям от *Rhabdochona* fortunatowi [27].

В результате проведенных нами исследований экстенсивность инвазии патогенов, обнаруженных у *Dactylogyrus vastator* (Nybelin 1924), составила у ручьевой форели (16,0%), у серебряного карася (21,8%), у восточной быстрянки (25,0%), у курского усача (22,2%), у сазана (17,8%) (рис. 2).

Со стороны ряда авторов были исследованы особи сазана (Alburnus tarichi Gudenstadt, 1814,) который является обитателем озера Ван, и приспособился к таким условиям обитания как высокая pH воды (9,8) и ее соленость (22%), зараженные *Dactylogyrus spp.*-ом. Из исследуемых 60 особей только у 8 были обнаружены паразиты. В период исследования авторы пришли к выводу, что вода озера способствует ограничению развития дактилогирусов [20].

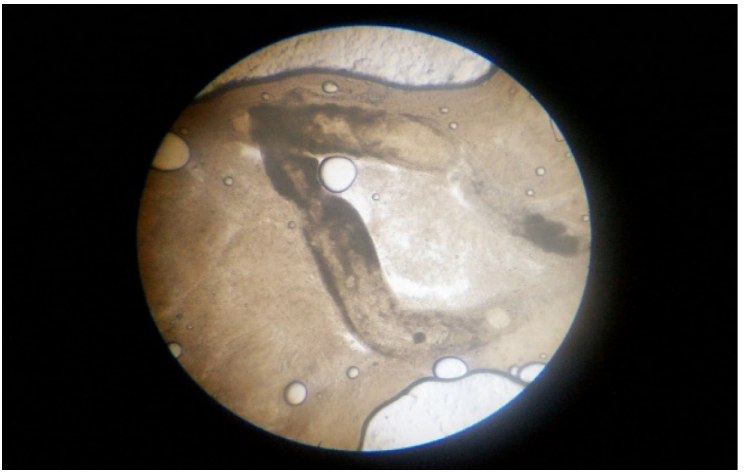


Рис. 2. *Dactylogyrus vastator*

Среди изученных нами видов рыб метацеркарии возбудителя *Diplostomum spathaceum* были обнаружены у ручьевой форели, степень инвазии составила 12,0 %, у курской храмули 74,3%, у курского усача 61,1%, у сазана 45,2%. Метацеркарии трематоды *Diplostomum rutili* обнаружены в глазном хрусалике ручьевой форели (ИЭ 56,0%) и курского усача (ИЭ 16,7%) (рис. 3).



Рис. 3. *Diplostomum spathaceum*

Некоторые личинки трематод также попадают в глаза рыб, вызывая слепоту. Заболевания, вызываемые трематодами в глазах рыб, называются офтальмогельминтозами [30].

Diplostomum spathaceum – один из наиболее распространенных паразитов рыб в пресноводных и аквакультурных системах Палеарктики [19].

Определенные работы по изучению паразитофауны рыб были проведены также в естественных и искусственных водоемах, расположенных на территории Республики Армения [1; 12; 13].

Как свидетельствуют результаты наших предыдущих исследований, у 126 рыб, привезенных из прудов и прудовых хозяйств Араратской, Армавирской, Котайкской, Арагацотнской областей, а также из рек и прудов Араратской долины, реки Раздан и озера Севан, было обнаружено 4 вида паразитов: *Diplostomum spathaceum, Diplostomum rutii, Diplostomum mergi* и *Tylodelphys clavata*. Метацеркарии *Diplostomum spathaceum* былі обнаружены у рыб в относительно благоустроенных водоемах, а *Diplostomum rutili* в условиях Армении, обнаруживаются в основном в кишечнике чаек, ястребов и грифов [9].

Потепление климата в северных регионах может также повлиять на размножение ракообразных *Argulus coregoni*, которые являются переносчиками *Diplostomum spathaceum*, что может привести к быстрому распространению заболевания [24].

Было обнаружено, что простейшие также присутствуют в большом количестве в жабрах, плавниках, наружном покрове почти всех изученных видов рыб, была определена интенсивность инвазии видов рыб, инфицированных хилодонеллезом, ихтиофтириозом и триходинозом.

Простейшие *Chilodonella cyprini* были обнаружены в жабрах, наружном покрове и в плавниках ручьевой форели, где экстенстивность инвазии составила 16.0%, у серебряного карася- ИЭ 15.6%, у восточной быстрянки - ИЭ 18.75%, у курской храмули - ИЭ 14.3%, у ковказского голавля - ИЭ 21.4%.

В бассейне реки Нил у рыб вида Нильская тилапия *(Oreochromis niloticus)* была обнаружена высокая зараженность Chilodonella sp.[28].

Два возбудителя хилодонеллеза были обнаружены у лососевых, выращиваемых в Финляндии. *Chilodonella piscicola* чаще всего встречается при более низких температурах воды. На высоте 4000 м на Тибетском нагорье у рыб был обнаружен впервые возбудитель *C. piscicola (C. cyprini)* [29].

Простейшие *Ichthyophthirius multifiliis* обнаружены на жабрах восточной быстрянки (ИЭ 25,0%), куринского усача (ИЭ 13,9%), сазана (ИЭ 17,8%) (рис. 4).



Рис. 4. *Ichthyophthirius multifiliis*

Ichthyophthirius multifiliis - это простейшее реснитчатое паразитическое растение, которое может вызвать 100% гибель рыб [21].

Ихтиофтириоз представляет серьезную проблему как для культивируемых, так и для пресноводных рыб во всем мире [25].

Простейшие *Trichodina nigra* нами обнаружены в жабрах ручьевой форели (ИЭ 12,0%), серебрянного карася (ИЭ 9,4%), восточной быстрянки (ИЭ 25,0%), куринского усача (ИЭ 13,9%), сазана (ИЭ 13,3%) (рис.5).

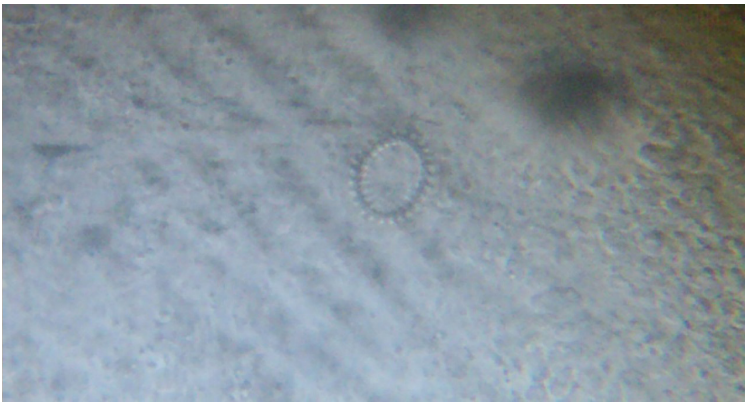


Рис. 5. *Trichodina nigra*

Пять видов Trichodina, в том числе Trichodina nigra (Lom, 1960), были выделены из Carassius auratus и Aristichthys nobilis у пресноводных рыб Чунцина, Китай [31].

Виды *Trichodina diaptomi, Trichodina heterodentata* и *Trichodina oligocotti* были выделены от некоторых пресноводных рыб штата Западная Бенгалия, Индия. Эти три вида были впервые обнаружены как в Индии, так и в регионе Южной Азии [22].

Четырнадцать видов паразитов рода *Trichodina (Ciliophora, Peritrichida)* были обнаружены у рыб 28 пресноводных водоемов Тайваня, пять из которых являются новыми видами [19].

Заключение

На основании данных исследований можно сделать следующий вывод:

В горных, быстротечных, холодных реках Тавушской области обитают ручьевая форель, усач, быстрянка и другие виды рыб, которые хорошо развиваются и в искусственных водоемах. Однако эти виды рыб также заражаются и болеют паразитарными заболеваниями. В ходе паразитологических исследований, проведенных в водоемах региона, у исследованных видов рыб (ручьевая форель, куринский усач, куринская храмуля, сазан, восточная быстрянка, серебряный карась, кавказский голавль) выявлены 4 вида гельминтов: моногенетичные *Dactylogyrus vastator*, метацеркарии трематод *Diplostomum spathaceum u Diplostomum rutili*, нематоды *Rhabdochona fortunatowi* и 3 вида простейших: *Chilodonella cyprini, Ichthyophthirius multifiliis u Trichodina nigra.*

В результате исследования паразитофауны выявлено, что из изученных видов рыб наиболее восприимчива к паразитарным заболеваниям ручьевая форель, у которой обнаружено 4 вида гельминтов и 3 вида простейших.

Среди выявленных возбудителей 7 изученных видов рыб в Тавушской области наиболее распространенным заболеванием является рабдохоноз, возбудитель которого зарегистрирован у всех изученных видов рыб.

Научной новизной нашей работы является многостороннее изучение паразитофауны рыб, обитающих в некоторых водоемах Тавушской области, которое проведено впервые нами.

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

Информация о спонсорстве. Работа выполнена по решению правительства Республики Армения по базовому финансированию научных тем в Армении.

Список литературы

1. Акопян, А. Р., Абрамян, В. В., Щербаков, О. В., Казарян, А. С., Григорян, В. В., & Григорян, Л. Г. (2024). Фауна нематод рыб Армении. *Российский паразитологический журнал*, 18(1), 14-22. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2024-18-1-14-22 EDN: https://elibrary.ru/kwppnd
2. Антипова, Л. В., & Батищев, В. В. (2001). Рыба как источник производства функционального питания. В *Материалы международной научной конференции «Функциональные продукты»* (Москва).
3. Айрапетян, Т. (2018). *Латино-армянско-русско-английский словарь армянских названий животных*. Ереван: Ереванский госуд. университет, с. 15-20.
4. Бауер, О. Н. (1984). *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР*. Том 1: Паразитические простейшие. Л.: Наука, 428 с.
5. Бауер, О. Н. (1985). *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР*. Том 2: Паразитические многоклеточные (1 часть). Л.: Наука, 425 с.
6. Бауер, О. Н. (1987). *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР*. Том 2: Паразитические многоклеточные (2 часть). Л.: Наука, 583 с.
7. Быховская-Павловская, И. Е. (1985). *Паразитологическое исследование рыб*, с. 3-63.
8. Быховская-Павловская, И. Е. (1985). *Паразиты рыб: руководство по изучению*. Л.: Наука, 121 с.
9. Григорян, В. В., Акопян, А. Р., Щербаков, О. В., & Григорян, Л. Г. (2022). Офтальмогельминтозы в водных бассейнах Армении. *Агронаука и технология*, 4(80), 383-388. https://doi.org/10.52276/25792822-2022.4-383
10. Григорян, В. В., Щербаков, О. В., Акопян, А. Р., & Григорян, Л. Г. (2022). Гельминты рыб реки Варагаджур. В *Сборник научных статей Гаварского государственного университета*, 13, 37-47.
11. Лысенко, А. А., & Христич, В. А. (2006). Паразитарные болезни прудовых рыб: способы лечения и профилактики. *Ветеринария Кубани*, (2), 23-24. EDN: https://elibrary.ru/kbybif
12. Оганесян, Р. Л. (2010). К видовому составу гельминтов рыб озера Севан. *Биологический журнал Армении*, 3(62), 34-37. EDN: https://elibrary.ru/tgbhpl
13. Оганесян, Л., Рухкян, М., Арутюнова, Л., Магомедова, М., & Магомедова, П. (2023). Гельминтофауна рыб озера Севан в период изменения уровня воды. *Юг России: экология, развитие*, 18(3).
14. Сайфуллин, Р. Р., Северов, Ю. А., & Шакирова, Ф. М. (2010). Синец Куйбишевского водохранилища в современных условиях развития его экосистемы. *Вестник ТГГПУ*, (4), 22.
15. Серветник, Г. Е. (2004). *Пути освоения сельскохозяйственных водоемов*. М.: 132 с.

16. Серветник, Г. Е., & Новоженин, Н. П. (2002). Сельскохозяйственное рыбоводство России: состояние, перспективы развития. *Вестник Россельхозакадемии*, (4), 28-30.
17. Чернышёва, Н. Б., Кузнецова, Е. В., Воронин, В. Н., & Стрелков, Ю. А. (2009). *Паразитологическое исследование рыб: методическое пособие*. ФГНУ «ГосНИОРХ», 20 с.
18. Basson, L., & Van As, J. (1994). Trichodinid ectoparasites (Ciliophora: Peritrichida) of wild and cultured freshwater fishes in Taiwan, with notes on their origin. *Systematic Parasitology*, 28, 197-222. https://doi.org/10.1007/bf00009518 EDN: https://elibrary.ru/tfnykj
19. Capasso, S., & Gutierrez, J. (2023). Diplostomum spathaceum. *Trends in Parasitology*, 39, 969-970.
20. Erdemir, A., Alkan, Z., Azizoğlu, E., Sepil, A., Oğuz, K., & Oğuz, A. (2023). Histopathology of the gills of Lake Van Fish Alburnus tarichi (Güldenstädt, 1814) infected with Dactylogyrus spp. parasites. *The Palawan Scientist*, 15(1), 34-40.
21. Francis-Floyd, R., Yanong, R., & Pouder, D. (2023). *Ichthyophthirius multifiliis (White Spot) Infections in Fish*. Publication Extension University of Florida, pp. 1-6.
22. Ghazi Asmat, S. (2004). First Record of Trichodina diaptomi (Dogiel, 1940) Basson and Van As, 1991, T. heterodentata Duncan, 1977 and T. oligocotti (Lom, 1970) (Ciliophora: Trichodinidae) from Indian Fishes. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7.
23. Golestaninasab, M., Malek, M., Jalali, B., & Mobedi, I. (2012). Variation in the sex ratio of Rhabdochona fortunatowi (Spirurida: Rhabdochonidae) in Capoeta capoeta gracilis (Cypriniformes: Cyprinidae), relative to levels of infection, host size and temperature. *Journal of Helminthology*, 86, 41-45.
24. Hakalhti, T., Karvonen, A., & Tellervo, E. (2006). Climate warming and disease risks in temperate regions – Argulus coregoni and Diplostomum spathaceum as case studies. *Journal of Helminthology*, 80(2), 93-98.
25. Jorgensen, L., & Puspasari, K. (2022). Infection by Ichthyophthirius multifiliis. In *Aquaculture Pathophysiology*, chapter 40, vol. I: Finfish Diseases, pp. 493-503.
26. Moravec, F. (1975). Reconstruction of the Nematode Genus Rhabdochona Railliet, 1916 with a Review of the Species Parasitic in Fishes of Europe and Asia. *Biology, Environmental Science*, Prague, 8, 104 p.
27. Moravec, F., Saraiva, A., & Abdullah, S. (2009). Two species of Rhabdochona Railliet, 1916 (Nematoda: Rhabdochonidae) parasitising cyprinid fishes in Iraq, with a redescription of R. tigridis Rahemo, 1978 (emend). *Systematic Parasitology*, 74(2), 125-135. https://doi.org/10.1007/s11230-009-9196-4 EDN: https://elibrary.ru/feyodi

28. Padua, S., Martins, M., Carrijo-Mauad, J., Ishikawa, M., Jeronimo, G., Dias-Netoa, J., & Pilarski, F. (2013). First record of Chilodonella hexasticha (Ciliophora: Chilodonellidae) in Brazilian cultured fish: A morphological and pathological assessment. *Veterinary Parasitology*, 191, 154-160.
29. Rintamaki, R., Torpstrom, H., & Bloigu, A. (1994). Chilodonella spp. at four fish farms in northern Finland. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 41(6), 602.
30. Sevastyanova, Yu. Yu. (2017). *Ocular forms of trematode metacercariae in fish from the Belgorod Reservoir*. 40 p.
31. Tang, F., Zhao, Y., & Tao, Y. (2007). Trichodinids (Ciliophora: Peritrichida) parasitic on gills of freshwater fishes, Carassius auratus and Aristichthys nobilis from China, with the description of Trichodina subtilihamata sp. nov. *Zootaxa*, 1582(1).

References

1. Akopyan, A. R., Abramyan, V. V., Shcherbakov, O. V., Kazaryan, A. S., Grigoryan, V. V., & Grigoryan, L. G. (2024). Nematode fauna of Armenian fish. *Russian Parasitological Journal*, *18(1)*, 14-22. https://doi.org/10.31016/1998-8435-2024-18-1-14-22 EDN: https://elibrary.ru/kwppnd
2. Antipova, L. V., & Batischev, V. V. (2001). Fish as a source of functional food production. In *Proceedings of the International Scientific Conference "Functional Products"* (Moscow).
3. Ayrapetyan, T. (2018). *Latin-Armenian-Russian-English dictionary of Armenian animal names*. Yerevan: Yerevan State University. Pp. 15-20.
4. Bauer, O. N. (1984). *Key to the parasites of freshwater fish of the USSR fauna*. Vol. 1: Parasitic protozoa. Leningrad: Nauka. 428 p.
5. Bauer, O. N. (1985). *Key to the parasites of freshwater fish of the USSR fauna*. Vol. 2: Parasitic multicellular organisms (Part 1). Leningrad: Nauka. 425 p.
6. Bauer, O. N. (1987). *Key to the parasites of freshwater fish of the USSR fauna*. Vol. 2: Parasitic multicellular organisms (Part 2). Leningrad: Nauka. 583 p.
7. Bykhovskaya-Pavlovskaya, I. E. (1985). *Parasitological study of fish*, pp. 3-63.
8. Bykhovskaya-Pavlovskaya, I. E. (1985). *Parasites of fish: a guide to study*. Leningrad: Nauka. 121 p.
9. Grigoryan, V. V., Akopyan, A. R., Shcherbakov, O. V., & Grigoryan, L. G. (2022). Ophthalmogelmintoses in the water basins of Armenia. *Agroscience and Technology*, *4(80)*, 383-388. https://doi.org/10.52276/25792822-2022.4-383
10. Grigoryan, V. V., Shcherbakov, O. V., Akopyan, A. R., & Grigoryan, L. G. (2022). Helminths of fish of the Vara river. In *Collection of scientific articles of Gavar State University*, *13*, 37-47.

11. Lysenko, A. A., & Khristich, V. A. (2006). Parasitic diseases of pond fish: methods of treatment and prevention. *Veterinary Medicine of Kuban*, *(2)*, 23-24. EDN: https://elibrary.ru/kbybif
12. Oganesyan, R. L. (2010). On the species composition of fish helminths of Lake Sevan. *Biological Journal of Armenia*, *3(62)*, 34-37. EDN: https://elibrary.ru/tgbhpl
13. Oganesyan, L., Rukhyan, M., Arutyunova, L., Magomedova, M., & Magomedova, P. (2023). Helminth fauna of fish of Lake Sevan during the period of water level change. *South of Russia: Ecology, Development*, *18(3)*.
14. Sayfullin, R. R., Severov, Yu. A., & Shakirova, F. M. (2010). Snezhka of the Kuibyshev reservoir in modern conditions of its ecosystem development. *Bulletin of TSPU*, *(4)*, 22.
15. Servetnik, G. E. (2004). *Ways of mastering agricultural water bodies*. Moscow. 132 p.
16. Servetnik, G. E., & Novozhenin, N. P. (2002). Agricultural fish farming in Russia: state, development prospects. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, *(4)*, 28-30.
17. Chernysheva, N. B., Kuznetsova, E. V., Voronin, V. N., & Strelkov, Yu. A. (2009). *Parasitological study of fish: a methodical guide*. FGNU "GosNIORKH". 20 p.
18. Basson, L., & Van As, J. (1994). Trichodinid ectoparasites (Ciliophora: Peritrichida) of wild and cultured freshwater fishes in Taiwan, with notes on their origin. *Systematic Parasitology*, 28, 197-222. https://doi.org/10.1007/bf00009518 EDN: https://elibrary.ru/tfnykj
19. Capasso, S., & Gutierrez, J. (2023). Diplostomum spathaceum. *Trends in Parasitology*, 39, 969-970.
20. Erdemir, A., Alkan, Z., Azizoğlu, E., Sepil, A., Oğuz, K., & Oğuz, A. (2023). Histopathology of the gills of Lake Van Fish Alburnus tarichi (Güldenstädt, 1814) infected with Dactylogyrus spp. parasites. *The Palawan Scientist*, 15(1), 34-40.
21. Francis-Floyd, R., Yanong, R., & Pouder, D. (2023). *Ichthyophthirius multifiliis (White Spot) Infections in Fish*. Publication Extension University of Florida, pp. 1-6.
22. Ghazi Asmat, S. (2004). First Record of Trichodina diaptomi (Dogiel, 1940) Basson and Van As, 1991, T. heterodentata Duncan, 1977 and T. oligocotti (Lom, 1970) (Ciliophora: Trichodinidae) from Indian Fishes. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7.
23. Golestaninasab, M., Malek, M., Jalali, B., & Mobedi, I. (2012). Variation in the sex ratio of Rhabdochona fortunatowi (Spirurida: Rhabdochonidae) in Capoeta capoeta gracilis (Cypriniformes: Cyprinidae), relative to levels of infection, host size and temperature. *Journal of Helminthology*, 86, 41-45.
24. Hakalhti, T., Karvonen, A., & Tellervo, E. (2006). Climate warming and disease risks in temperate regions – Argulus coregoni and Diplostomum spathaceum as case studies. *Journal of Helminthology*, 80(2), 93-98.

25. Jorgensen, L., & Puspasari, K. (2022). Infection by Ichthyophthirius multifiliis. In *Aquaculture Pathophysiology*, chapter 40, vol. I: Finfish Diseases, pp. 493-503.
26. Moravec, F. (1975). Reconstruction of the Nematode Genus Rhabdochona Railliet, 1916 with a Review of the Species Parasitic in Fishes of Europe and Asia. *Biology, Environmental Science*, Prague, 8, 104 p.
27. Moravec, F., Saraiva, A., & Abdullah, S. (2009). Two species of Rhabdochona Railliet, 1916 (Nematoda: Rhabdochonidae) parasitising cyprinid fishes in Iraq, with a redescription of R. tigridis Rahemo, 1978 (emend). *Systematic Parasitology*, 74(2), 125-135. https://doi.org/10.1007/s11230-009-9196-4 EDN: https://elibrary.ru/feyodi
28. Padua, S., Martins, M., Carrijo-Mauad, J., Ishikawa, M., Jeronimo, G., Dias-Netoa, J., & Pilarski, F. (2013). First record of Chilodonella hexasticha (Ciliophora: Chilodonellidae) in Brazilian cultured fish: A morphological and pathological assessment. *Veterinary Parasitology*, 191, 154-160.
29. Rintamaki, R., Torpstrom, H., & Bloigu, A. (1994). Chilodonella spp. at four fish farms in northern Finland. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 41(6), 602.
30. Sevastyanova, Yu. Yu. (2017). *Ocular forms of trematode metacercariae in fish from the Belgorod Reservoir*. 40 p.
31. Tang, F., Zhao, Y., & Tao, Y. (2007). Trichodinids (Ciliophora: Peritrichida) parasitic on gills of freshwater fishes, Carassius auratus and Aristichthys nobilis from China, with the description of Trichodina subtilihamata sp. nov. *Zootaxa*, 1582(1).

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации. С.В. Ерибекян помимо соавторства в статье, координирует переписку с редакцией журнала.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors contributed equally to the preparation of this article for publication. S.V. Yeribekyan, in addition to co-authoring the article, coordinates correspondence with the editors of the journal.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Лиана Гайковна Григорян, к.в.н., доцент, директор Исследовательского центра ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизы
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
lianagrigoryan7878@mail.ru

Акопян Ануш Рафиковна, к.в.н., доцент, ведущий научный сотрудник Исследовательского центра ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизы

Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
akobiananush@yandex.ru

Мелконян Жанна Сергеевна, канд. биол. наук, научный сотрудник Исследовательского центра ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизы
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
zhanna.smelkonyan1@gmail.com

Спартак Ваганович Ерибекян, ветеринарный врач, научный сотрудник Исследовательского центра ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизы
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
vivarium2016@mail.ru

Грачуи Симоновна Баласанян, ветеринарный врач, научный сотрудник Исследовательского центра ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизы
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
nanar.balasanyan.s@gmail.com

Валерий Володяевич Григорян, к.б.н., доцент, старший научный сотрудник Исследовательского центра ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизы, заведующий кафедрой эпизоотологии и паразитологии
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
grigoryanvgv@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Liana H. Grigoryan, Head of Research Center for Veterinary Medicine and Veterinary and Sanitary Expertise
Armenian National Agrarian University
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
lianagrigoryan7878@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8799-4568

Anush R. Hakobyan, Researcher, Research Center for Veterinary Medicine and Veterinary and Sanitary Expertise
Armenian National Agrarian University
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
akobiananush@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7781-3045

Zhanna S. Melkonyan, Researcher, Research Center for Veterinary Medicine and Veterinary and Sanitary Expertise
Armenian National Agrarian University
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
zhanna.smelkonyan1@gmail.com

Spartak V. Yeribekyan, DVM, Researcher at the Research Center of Veterinary and Veterinary Sanitary Expertise
Armenian National Agrarian University
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
vivarium2016@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9340-7894

Hrachuhi S. Balasanyan, DVM, Researcher at the Research Center of Veterinary and Veterinary Sanitary Expertise
Armenian National Agrarian University
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
nanar.balasanyan.s@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8279-7721

Valery V. Grigoryan, Researcher, Research Center for Veterinary Medicine and Veterinary and Sanitary Expertise
Armenian National Agrarian University
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
74, Teryan str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
grigoryanvgv@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0840-3961

Поступила 02.05.2024 Received 02.05.2024
После рецензирования 25.07.2024 Revised 25.07.2024
Принята 14.09.2024 Accepted 14.09.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1094 **EDN: CNOICA**
УДК 911.2 (911.6)

CC BY NC ND

Научная статья

ВОЗВРАЩЕНИЕ ЗАБРОШЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ В РЕЖИМ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МАСШТАБЫ ЭТОГО ПРОЦЕССА

А.С. Некрич

Аннотация

Обоснование. Возвращение заброшенных сельскохозяйственных угодий в режим аграрного производства особенно актуально для стран, перед которыми поставлена задача достижения независимости от агропродовольственного импорта.

Цель. На примере Брянской области – одного из лидеров в России по производству сельскохозяйственной продукции, провести исследование пространственного проявления процесса возвращения заброшенных сельскохозяйственных угодий в режим аграрного производства (реагрогенез) и выявить ключевые факторы, определяющие его направленность.

Материалы и методы. Исследование базируется на концепции сельскохозяйственного природопользования как фактора трансформации природного, эколого-географического и социально-экономического пространства. Использованы официальные данные за период 2014-2021 гг., применены методы математической статистики и проведен геопространственный анализ проявления реагрогенеза с учетом факторов, определяющих его направленность.

Результаты. Впервые выявлены ареалы, характеризующиеся общими чертами реагрогенеза. Установлены корреляционные связи между факторами, определяющими проявление реагрогенеза в границах выявленных ареалов. Показано, что масштабное вовлечение залежей в аграрный оборот началось в период действия российского продовольственного эмбарго. Определены факторы деаграризации (процесса обратного реагрогенезу).

Заключение. Установлено, что в пределах выявленных ареалов теснота связей между факторами, способствующими или сдерживающими проявле-

ние реагрогенеза, зависит от агроприродных особенностей территории, хозяйственной ориентации ее муниципальных районов, притока инвестиций в агропромышленный сектор, экологической и социально-экономической обстановки.

Ключевые слова: Брянская область; деаграризация; залежи; земельные ресурсы; реагрогенез

Для цитирования. Некрич, А. С. (2025). Возвращение заброшенных сельскохозяйственных угодий Брянской области в режим аграрного производства и факторы, определяющие масштабы этого процесса. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 590-609. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1094

Original article

INVOLVEMENT OF ABANDONED AGRICULTURAL LAND IN BRYANSK OBLAST TO AGRICULTURAL USE AND FACTORS DETERMINING THE SCALE OF THIS PROCESS

A.S. Nekrich

Abstract

Background. Involvement of abandoned land to agricultural turnover is especially relevant in countries are facing with a rising dependence from agri-food imports.

Purpose. The purpose of the research is to study the spatial occurrence of the process of abandoned agricultural land returning to agricultural use (re-agrogenesis) on the example of Bryansk Oblast – one of the leaders among Russian regions in agricultural production and to identify the key factors that determine its direction.

Materials and methods. The study is based on the concept of agricultural environmental management as a factor causing the transformation of natural, ecological, geographical, social, and economic space. Data for this study were gathered from the official statistical sources for the period 2014-2021. Methods of mathematical statistics were applied. Geospatial analysis of re-agrogenesis was carried out by taking into account the factors determining the directions of re-agrogenesis.

Results. The areas with similar characteristics of re-agrogenesis were identified. The factors defining agricultural land dynamics were determined. Correlation links between factors affecting landscapes are used for agricultural purposes and the dynamics

of agricultural lands within the boundaries of these areas were set. It is shown that in Bryansk Oblast the large-scale process of abandoned agricultural lands returning to agricultural use has started since the Russian food embargo introduction. The factors of a reverse process to re-agrogenesis (deagrarization) were determined.

Conclusion. The results of the study showed that the statistical relationships between the factors contributing or limiting the occurrence of re-agrogenesis within the determined areas are different. They depend on agro-environmnetal characteristics of the territory, economic orientation of the municipal districts, investments to the agro-industrial sector, and on environmental and socio-economic situation.

Keywords: Bryansk Oblast; deagrarization; abandoned agricultural lands; land resources; re-agrogenesis

For citation. Nekrich, A. S. (2025). Involvement of abandoned agricultural land in Bryansk Oblast to agricultural use and factors determining the scale of this process. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 590-609. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1094

Введение

В масштабах Российской Федерации наблюдаются существенные диспропорции в размещении площадей сельскохозяйственных угодий на федеральном, региональном и локальном уровнях, что связано с действием природно-климатических, экологических, социально-экономических, инвестиционных, логистических, институциональных и политических факторов, определяющих неоднородность аграрного освоения [2; 4; 8-11; 15-17]. В период 1900-1990 гг. изменение площадей сельскохозяйственных угодий было обусловлено не столько закономерностями территориального размещения сельского хозяйства и особенностями его развития, сколько политическими, военными и социально-экономическими факторами, а также действующим земельным законодательством [4]. В 1990-е годы основными факторами, влияющими на производство в сельском хозяйстве, стали: нехватка трудовых ресурсов, изменение институциональных механизмов регулирования земельных отношений, уменьшение государственного финансирования сельского хозяйства, износ сельскохозяйственной техники, сокращение внесения минеральных и органических удобрений. В эти годы из сельскохозяйственного оборота было выведено свыше 39 млн. га пахотных земель с низкой урожайностью [11]. В постсоветский период и до 2000-х гг. продолжалось увеличение площадей неиспользуемых сельскохозяйственных угодий [4], а начиная с 2014 г. в большинстве аграрно-ориентированных субъектов РФ наблюдается реагрогенез – возвраще-

ние ландшафтов в режим аграрного производства, при котором факторы развития сельского хозяйства и его отраслей определяют структуру, функционирование и динамику ландшафтов. Изучение закономерностей этого процесса приобретает особую актуальность, которая усиливается по мере реализации задач социально-экономического развития государства [25].

Возвращение неиспользуемых сельскохозяйственных угодий в аграрный оборот является актуальным и экономически востребованным во многих странах мира [17; 19; 21; 26; 27]. Сравнительный анализ российских и зарубежных научно-исследовательских и практических работ по вопросу возвращения ландшафтов в режим аграрного производства показал, что большинство государств, обладающих благоприятным агроклиматическим потенциалом, заинтересовано в поддержании собственной продовольственной независимости, в том числе, за счет возвращения залежных земель в аграрный оборот [15; 17; 18; 20; 21; 24; 26]. Неиспользуемые сельскохозяйственные угодья на территории России становятся значимым ресурсом для расширения сельскохозяйственного производства при существующей аграрной политике государства и действия внешних ограничений [11]. Возвращение ландшафтов в аграрное производство приобретает стратегическое значение для поддержания продовольственной безопасности сельскохозяйственно-ориентированных регионов России [3]. При этом необходимо внедрение механизмов государственной поддержки отечественных сельскохозяйственных товаропроизводителей [7].

Цель исследования. Географические закономерности проявления реагрогенеза на территории РФ практически не изучены. В связи с этим, в настоящей работе была поставлена ***цель*** – на примере Брянской области, одного из лидеров в России по производству сельскохозяйственной продукции, провести исследование пространственного проявления процесса возвращения заброшенных сельскохозяйственных угодий в режим аграрного производства (реагрогенез) и выявить ключевые факторы, определяющие его направленность.

Научная новизна работы. Впервые для Брянской области в разрезе муниципальных районов проведены исследования по выявлению тенденций пространственного проявления реагрогенеза в условиях меняющейся природной, экологической и социально-экономической ситуации и рисков обеспечения стабильности сельскохозяйственного производства. Традиционные для географии комплексные научные подходы дополнены методическим алгоритмом, предусматривающим анализ пространственного проявления реагрогенеза в соответствии с современными условиями

хозяйствования региона и взаимовлияния факторов, которые определяют направленность этого процесса. Установлены корреляционные связи между динамикой площадей залежных земель, вовлекаемых в аграрное производство, и этими факторами. Предложено рассматривать реагрогенез как составную часть решения задач по обеспечению продовольственной безопасности. Выделены ареалы, образующие пространственно-факторную структуру проявления реагрогенеза во внутрирегиональном масштабе, сформировавшуюся в условиях необходимости импортозамещения в аграрном секторе экономики.

Брянская область – субъект Российской Федерации, в котором сельскохозяйственные угодья занимают 53,8% площади территории и сельское хозяйство обеспечивает до 20% объема валового регионального продукта области [13]. В 19-ти из 27-ми муниципальных районах (МР) освоенность земель составляет от 55 до 77%. Обеспеченность населения пашней достигает 0,9 га/чел. [6]. С 2014 г. в области отмечается эффективное развитие сельского хозяйства на внутрирегиональном уровне [6]. Введено в оборот 28,1 тыс. га, площади посевов сельскохозяйственных культур увеличились на 102 тыс. га [5, 13].

Для достижения цели исследования были поставлены следующие ***задачи***:

1. Проанализировать тенденции пространственного проявления реагрогенеза в Брянской области за период 2014-2021 гг. с привлечением официальных данных земельной статистики и картографического материала.

2. Выявить ареалы, характеризующиеся общей направленностью реагрогенеза (используя данные о ежегодной динамике площадей залежных земель, введенных в сельскохозяйственный оборот с 2014 по 2021 гг.), с учетом действующей структуры внутрирегиональной экономики, долговременных средоформирующих (природных) и антропогенных факторов.

3. Определить совокупность ключевых факторов, влияющих на процесс возвращения заброшенных угодий в режим аграрного производства.

4. Установить корреляционные связи между динамикой площадей залежных земель, вовлекаемых в аграрный оборот, и влияющими на нее факторами в годы действия российского продовольственного эмбарго.

Работа имеет важное практическое значение в связи с реализацией государственных программ «Комплексное развитие сельских территорий» (2020-2025 гг.), «Эффективное вовлечение в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развитие мелиоративного комплекса Российской Федерации» (2021-2030 гг.) и реализации мероприятий по улучшению экологической обстановки на территории Брянской области.

Во время экономического кризиса 1990-х гг. в Брянской области площади залежей достигли 141,3 тыс. га. Произошло сокращение площади пашни на 133 тыс. га (с 1990 по 2013 гг.). Объемы валового сбора продуктов растениеводства снизились в 1,8 раз [1]. Возникла необходимость задействования неиспользуемых сельскохозяйственных угодий в аграрном обороте. После 2010-х гг. в области отмечается территориальная стабилизация площадей залежных земель, а с 2014 г. во всех МР, экономика которых базируется на отраслях сельского хозяйства, наблюдается процесс возвращения залежных земель в аграрный оборот [21]. Объемы производства растениеводческой продукции в области увеличились в 4 раза [1].

Природно-климатические условия Брянской области в сочетании с густой речной сетью и наличием дерново-подзолистых и серых лесных почв позволяют экономически эффективно развивать растениеводство (средняя урожайность зерновых составляет 54,9 ц/га, картофеля – 317 ц/га) [13]. В то же время длительные сельскохозяйственные нагрузки привели к деградации земель [12; 22]. К 2021 г. нарушенные земли занимали 69,1 тыс. га [13]. Доля сельского населения области – 29,6% [13]. Средняя плотность экономически активного сельского населения не превышает 75 чел. на тыс. га сельскохозяйственных угодий. Среди мощного фактора, ограничивающего развитие сельского хозяйства, последствия катастрофы на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), произошедшей в 1986 г. Западные и частично северо-восточные районы Брянской области подверглись радиоактивному загрязнению. Площадь непригодной пашни достигла 483 тыс. га [12].

Материалы и методы исследования

В основе методики выявления пространственного проявления реагрогенеза в Брянской области лежат взаимосвязи экологических, природно-климатических и социально-экономических факторов, определяющих направление динамики площадей залежных земель на внутрирайонном уровне в период 2014-2021 гг.

На первом этапе исследования были установлены ареалы, вмещающие МР со схожей динамикой площадей сельскохозяйственных угодий, характером сельскохозяйственного и промышленного природопользования, изменением социальной и экономической обстановки. Учитывался характер экологической ситуации и агроприродных условий. Оценка равномерности/неравномерности проявления реагрогенеза проводилась на основе картографических материалов о распределении площадей залежей

в границах МР за исследуемый период. Под равномерным проявлением реагрогенеза понимается, что увеличение площадей, вовлекаемых в сельскохозяйственный оборот, происходит в каждом МР выделяемого ареала. При этом массивы залежных земель, введенных в аграрный оборот, расположены по всей территории МР. Под неравномерностью проявления реагрогенеза понимается, что не в каждом МР, выделяемого ареала, наблюдается увеличение площадей, вовлекаемых в сельскохозяйственный оборот (есть районы, в которых происходит деаграризация – процесс обратный реагрогенезу).

Далее, в границах установленных ареалов были определены значимые показатели, влияющие на ход динамики площадей залежных земель. Эти показатели были внесены в базу данных (БД): *природные* (изменение площадей земель подверженных эрозии, оврагообразованию и карсту), *экологические* (изменение площадей полигонов размещения твердых бытовых отходов (ТБО) и отходов производства (ОП); изменение площадей территорий, регулярно подвергающихся сбросам сточных вод повторного использования; изменение площадей земель, загрязняемых выбросами промышленных и сельскохозяйственных предприятий; наличие радионуклидного загрязнения), *хозяйственные* (изменение площадей сельскохозяйственных угодий, нарушенных в ходе функционирования промышленного, горнодобывающего и сельскохозяйственного комплексов), *социально-экономические* (динамика численности экономически активного сельского населения; динамика объемов инвестиций, поступающих в агропромышленный комплекс (АПК); изменение количества рентабельных сельскохозяйственных организаций и предприятий). С помощью приложения MS Excel были установлены корреляционные связи между выбранными показателями и динамикой площадей залежных земель, возвращаемых в аграрный оборот в каждом МР Брянской области.

Выявление взаимосвязи между динамикой площадей залежных земель, вовлекаемых в аграрный оборот (в %), и изменением величины факторов из БД (в %) в период 2014-2021 гг. на внутрирайонном уровне в границах каждого установленного ареала было произведено с помощью коэффициента линейной корреляции Пирсона, который рассчитывался в приложении MS Excel (функция «коррел», которая возвращает коэффициент корреляции двух массивов данных). Теснота корреляционной связи оценивалась по «шкале Чеддока» [14]. Все выявленные зависимости описываются линейными функциями с коэффициентом достоверности

аппроксимации $R^2 > 0{,}70$. Для проверки статистической значимости коэффициента корреляции использовался *t*-критерий Стьюдента. Частота измерений (*n*) для каждого ареала соответствовала количеству муниципальных районов (МР), образующих данный ареал. Число степеней свободы (*df*) для каждого ареала определялось по формуле: $df = (n_1 + n_2) - 2$. Критическое значение *t*-критерия Стьюдента ($t_{кр}$) для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$ (при котором корреляционная связь значимая) с учетом числа степеней свободы (*df*) сравнивалось с рассчитанным. Рассчитанное значение *t*-критерия Стьюдента оказалось больше $t_{кр}$, что свидетельствует о статистической значимости *r* (уровень значимости < 0,05).

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью программной среды ArcGIS 3.2 (ESRI) были выявлены ареалы, характеризующиеся общей спецификой проявления реагрогенеза в условиях действующего сельскохозяйственного и промышленного природопользования в период 2014-2021 гг. (рис. 1).

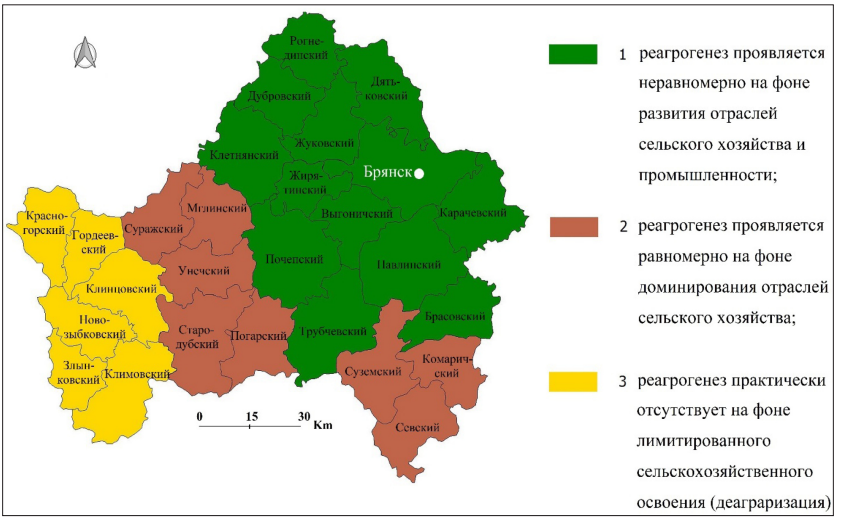


Рис. 1. Ареалы, характеризующиеся общими чертами проявления реагрогенеза в Брянской области (с 2014 по 2021 гг.).

С помощью методов корреляционного анализа в пределах каждого выделяемого ареала были установлены связи между изменением площадей залежных земель и определяющими это изменение факторами (таблица).

Таблица 1.

Корреляционные связи между ключевыми факторами, определяющими масштабы проявления реагрогенеза в Брянской области

Ключевые факторы, влияющие на реагрогенез на внутрирегиональном уровне	Динамика площадей залежных земель, возвращаемых в аграрный оборот в пределах ареалов, где реагрогенез проявляется:			
	неравномерно на фоне развития отраслей сельского хозяйства и промышленности	равномерно на фоне доминирования отраслей сельского хозяйства:		практически отсутствует на фоне лимитированного сельскохозяйственного освоения
		центральная часть	юго-восточная часть	
	Коэффициенты корреляции (r)			
Природные (изменение площади): овраги и балки	0,27	–	- 0,82	–
карст	–	–	- 0,69	- 0,37
Природные и хозяйственные (изменение площади): эрозионные земли	0,42	–	- 0,82	0,82
Хозяйственного освоения (изменение площади): распаханные земли	0,55	0,48	0,55	–
земли, нарушенные в ходе функционирования промышленного и горнодобывающего комплекса (ГДК)	- 0,46	–	- 0,82	0,37
Социально-экономические (динамика показателей): численность экономически активного сельского населения	- 0,48	- 0,41	- 0,80	- 0,48
количество рентабельных сельскохозяйственных организаций и предприятий	0,25	- 0,73	–	–
инвестиции в АПК	0,23	- 0,69	- 0,62	0,22
Экологические (изменение площади): размещение полигонов ТБО и ОП	0,42	- 0,26	–	–
земли, подвергающиеся сбросам сточных вод повторного использования	0,29	–	–	–
загрязнение почв в результате деятельности промышленных предприятий	–	–	- 0,25	- 0,80
наличие радионуклидного загрязнения	- 0,60	–	–	- 0,86

1. Ареал, где реагрогенез проявляется неравномерно на фоне развития отраслей сельского хозяйства и промышленности, вмещает МР Брянской области с эффективным сельскохозяйственным землепользованием [6]. Ареал находится под сильным прессом техногенных и сельскохозяйственных нагрузок, приводящих к нарушениям компонентов агроландшафта и сокращению биоразнообразия [18, 22, 23]. Ведется разработка месторождений открытым способом при отсутствии рекультивации земель, размещаются полигоны ТБО и промплощадки, происходит загрязнение земель промышленными выбросами и регулярными сбросами сточных вод повторного использования, зафиксирован след радиационного загрязнения почв (^{137}Cs от 1 до 5 Ки/км^2) на северо-востоке ареала [2]. Выявлены зависимости: чем масштабнее увеличение площадей, нарушенных промышленной деятельностью, тем масштабнее сокращение площадей залежных земель, пригодных для вовлечения в аграрный оборот (r = - 0,46); на фоне роста площадей складирования ТБО увеличиваются площади заброшенных сельскохозяйственных угодий (r = 0,42); с увеличением площадей эродированных земель (густота эрозионного расчленения достигает 2 км/км^2) увеличиваются площади залежей (r = 0,42). Тем не менее, с 2014 по 2021 гг. практически во всех МР ареала посевные площади увеличились в 1,2 раза (лидеры: Карачаевский и Выгоничский районы). Площадь залежных земель, введенных в аграрный оборот, составила 6,8 тыс. га. Исключение: северо-восточные промышленно-ориентированные районы (Дятьковский, Брянский и Жуковский), где произошло уменьшение площадей сельскохозяйственных земель на 4-6% в результате их перевода в земли промышленности, объектов горнодобывающего комплекса (ГДК), населенных пунктов [*13*].

Установлено, что изменение площадей неиспользуемых сельскохозяйственных угодий сопряжено с динамикой численности трудоспособного сельского населения и с изменением поступления объемов инвестиций в АПК. Так, сокращение численности сельского населения способствует развитию деаграризации (r = - 0,48), а с возрастанием объемов инвестиций в АПК увеличиваются площади залежных земель, вовлекаемых в оборот (r = 0,23). Однако увеличение количества рентабельных сельскохозяйственных предприятий, во всех районах анализируемого ареала, составило лишь 2%, даже на фоне поступления инвестиций в АПК. Отток трудоспособного сельского населения достигает 10% [1].

2. Ареал, где реагрогенез проявляется равномерно на фоне доминирования отраслей сельского хозяйства вмещает 5 МР в *центральной* и 3 МР

в *юго-восточной* частях Брянской области, в том числе районы, лидирующие в Брянской области по урожайности сельскохозяйственных культур: Севский (45 ц/га), Стародубский (40 ц/га) и Комаричский (35 ц/га). Ежегодное (с 2014 по 2021 гг.) увеличение площадей залежей, возвращаемых в сельскохозяйственный оборот, отмечено в каждом МР выделяемого ареала (всего введено 13,4 тыс. га). За счет вовлечения площадей залежей в аграрный оборот произошло увеличение площади пашни: в *центральной части* рост составил 35,1%, в *юго-восточной* – 60,1%.

Реагрогенез в *юго-восточной части* (Суземский, Комаричский и Севский районы) ограничивается высокой степенью эрозии земель (до 80%), распространением карста (количество карстовых воронок достигает 60 на км^2) и оврагообразованием. Среди основных экологических факторов-ограничителей – загрязнение территорий выбросами промышленных предприятий [24].

В *центральной* части (Суражский, Мглинский, Унечский, Стародубский и Погарский районы) к таким ограничителям относятся увеличивающиеся площади складирования ТБО и ОП [2, *13, 24*]. В северных районах центральной части отмечено наличие почв, подверженных заболачиванию (5% от площади сельскохозяйственных угодий переувлажнены) [5]. В южных районах (Стародубский и Погарский) развиваются карстовые процессы: увеличение площади территорий проявления карста сопровождается уменьшением площадей залежей, вовлекаемых в оборот (r = - 0,69).

Как для *юго-восточной* части, так и для *центральной* уменьшение численности трудоспособного сельского населения является мощным негативным фактором, препятствующим устойчивому аграрно-ориентированному развитию экономики районов. В *юго-восточной* части зависимость между динамикой численности сельского населения и изменением площадей залежей, вовлекаемых в аграрный оборот, более устойчивая (r = - 0.80), чем в *центральной* (r = - 0,41).

Следует отметить, что в ареале наблюдается выраженная линейная корреляция: чем масштабнее увеличение площадей залежей, вновь вовлекаемых в аграрный оборот, тем масштабнее распаханность (r = 0,55 и r = 0,48 соответственно).

3. Западный приграничный с Республикой Беларусь ареал, где реагрогенез практически отсутствует на фоне лимитированного сельскохозяйственного освоения, отличается самыми высокими темпами оттока трудоспособного населения, занятого в сельском хозяйстве (уменьшение достигает 20%) [1, 13]. АПК находится в состоянии затяжного кризиса с

1990-х гг. (объемы поступления инвестиций в среднем в 2 раза ниже, чем во всех районах Брянской области). За период 2014-2021 гг. количество убыточных сельскохозяйственных предприятий возросло в 1,5 раза. Площади залежей увеличились на 2 тыс. га, за исключением Красногорского района (введены в оборот земли с плотностью загрязнения ^{137}Cs = 40 Ки/км^2) [*13*]. Широко распространены карстовые процессы и наблюдается масштабная эрозия [24]. Установлено, что по мере увеличения площадей эродированных земель происходит увеличение площадей залежей (r = 0,82). Среди главных экологических факторов, препятствующих развитию сельского хозяйства – след радиационного загрязнения (^{137}Cs = 5-15 Ки/км^2), увеличивающаяся площадь полигонов размещения ТБО и низкое плодородие почв (средневзвешенное содержание гумуса составляет 1,8%) [2, 13]. Падение урожайности сельскохозяйственных культур достигает 20% [5, 13]. Отмечается уменьшение площадей посевов сельскохозяйственных культур (в среднем на 5%) на фоне увеличения площадей многолетних насаждений (до 7%). Численность сельского населения уменьшилась на 20% (с 2014 по 2021 гг.) [1, 5, 13].

Выводы

На основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Процесс возвращения залежных земель в аграрный оборот на территории Брянской области ускорился в период действия российского продовольственного эмбарго (за исключением северо-восточных промышленно-ориентированных районов и районов, где наблюдается деаграризация). Сформировались специфичные ареалы с общими чертами реагрогенеза: *1) реагрогенез проявляется неравномерно на фоне развития отраслей сельского хозяйства и промышленности* (территория 13-ти МР, расположенных в восточной и северо-восточной частях); *2) реагрогенез проявляется равномерно на фоне доминирования отраслей сельского хозяйства* (вмещает 5 МР в центральной части и 3 в юго-восточной); *3) реагрогенез практически отсутствует на фоне лимитированного сельскохозяйственного освоения* (6 МР в западной части).

2. В границах ареала, где *реагрогенез проявляется неравномерно*, площади возвращаемых в аграрный оборот залежей увеличились на 6,8 тыс. га. Ведущие факторы, препятствующие равномерному проявлению реагрогенеза: расширение площадей промышленных объектов и сопутствующей инфраструктуры, след радиационного загрязнения в северо-восточных районах, увеличение площади полигонов ТБО и ОП, рост

площадей эрозионно-опасных земель, недостаточная обеспеченность трудовыми ресурсами для сельскохозяйственной деятельности. В ареалах, где *реагрогенез проявляется равномерно*, наблюдается увеличение площадей залежей, возвращаемых в аграрный оборот, на 13,4 тыс. га, даже несмотря на действующие факторы-ограничители. В ареале, где *реагрогенез практически отсутствует*, площадь залежей увеличились на 2 тыс. га. Ключевые факторы, способствующие деаграризации: наличие экологических проблем, связанных с радиационным загрязнением территории после аварии на ЧАЭС, низкие объемы поступления инвестиций в АПК и уменьшение численности сельского населения.

3. В границах всех ареалов проявления реагрогенеза, наблюдаются устойчивые корреляционные связи между динамикой площадей залежных земель, вовлекаемых в сельскохозяйственный оборот, и влияющими на нее ключевыми факторами. Теснота этих связей (количественно выражаемая величиной коэффициента корреляции) различна и зависит от условий локально меняющейся природной среды, эколого-географической и социально-экономической ситуации, а также объемов поступления инвестиций, направляемых на поддержку агробизнеса на внутрирайонном уровне.

Проведенная работа закладывает начало исследованиям для регионов, перед которыми стоит задача укрепления собственной аграрной безопасности и нацеленных на устойчивое развитие сельского хозяйства. Подходы, предлагаемые в настоящей статье, могут в дальнейшем применяться для оценки роли реагрогенеза в поддержании аграрной стабильности регионов.

Информация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено по теме Государственного задания ИГ РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8).

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность д.г.н. Д.И. Люри, чл.-корр. А.А. Тишкову и д.г.н. С.В. Горячкину.

Список литературы

1. База данных показателей муниципальных образований [Электронный ресурс]. Официальный сайт Росстата. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/munst.htm (дата обращения: 01.06.2024).
2. Белоусова, А. П., & Руденко, Е. Э. (2021). Интегральная оценка влияния разнохарактерной техногенной нагрузки на экологическое состояние Брян-

ской области. *Вода и экология: проблемы и решения*, 3(87), 16-32. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.3.16-32 EDN: https://elibrary.ru/dmrdkm

3. Власова, О. В. (2019). Инвестиционный кризис как причина стагнации экономики России в условиях санкций. *Вестник НГИЭИ*, 5(96), 86-94. URL: https://disk.yandex.ru/i/8uVTevrQPugAdQ
4. Люри, Д. И., Горячкин, С. В., Караваева, Н. А., Денисенко, Е. А., & Нефедова, Т. Г. (2010). *Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв*. М.: ГЕОС, 416 с.
5. *Доклад о состоянии и использовании земель в Брянской области в 2014 году*. (2014). Брянск: Росреестр по Брянской области, 57 с.
6. Долганова, В. М. (2018). Географический анализ и оценка эффективности землепользования сельскохозяйственными организациями Брянской области. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*, 4, 424-440. https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-424-440 EDN: https://elibrary.ru/vqcguu
7. Тарасова, О. Н., Проданова, Н. А., Харакоз, Ю. К., & Георгадзе, Н. Д. (2023). Зеленая таксономия аграрно-промышленного комплекса России: текущий статус и направления развития. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(2), 337-362. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-337-362 EDN: https://elibrary.ru/rpokid
8. Некрич, А. С., & Люри, Д. И. (2019). Изменения динамики аграрных угодий России в 1990-2014 гг. *Известия РАН. Серия географическая*, 3, 64-77. https://doi.org/10.31857/S2587-55662019364-77 EDN: https://elibrary.ru/budria
9. Некрич, А. С., & Люри, Д. И. (2016). Факторы динамики посевных земель в кризисный период во внутриобластном масштабе (на примере Курской области). *Известия РАН. Серия географическая*, 1, 123-130. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-123-130 EDN: https://elibrary.ru/vuavjn
10. Павлова, А. И. (2023). Агроэкологическая типизация сельскохозяйственных земель с применением методов машинного обучения, ГИС и ДДЗЗ. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(6), 72-88. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-6-960 EDN: https://elibrary.ru/mjyopo
11. Шагайда, Н. И., Светлов, Н. М., Узун, В. Я., Логинова, Д. А., & Прищепов, А. В. (2018). *Потенциал роста сельскохозяйственного производства России за счет вовлечения в оборот неиспользуемых сельскохозяйственных угодий*. М.: РАНХиГС, 70 с.
12. Ахромеев, Л. М., Бастраков, Г. В., Булохов, А. Д., Булохова, Н. А., Васильева, Р. М., Данилов, Ю. Г., Демихов, В. Т., Долганова, М. В., Сулоев, А. Т.,

Шарапаев, И. В., & Шевченков, П. Г., Шевченкова, Т. Ф. (2012). *Природа и природные ресурсы Брянской области*. Брянск: Курсив, 320 с.

13. Левкина, Г. В. (ред.). (2022). *Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области. Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2021 году*. Брянск: Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, 220 с.
14. Котеров, А. Н., Ушенкова, Л. Н., Зубенкова, Э. С., Калинина, М. В., Бирюков, А. П., Ласточкина, Е. М., Молодцова, Д. В., & Вайнсон, А. А. (2019). Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*, 64(6), 12-24. https://doi.org/10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24 EDN: https://elibrary.ru/daeyng
15. Максимова, Т. П., Бондаренко, Т. Г., Жданова, О. А., & Проданова, Н. А. (2023). Система взаимосвязи трансформационных процессов хозяйственных аграрных структур и проблемы устойчивой продовольственной безопасности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(2), 485-506. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-485-506 EDN: https://elibrary.ru/ebgkm
16. Дудукалов, Е. В., Золочевская, Е. Ю., Сорокина, М. Ю., & Мангушева, Л. С. (2022). Структуризация экономического пространства малых форм ведения бизнеса в АПК. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(2), 176-215. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-2-176-215 EDN: https://elibrary.ru/gnzgcb
17. Meyfroidt, P., Schierhorn, F., Prishchepov, A., Müller, D., & Kuemmerle, T. (2016). Drivers, constraints and trade-offs associated with recultivating abandoned cropland in Russia, Ukraine and Kazakhstan. *Global Environmental Change*, 37, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.10.007 EDN: https://elibrary.ru/vrmpaj
18. Suchkov, D. K., Sorgutov, I. V., Gavrilieva, N. K., & Grigoriev, A. V. (2021). Economic aspects of the ecological approach to the development of agriculture at the present stage. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(5), 120-132. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-120-132 EDN: https://elibrary.ru/ahvndg
19. Hu, Q., Xiang, M., Chen, D., Zhou, J., Wu, W., & Song, Q. (2020). Global cropland intensification surpassed expansion between 2000 and 2010: a spatio-temporal analysis based on GlobeLand30. *Science of the Total Environment*, 746, 141035. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141035 EDN: https://elibrary.ru/ckkkpp
20. Kovaleva, E. A., & Ivanyo, Y. M. (2022). Management models of agrarian production taking into account natural and technogenic impacts on the environment.

Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 14(3), 24-39. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-24-39 EDN: https://elibrary.ru/eoeuag

21. Krinichnaya, E., & Egorova, O. (2020). Return of unused land to agricultural production. *E3S Web of Conferences*, 210, 09003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021009003 EDN: https://elibrary.ru/nqqhep
22. Nekrich, A. S. (2024). Ecological networks as a means for maintaining the sustainability of agroecosystems in Bryansk Oblast. *E3S Web of Conferences*, 555, 04007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455504007 EDN: https://elibrary.ru/ojsyaw
23. Nekrich, A. S. (2024). Enhancing environmental sustainability and biodiversity conservation in agrarian-oriented districts of Bryansk Oblast. *E3S Web of Conference*, 486, 07003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448607003 EDN: https://elibrary.ru/fujxvr
24. Nekrich, A. S. (2023). Transformation of ecosystems in Bryansk Oblast caused by the agro-industrial complex development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1212, 012020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1212/1/012020 EDN: https://elibrary.ru/gyfssr
25. Amirova, E. F., Gavrilyeva, N. K., Romanishina, T. S., & Asfandiarova, R. A. (2022). On the problem of the development of 'sustainable' agriculture in modern economic realities. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(3), 392-406. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-392-406 EDN: https://elibrary.ru/syndur
26. Osawa, T., Kohyama, K., & Mitsuhashi, H. (2016). Multiple factors drive regional agricultural abandonment. *Science of the Total Environment*, 542(Part A), 478-483. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.067 EDN: https://elibrary.ru/vglorp
27. Plieninger, T., Draux, H., Fagerholm, N., Bieling, C., Bürgi, M., Kizos, T., Kuemmerle, T., Primdahl, J., & Verburg, P. (2016). The driving forces of landscape change in Europe: a systematic review of the evidence. *Land Use Policy*, 57, 204-214. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.040 EDN: https://elibrary.ru/wufkzh

References

1. Database of municipal indicators [Electronic resource]. Official website of Rosstat. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/munst.htm (Accessed: June 1, 2024).
2. Belousova, A. P., & Rudenko, E. E. (2021). Integral assessment of the impact of diverse anthropogenic load on the ecological state of the Bryansk

region. *Water and Ecology: Problems and Solutions*, *3(87)*, 16-32. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.3.16-32 EDN: https://elibrary.ru/dmrdkm

3. Vlasova, O. V. (2019). Investment crisis as a cause of the Russian economy stagnation under sanctions. *Bulletin of NGIEI*, *5(96)*, 86-94. URL: https://disk.yandex.ru/i/8uVTevrQPugAdQ
4. Lyuri, D. I., Goryachkin, S. V., Karavaeva, N. A., Denisenko, E. A., & Nefedova, T. G. (2010). *Dynamics of agricultural lands in Russia in the 20th century and post-agricultural vegetation and soil recovery*. Moscow: GEOS. 416 p.
5. Report on the state and use of land in the Bryansk region in 2014. (2014). Bryansk: Rosreestr of the Bryansk region. 57 p.
6. Dolganova, V. M. (2018). Geographical analysis and assessment of land use efficiency by agricultural organizations of the Bryansk region. *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*, *4*, 424-440. https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-424-440 EDN: https://elibrary.ru/vqcguu
7. Tarasova, O. N., Prodanova, N. A., Kharakoz, Yu. K., & Georgadze, N. D. (2023). Green taxonomy of the agro-industrial complex of Russia: current status and development directions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15(2)*, 337-362. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-337-362 EDN: https://elibrary.ru/rpokid
8. Nekrich, A. S., & Lyuri, D. I. (2019). Changes in the dynamics of Russian agricultural land in 1990-2014. *Izvestiya RAS. Series: Geographical*, *3*, 64-77. https://doi.org/10.31857/S2587-55662019364-77 EDN: https://elibrary.ru/budria
9. Nekrich, A. S., & Lyuri, D. I. (2016). Factors of sown land dynamics in a crisis period at the intra-regional scale (on the example of the Kursk region). *Izvestiya RAS. Series: Geographical*, *1*, 123-130. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-123-130 EDN: https://elibrary.ru/vuavjn
10. Pavlova, A. I. (2023). Agroecological typification of agricultural lands using machine learning methods, GIS and remote sensing data. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15(6)*, 72-88. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-6-960 EDN: https://elibrary.ru/mjyopo
11. Shagayda, N. I., Svetlov, N. M., Uzyun, V. Ya., Loginova, D. A., & Pryshchepov, A. V. (2018). *Potential for growth of agricultural production in Russia through the involvement of unused agricultural land*. Moscow: RANEPA. 70 p.
12. Akhromeev, L. M., Bastrokov, G. V., Bulokhov, A. D., Bulokhova, N. A., Vasilieva, R. M., Danilov, Yu. G., Demikhov, V. T., Dolganova, M. V., Sulev,

A. T., Sharapaev, I. V., Shevchenko, P. G., & Shevchenko, T. F. (2012). *Nature and natural resources of the Bryansk region*. Bryansk: Kursiv. 320 p.

13. Levkina, G. V. (Ed.). (2022). *Natural resources and environment of the Bryansk region. Annual report on the environmental situation in the Bryansk region in 2021*. Bryansk: Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Bryansk Region. 220 p.
14. Koterov, A. N., Ushenkova, L. N., Zubenkova, E. S., Kalinina, M. V., Biryukov, A. P., Lastochkina, E. M., Molodtsova, D. V., & Vaynson, A. A. (2019). Strength of association. Message 2. Correlation magnitude gradations. *Medical Radiology and Radiation Safety*, *64(6)*, 12-24. https://doi.org/10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24 EDN: https://elibrary.ru/daeyng
15. Maksimova, T. P., Bondarenko, T. G., Zdanova, O. A., & Prodanova, N. A. (2023). System of interrelation of transformation processes of economic agrarian structures and problems of sustainable food security. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *15(2)*, 485-506. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-2-485-506 EDN: https://elibrary.ru/ebgkm
16. Dudukalov, E. V., Zolochevskaya, E. Yu., Sorokina, M. Yu., & Mangusheva, L. S. (2022). Structuring of the economic space of small business forms in agriculture. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *14(2)*, 176-215. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-2-176-215 EDN: https://elibrary.ru/gnzgcb
17. Meyfroidt, P., Schierhorn, F., Prishchepov, A., Müller, D., & Kuemmerle, T. (2016). Drivers, constraints and trade-offs associated with recultivating abandoned cropland in Russia, Ukraine and Kazakhstan. *Global Environmental Change*, 37, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.10.007 EDN: https://elibrary.ru/vrmpaj
18. Suchkov, D. K., Sorgutov, I. V., Gavrilieva, N. K., & Grigoriev, A. V. (2021). Economic aspects of the ecological approach to the development of agriculture at the present stage. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(5), 120-132. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-120-132 EDN: https://elibrary.ru/ahvndg
19. Hu, Q., Xiang, M., Chen, D., Zhou, J., Wu, W., & Song, Q. (2020). Global cropland intensification surpassed expansion between 2000 and 2010: a spatio-temporal analysis based on GlobeLand30. *Science of the Total Environment*, 746, 141035. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141035 EDN: https://elibrary.ru/ckkkpp
20. Kovaleva, E. A., & Ivanyo, Y. M. (2022). Management models of agrarian production taking into account natural and technogenic impacts on the environment. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(3), 24-39.

https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-24-39 EDN: https://elibrary.ru/eoeuag

21. Krinichnaya, E., & Egorova, O. (2020). Return of unused land to agricultural production. *E3S Web of Conferences*, 210, 09003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021009003 EDN: https://elibrary.ru/nqqhep
22. Nekrich, A. S. (2024). Ecological networks as a means for maintaining the sustainability of agroecosystems in Bryansk Oblast. *E3S Web of Conferences*, 555, 04007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455504007 EDN: https://elibrary.ru/ojsyaw
23. Nekrich, A. S. (2024). Enhancing environmental sustainability and biodiversity conservation in agrarian-oriented districts of Bryansk Oblast. *E3S Web of Conference*, 486, 07003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448607003 EDN: https://elibrary.ru/fujxvr
24. Nekrich, A. S. (2023). Transformation of ecosystems in Bryansk Oblast caused by the agro-industrial complex development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1212, 012020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1212/1/012020 EDN: https://elibrary.ru/gyfssr
25. Amirova, E. F., Gavrilyeva, N. K., Romanishina, T. S., & Asfandiarova, R. A. (2022). On the problem of the development of 'sustainable' agriculture in modern economic realities. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(3), 392-406. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-392-406 EDN: https://elibrary.ru/syndur
26. Osawa, T., Kohyama, K., & Mitsuhashi, H. (2016). Multiple factors drive regional agricultural abandonment. *Science of the Total Environment*, 542(Part A), 478-483. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.067 EDN: https://elibrary.ru/vglorp
27. Plieninger, T., Draux, H., Fagerholm, N., Bieling, C., Bürgi, M., Kizos, T., Kuemmerle, T., Primdahl, J., & Verburg, P. (2016). The driving forces of landscape change in Europe: a systematic review of the evidence. *Land Use Policy*, 57, 204-214. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.040 EDN: https://elibrary.ru/wufkzh

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Некрич Алина Сергеевна, кан. геогр. наук, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук
Старомонетный пер. 29, г. Москва, 119017, Российская Федерация
a.s.nekrich@igras.ru

DATE ABOUT THE AUTHOR

Alina S. Nekrich, Cand. of Geogr. Sc., Senior Research Scientist
Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences
29, Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russian Federation
a.s.nekrich@igras.ru
SPIN-code: 9758-4057
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6162-2036
ResearcherID: C-8533-2017
Scopus Author ID: 15830231000

Поступила 05.07.2024
После рецензирования 26.08.2024
Принята 27.09.2024

Received 05.07.2024
Revised 26.08.2024
Accepted 27.09.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1086 **EDN: FBSWNB**
УДК 619:615.3:636.22/.28:619:618.19-002

Научная статья

ПОСЛЕУБОЙНАЯ ДИАГНОСТИКА ПАСТЕРЕЛЛЕЗА СВИНЕЙ

А.Р. Акобян

Аннотация

Обоснование. В связи с широким распространением пастереллеза среди свиней и огромным экономическим ущербом, которое наносит это заболевание свиноводческим хозяйствам (значительный падеж поголовья, затраты на лечение, снижение качества животноводческой продукции и опасность заражения людей), проблема диагностики пастереллеза является актуальной задачей ветеринарной науки.

Цель. Целью наших исследований являлось проведение послеубойной диагностики пастереллеза в трех свиноводческих хозяйствах Армавирской области Республики Армения, идентифицирование его возбудителя для последующей организации лечебно-профилактических мероприятий.

Материал и методы. Исследования проводились на поголовье свиней трех свиноводческих хозяйств Армавирской области, подвергнутых убою. Проводился послеубойный осмотр легких животных для изучения характера поражений этого органа, была определена средняя масса, подвергнутых убою свиней. Из пораженных участков легких был отобран патологический материал, который был использован для культивирования и идентификации возбудителя. Идентификацию возбудителя проводили на кровяном агаре, а также на агаре Mac Conkey. Определение биохимических свойств возбудителя осуществляли с использованием биохимических тестов API 20E.

Результаты. У 74, подвергнутых убою свиней, были обнаружены патологоанотомические изменения в легких, характерные для крупозной, серозно-фибринозной пневмонии, фибрино-некротической плевропневмонии, плевриту и бронхопневмонии. Масса тела, подвергнутых убою животных, у которых наблюдалось поражение легких, была снижена. При посеве на МПА, содержащий 5% сыворотку крови, были обнаружены колонии, характерные по морфологическим свойствам на колонии пастерелл. Биохимические исследования подтвердили принадлежность возбудителя к виду P. multocida.

Заключение. При исследовании легких животных, подвергнутых убою, наблюдались явления пневмонии, плевропнемонии и плеврита. При посеве на питательные среды был идетифицирован возбудитель P. Multocida. Обобщая результаты исследований, можно отметить, что пастереллез имеет значительное распространение у свиней и сопровождается поражением легких.

Ключевые слова: послеубойное исследование; поражение легких; Pasteurella multocida; зоонозная болезнь; гистопатология легких

Для цитирования. Акобян, А. Р. (2025). Послеубойная диагностика пастереллеза свиней. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 610-627. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1086

Original article

POST-MORTEM DIAGNOSIS OF PIG PASTERELLOSIS

A.R. Akobian

Abstract

Background. Due to the widespread spread of pasteurellosis among animals, particularly in pigs and the enormous economic damage it causes to pig farms due(-significant loss of pig population, treatment costs, decreased quality of products and the danger of infection of people), the problem of diagnosing pasteurellosis is an urgent task of veterinary science.

Purpose. The purpose of our research was post-mortem diagnosis of pasteurelosis in three pig farms in the Armavir region of the Republic of Armenia, identification of its causative agent, with the aim of properly organizing treatment and preventive measures

Material and methods. The study was carried out in three pig farms in the Armavir region. A post-mortem examination of the lungs of pigs was carried out to study the nature of their lesions, and the average weight of slaughtered animals was determined. Pathological material was selected from the affected parts of the lungs, which was used for culturing and identifying the pathogen. Identification of the pathogen was carried out on blood agar, Mac Conkey agar. Determination of the biochemical properties of the pathogen was carried out using biochemical tests API 20E.

Results. In 74 slaughtered pigs, pathological changes in the lungs were characteristic of lobar, serous-fibrinous pneumonia, fibrino-necrotic pleuropneu-

monia, pleurisy and bronchopneumonia, and a decrease in body weight was observed. When inoculated on MPA containing 5% serum, colonies with morphological properties characteristic of pasteurel colonies were found. Biochemical studies confirmed that the pathogen belongs to the species P. multocida.

Conclusion. During examination the lungs of slaughtered animals, pneumonia, pleuropnemonia and pleurisy were found in the majority of the lungs. When inoculated on nutrient media, the pathogen P. Multocida was identified. Summarizing the research results, we can conclude that pasteurelosis is widespread, accompanied by lung damage.

Keywords: post-mortem examination; lung lesions; Pasteurella multocida; zoonotic disease; lung histopathology

For citation. Akobian, A. R. (2025). Post-mortem diagnosis of pig pasterellosis. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, *17*(2), 610-627. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1086

Введение

Две трети инфекционных заболеваний человека и три четверти возникающих или повторно возникающих инфекционных заболеваний у животных имеют зоонозное происхождение. Зоонозные болезни - болезни животных, передающиеся людям. Люди заражаются зоонозными заболеваниями при близком контакте с домашними животными [25; 26; 37; 39; 44; 45; 47; 48]. Одним из таких заболеваний является пастереллез свиней. Возбудитель Pasteurella multocida относятся к семейству Pasteurellaceae, роду Pasteurella. Pasteurella multocida маленькая по величине (0,3–1,0мкм в ширину и 1,0-2,0мкм в длину), грамотрицательная факультативно-анаэробная неподвижная коккобацилла или палочка не содержащая спор, легко культивируемая в лабораторных условиях. С учетом капсульной структуры и липополисахаридного состава, были идентифицированы пять капсульных серогрупп (A, B, D, E и F) [9; 21; 38]. В зависимости от их ферментативной активности и способности ферментировать сахар, они были разделены на 16 соматических биоваров [7; 17]. Некоторые серотипы P. multocida ассоциированы с болезнями, специфичными для хозяина [24]**.** Существуют как токсикогенные, так и нетоксикогенные штаммы P. multocida. Многочисленными исследованиями было выявлено, что токсикогенные штаммы типа D и типа A связаны с атрофическим ринитом у свиней. Нетоксикогенные штаммы P. multocida типа A, по-видимому, являются доминирующими при респираторных заболеваниях свиней и крупного рогатого скота [16].

Капсульный тип P. Multocida типа A является одним из наиболее распространенных возбудителей, вызывающих бронхопневмонию у свиней, а тип D связан с атрофическим ринитом и пневмонией свиней [28,36].

Появление пастереллеза в свиноводческих хозяйствах всегда сопровождается большим количеством заболевших животных, вызывая экссудативную бронхопневмонию, иногда осложняющуюся перикардитом, плевритом и фибринозной пневмонией. В связи с чем, наносится значительный экономический ущерб свиноводческим хозяйствам, обуславливаемый высокой смертностью поголовья, снижением живой массы и темпов роста животных, а также затратами на лечение, повышенным расходом кормов, снижением качества и стоимости мясной продукции [2; 3; 6; 11; 15; 19; 33; 34; 40; 42]. P.Multocida обнаруживается в носоглотке и дыхательных путях животных, особенно у собак и кошек, в качестве условно-патогенного микроорганизма. Человек заражается при близком контакте с животными и чаще всего через укусы животных [32; 46]. Среди представителей рода Pasteurella пять видов обычно связаны с инфекциями, передаваемыми человеку: P. multocida, P. septica, P. canis, P. stomatis и P. Dagmatis, из которых наиболее распространенным видом является P. multocida [27; 46].

При заражении человека может развиться широкий спектр клинических проявлений, варьирующих от легкого локального целлюлита до более тяжелых проявлений (например- менингита, пневмонии, эндокардита и бактериемии) [43]. У людей пожилого возраста с низким иммунитетом, страдающих хроническими заболеваниями печени и сахарным диабетом в результате заражения пастереллезом может возникнуть септицемия. Однако, сведений о заражении пастереллезом здоровых людей очень мало [1]. Наиболее распространенными формами проявления пастереллеза у людей являются инфекции кожи и мягких тканей, а также инфекции дыхательных путей [10; 27]. Септический шок является тяжелым и редким осложнением пастереллезной инфекции [18]. Более того, сообщалось о клинических случаях менингита у людей, вызванного P. multocida, после контакта с собаками (без укусов в анамнезе), свиньями и овцами [5; 8; 20; 29].

Заболевание не предается человеку через продукты убоя при их переработке, во время кулинарной обработки мяса или употреблении в пищу необезвреженного мяса. Однако, мясо и продукты убоя животных, больных пастереллезом и подозрительных по этому заболеванию, использовать в сыром виде запрещается. При наличии

дегенеративных или других патологических (абсцессы и др.) изменений в мускулатуре, тушу с внутренними органами направляют на утилизацию [4]. Некоторые авторы сообщают о том, что поражения легких могут способствовать снижению качества мяса (помутнение, твердость, сухость), в то время как другие сообщают о том, что поражения легких способствуют тому, что мясо становится бледным, сочным и мягким [13; 14; 31; 35].

В большинстве случаев пастереллез у животных протекает в субклинической форме, и поэтому клиническое обследование животных не может рассматриваться в качестве эффективного метода его прижизненной диагностики [33]. Таким образом, послеубойная оценка поражений легких является ценным инструментом для оценки частоты и тяжести субклинических респираторных инфекций в стаде [19]. Лабораторные тесты также могут быть полезными для выявления субклинических поражений легких после убоя. При этом общепринятой практикой является сочетание послеубойной оценки поражения легких с идентификацией возбудителя, с использованием методов полимеразной цепной реакции, иммуногистохимическими и гистопатологическими методами, а также культуральным анализом [22; 33].

Целью исследования являлось патологогистологическое исследование патологического материала, который был изъят от свиней, подвергнутых убою, из трех свиноводческих хозяйств Армавирской области Республики Армения. Помимо чего, целью данного исследования также являлось выделение пастерелл из патологического материала и идентификация типов пастерелл культивированием на питательных средах, исследование их биохимических реакций.

Материал и методы исследования

Задачей, проведенных исследований, было выявление причин развития различных поражений легких у животных трех свиноводческих хозяйств Армавирской области Республики Армения методом послеубойного обследования этого органа. Исследования проводились в преддверии новогодних праздников, в декабре 2023 года, в течение пяти дней, когда на скотобойню было доставлено большое количество выбракованных свиней. Обследовали 112 свиней на откорме, в возрасте от четырех до пяти месяцев, забитых на скотобойне средней производительностью около 200 свиней в неделю. Все животные были помесями пород йоркшир, ландрас, крупная белая и дюрок. Они выращивались в

трех коммерческих фермах Армавирской области. Животные откармливались группами по 20 особей в каждом загоне, при среднем распределении площади 1м^2 на свинью. Было проведено предубойное обследование животных, а во время убоя легкие всех свиней были исследованы на наличие макроскопических видимых поражений- пневмонии, плеврита и плевропневмонии.

Для лабораторного исследования брали пораженные легкие вместе с прилегающими к ним макроскопически здоровыми тканями. Патологический материал транспортировали в лабораторию в термосе со льдом.

Поскольку возбудитель плохо растет или не растет на простых питательных средах, для первичного его выделения посевы проводились на МПА, содержащий 5% сыворотку крови крупного рогатого скота (pH 7,2). Для видовой дифференциации пастерелл, после очистки путем субкультивирования, изоляты были посеяны на 5%-ный овечий кровяной агар и на агар Mac Conkey (производитель Thermo Fisher Scientific). Чашки с посевами инкубировали в термостате в аэробных условиях при температуре 37°C в течение 48 часов. С целью идентификации возбудителя, методом микроскопирования изучались морфологические особенности колоний, исследование их характеристик проводилось при окрашивании мазков по Граму, а биохимические реакции микроорганизмов изучались с использованием некоторых биохимических тестов. Анализ биохимических свойств выделенных бактерий проводили по методу Mac Faddin [29]. Для надежной идентификации и сравнения результатов использовали тест-систему API 20E (Biomereiux, Франция). Для выявления биполярности мазки окрашивали водноспиртовым раствором пиоктанина в течение 1 минуты с подогреванием на спиртовке до отхождения паров.

Для гистопатологического исследования легкие фиксировали в 10% нейтральном забуференном формалине. Зафиксированные должным образом ткани были обработаны обычным способом для получения блоков, залитых парафином, толщиной 4-5 мкм. На предметные стекла наносили толстые парафиновые срезы. Парафиновые срезы тканей больных свиней окрашивали гематоксилином и эозином в соответствии со стандартным протоколом и исследовали под световым микроскопом (с увеличением 10Х10) [12]. Серотипы изолятов не были определены из-за отсутствия серотипов в лаборатории.

Биометрическая обработка, полученных данных, проводилась с использованием компьютерной программы Statistica.

Результаты



Рис. 1. Пневмония правой и левой верхушечных долей



Рис 2. Серозно-фибринозная плевропневмония правых верхушечных и сердечных долей



Рис. 3. Фибрино-некротическая плевропневмония



Рис. 4. Плеврит. Отсутствие париетальной и висцеральной плевры во всех долях, вследствие спаек



Рис. 5. Плеврит



Рис. 6. Бронхопневмония

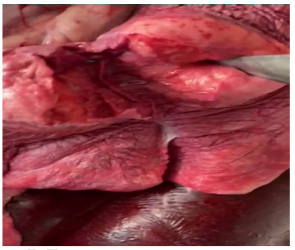


Рис. 7. Гепатизация отдельных долек и долей легких



Рис. 8. Поражения суставов



Рис. 9. Лимфаденит



Рис. 10. Лимфаденит и гепатизация легких

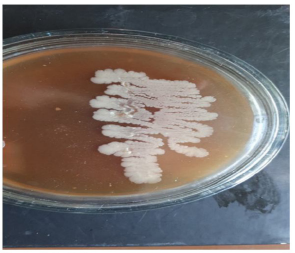


Рис. 11. Посевы на сывороточный агар

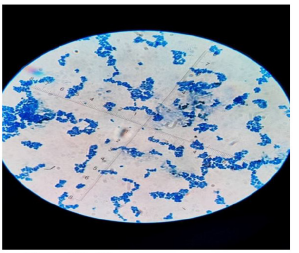


Рис. 12. Колонии пастерелл

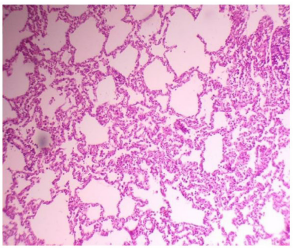


Рис. 13. Разрез здорового участка легкого свиньи (10Х100)

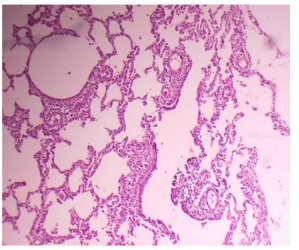


Рис. 14. Разрез здорового участка легкого свиньи (10Х100)

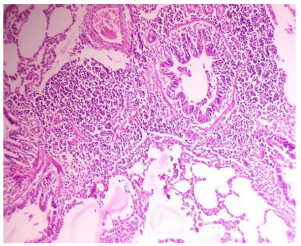


Рис. 15. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

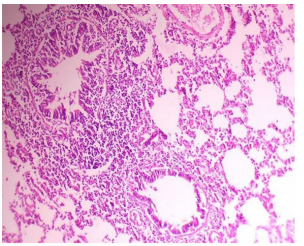


Рис. 16. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

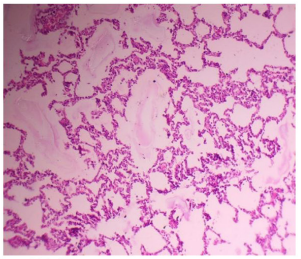


Рис.17. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

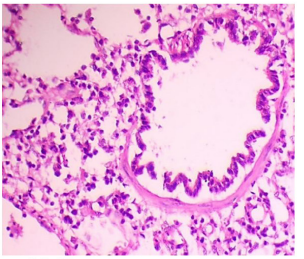


Рис. 18. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

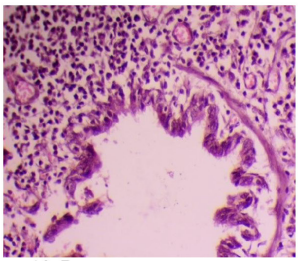


Рис. 19. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

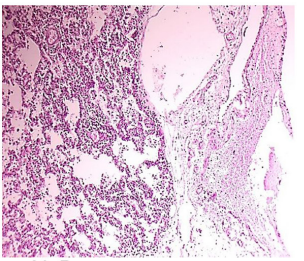


Рис. 20. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

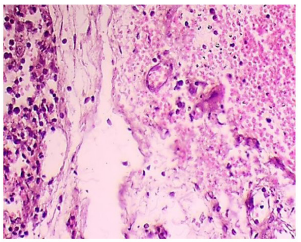


Рис. 21. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

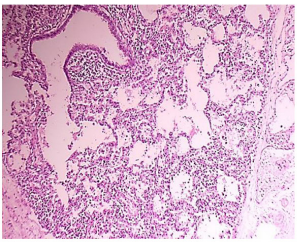


Рис. 22. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

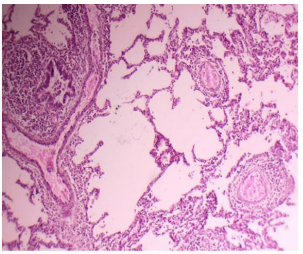


Рис. 23. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

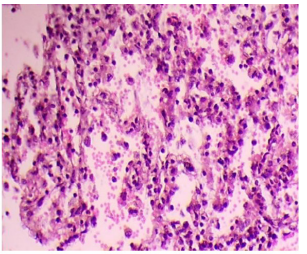


Рис. 24. Разрез пораженного участка легкого свиньи (10Х100)

Таблица 1.

Исследование живого веса у здоровых и больных пастереллезом свиней: n=112

Поражения легких	Количество свиней	Средняя живая масса, кг
Без макроскопических изменений	38	78,13 ± 5,16
С макроскопическими изменениями	74	63,58 ± 3,50

В таблице 1 отражены результаты исследования средней живой массы здоровых и больных пастереллезом свиней

Таблица 2.

Результаты макроскопических исследований легких здоровых и больных пастерелезом свиней при послеубойном осмотре: n=112

Типы поражения легких	Количество свиней	Результаты макроскопических исследований легких, выраженные в процентах
Без макроскопических изменений	38	33,92
Пневмония без плеврита	15	20,27
Плеврит	25	33,78
Плевропневмония	23	31,08
Бронхопневмония	11	14,86

Таблица 2 отражает результаты макроскопических исследований легких здоровых свиней, а также свиней, больных пастерелезом при послеубойном осмотре

Таблица 3.

Результаты изучения биохимических характеристик P. Multocida (n = 74)

Реакции	P. multocida
Гемолиз	-
Подвижность	-
Образование индола	+

Глюкоза	+
Сахароза	+
Лактоза	-
Оксидаза	+
Каталаза	+

+ В наличии; - Отсутствует

Таблица 3 отражает результаты биохимических характеристик P. multocida

Обсуждение

Из 112 свиней, подвергнутых убою, у 74 голов наблюдаемые в легких поражения имели характер крупозной (рис. 1), серозно-фибринозной (рис. 2) пневмонии, фибрино-некротической плевропневмонии (рис. 3), плеврита (рис. 5) и бронхопневмонии (рис. 6). Легкие были отечны и тверды. На легочной плевре обнаружили фибринозные пленки, а под плеврой многочисленные мелкие кровоизлияния. На разрезе легочной ткани была заметна выраженная мраморность с различным цветом долек (рис. 7, 10) и разращение междольковой соединительной ткани. В отдельных участках легких наблюдались очаги некроза. На поверхности плевры были обнаружены плёнки различной толщины, состоящие из фибрина. Между отдельными участками легочной, рёберной, диафрагмальной плевры (рис. 4) имелись спайки.

В просвете бронхов и трахеи наблюдалось наличие серозно-фибринозного экссудата.

На серозных оболочках грудной полости были обнаружены плотные фибринозные наложения. Перибронхиальные и легочные лимфоузлы были увеличены, гиперемированы, с наличием множественных кровоизлияний (рис. 9, 10).

Послеубойная оценка поражений легких выявила высокую распространенность пневмонии, плеврита, плевропневмонии и бронхопневмонии у животных (таблица 2). Только у 38 животных (33,9%) из 112 обследованных, в легких не было видимых макроскопических поражений. Количество животных с поражением легких составило 74 (66,1%). У 15 голов (20,27%) наблюдалась пневмония, а пневмония в сочетании с плевритом наблюдалась у 23 голов (31,08%). Плеврит был обнаружен у 25 голов (33,78%). Бронхопневмония наблюдалась у 11 голов - 14,86% (Рис. 6). Результаты макроскопических исследований легких свидетельствуют о том,

что у подвегнутых убою свиней, чаще всего выявляли подостро-хроническую интерстициальную плевропневмонию и плеврит. Результаты исследований, отраженные в таблице 1 свидетельствуют о том, что поражения легких сопровождались потерей живой массы, подвегнутых убою свиней. При отсутствии макроскопических изменений в легких, живая масса туш свиней в среднем составила 78,13 кг, а при макроскопических изменениях в легких, она составила уже в среднем 63,58кг. Разница в живой массе больных и здоровых животных составила14,55±1,66кг.

На мясопептонном агаре, содержащем сыворотку крови, был выявлен чистый рост бактериальных колоний. Колонии диаметром 1-3 мм были полупрозрачными, круглыми, выпуклыми, с гладкой влажной поверхностью, ровными краями (рис. 9). В мазках на светлосинем фоне обнаружены палочки размером 0,3-1,0 х 1-2мк, у которых полюса были темно-синими, а центр клетки не был окрашен. Палочки располагались одиночно или парами (рис. 10).

На кровяном агаре гемолиз отсутствовал. При культивировании на агаре Mac Conkey бактериальная культура не дала роста. Результаты биохимических тестов, с помощью набора API 20E, которые были проведены на чистых колониях, выявили принадлежность бактерий к виду P. Multocida. Все идентифицированные изоляты, полученные от 74, подвергнутых убою свиней, выращенных в трех разных фермах, принадлежали к типу P. Multocida, они положительно реагировали на каталазу, оксидазу и индол, ферментировали сахарозу, глюкозу, отрицательно рагировали на лактозу (таблица 3).

При микроскопическом исследовании разрезов здоровых участков легких наблюдалась общая сохранность гистологической структуры. Стенки альвеол тонкие, эпителий однослойный, целостность сохранена. Между альвеолами находится разреженная нитеобразная соединительная ткань, где выявляются капилляры. Стенки бронхиол тонкие, однако, собственный мышечный слой сохранен. (рис. 13, 14). В пограничной зоне, между здоровой и пораженной тканями, обнаружены палочкообразные элементы. В пораженных участках легких, вокруг крупных бронхиол, мелких бронхов и в межальвеолярной интерстициальной ткани, наблюдается скопление большого количества лимфоцитов, что свидетельствует о наличии интерстициальной бронхопневмонии. В определенных случаях скопление лимфоцитов наблюдается и в просвете альвеол. Кровеносные сосуды расширены и гиперемированы (рис. 15, 16). В альвеолах и респираторных бронхиолах обнаружено скопление экссудата, где визуализируются лимфоциты (рис. 17). В определенных случаях, в мелких бронхах, выявляется лимфоцитарная инфильтрация и отсутствие мышечного слоя. Эпителий

также изменен, в определенных случаях он становится однослойным (рис. 18). Вокруг гиперемированных сосудов наблюдаются скопления лимфоцитов и наличие воспалительных очагов, что свидетельствует о развитии бактериальной бронхопневмонии (рис. 19). Плевра повреждена, обнаружены участки некроза и воспалительные очаги. В альвеолах и межальвеолярной соединительной ткани наблюдается сколение большого количества лимфоцитов, что свидетельствует о наличии очаговой бронхопневмонии (рис. 20). В междольковой соединительной ткани также обнаружены воспалительные очаги (рис. 21, 22). Помимо чего, выявлена картина геморрагической пневмонии (рис. 23, 24).

Заключение

В результате проведенных послеубойных исследований, было обнаружено резкое снижение массы у животных, больных пастереллезом, в легких наблюдались явления пневмонии, бронхопневмонии, плевропневмонии и плеврита.

На мясопептонном агаре, содержащем сыворотку крови, выявлен чистый рост бактериальных колоний.

При исследовании биохимических реакций, выделенные штаммы, положительно реагировали на каталазу, оксидазу и индол. В тоже время, была выявлена отрицательная реакция на лактозу. Помимо чего, они ферментировали сахарозу и глюкозу.

Результаты гистологических исследований легких, подвергнутых убою свиней, подтвердили наличие воспалительных процессов бактериальной природы.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена по решению правительства Республики Армения по базовому финансированию научных тем в Армении.

Список литературы / References

1. Kimura, R., Hayashi, Y., Takeuchi, T., Shimizu, M., Iwata, M., Tanahashi, J., & Ito, M. (2004). Pasteurella multocida septicemia caused by close contact with a domestic cat: case report and literature review. *J Infect Chemother*, 10(4), 250-252. https://doi.org/10.1007/s10156-004-0331-5
2. Лях, Ю. Г. (2013). *Пастереллез свиней и крупного рогатого скота*. Минск: ООО «Инфофорум», 212 с. (Lyakh, Yu. G. (2013). *Pasteurellosis of pigs and cattle*. Minsk: Inforum. 212 p.)

3. Лях, Ю. Г., Синица, О. Н. (2000). Пневмонии пастереллезно-сальмонеллезной этиологии молодняка сельскохозяйственных животных в Республике Беларусь и их специфическая профилактика. *Международный аграрный журнал*, 9, 42-44. (Lyakh, Yu. G., & Sinitsa, O. N. (2000). Pneumonia of pasteurella-salmonella etiology in young farm animals in the Republic of Belarus and their specific prevention. *International Agricultural Journal*, *9*, 42-44.) EDN: https://elibrary.ru/ytupcs
4. Немкова, Н. П. (2017). *Ветеринарно-санитарная экспертиза продуктов убоя животных при инфекционных болезнях: Методические указания*. Красноярск, 73 с. (Nemkova, N. P. (2017). *Veterinary and sanitary examination of slaughter products of animals with infectious diseases: Methodical instructions*. Krasnoyarsk. 73 p.) EDN: https://elibrary.ru/gdgzpy
5. Bardou, M., Honnorat, E., Dubourg, G., Couderc, C., Fournier, P. E., Seng, P., & Stein, A. (2015). Meningitis caused by Pasteurella multocida in a dog owner without a dog bite: clonal lineage identification by MALDI-TOF mass spectrometry. *BMC Res Notes*, 8, 626. https://doi.org/10.1186/s13104-015-1615-9
6. Becskei, Z., Aleksić-Kovačević, S., Rusvai, M., Balka, G., Jakab, C., Petrović, T., & Knežević, M. (2010). Distribution of porcine circovirus 2 cap antigen in the lymphoid tissue of pigs affected by postweaning multisystemic wasting syndrome. *Acta Vet Hung*, 58(4), 483-498. https://doi.org/10.1556/AVet.58.2010.4.9
7. Blackall, P. J., Pahoff, J. L., & Bowles, R. (1997). Phenotypic characterisation of Pasteurella multocida isolates from Australian pigs. *Vet Microbiol*, 57(4), 355-360. https://doi.org/10.1016/s0378-1135(97)00111-9
8. Boyanton, B. L. Jr., Freij, B. J., Robinson-Dunn, B., Makin, J., Runge, J. K., & Luna, R. A. (2016). Neonatal Pasteurella multocida subsp. septica Meningitis Traced to Household Cats: Molecular Linkage Analysis Using Repetitive-Sequence-Based PCR. *J Clin Microbiol*, 54(1), 230-232. https://doi.org/10.1128/JCM.01337-15
9. Carter, G. R. (1955). Studies on Pasteurella multocida. I. A hemagglutination test for the identification of serological types. *Am J Vet Res*, 16(60), 481-484.
10. Christidou, A., Maraki, S., Gitti, Z., & Tselentis, Y. (2005). Review of Pasteurella Multocida Infections over a Twelve-Year Period in a Tertiary Care Hospital. *American Journal of Infectious Diseases*, 1(2), 107-110. https://doi.org/10.3844/ajidsp.2005.107.110
11. Čobanović, N., Karabasil, N., Ilić, N., Dimitrijević, M., Vasilev, D., Cojkić, A., & Jankvić, L. (2015). Pig welfare assessment based on presence of skin lesions on carcass and pathological findings in organs. *Proceedings of the 17th International Congress on Animal Hygiene, Animal Hygiene and Welfare in Livestock Production. The First Step to Food Hygiene*, 26-29.

12. Culling, C. F. A. (1974). *Handbook of Histopathological and Histochemical Techniques. Including Museum Techniques*. Butterworths, 687 p.
13. Dailidavičienė, J., Januškevičienė, G., June, V., Pockevičius, A., & Kerzienė, S. (2008). Typically definable respiratory lesions and their influence on meat characteristics in pigs. *Veterinarija ir Zootechnika*, 43(65), 20-24.
14. Dailidavičienė, J., Januškevičienė, G., Zaborskiene, G., & Gear miele, G. (2009). Pork quality analysis according to different degree of lung lesions. *Fleischwirtschaft*, 89(1), 100-103.
15. Davies, R. L., MacCorquodale, R., Baillie, S., & Caffrey, B. (2003). Characterization and comparison of Pasteurella multocida strains associated with porcine pneumonia and atrophic rhinitis. *J Med Microbiol*, 52(Pt 1), 59-67. https://doi.org/10.1099/jmm.0.05019-0
16. Davies, R. L., MacCorquodale, R., & Reilly, S. (2004). Characterisation of bovine strains of Pasteurella multocida and comparison with isolates of avian, ovine and porcine origin. *Vet Microbiol*, 99(2), 145-158. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2003.11.013
17. Fegan, N., Blackall, P. J., & Pahoff, J. L. (1995). Phenotypic characterisation of Pasteurella multocida isolates from Australian poultry. *Vet Microbiol*, 47(3-4), 281-286. https://doi.org/10.1016/0378-1135(95)00119-0
18. Fernández-Valencia, J. A., García, S., & Prat, S. (2008). Pasteurella multocida septic shock after a cat scratch in an elderly otherwise healthy woman: a case report. *Am J Emerg Med*, 26(3), 380.e1-3. https://doi.org/10.1016/j.ajem.2007.05.019
19. Fraile, L., Alegre, A., López-Jiménez, R., Nofrarías, M., & Segalés, J. (2010). Risk factors associated with pleuritis and cranio-ventral pulmonary consolidation in slaughter-aged pigs. *Vet J*, 184(3), 326-333. https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2009.03.029
20. Guillet, C., Join-Lambert, O., Carbonnelle, E., Ferroni, A., & Vachée, A. (2007). Pasteurella multocida sepsis and meningitis in 2-month-old twin infants after household exposure to a slaughtered sheep. *Clin Infect Dis*, 45(6), e80-e81. https://doi.org/10.1086/520979
21. Heddleston, K. L., Gallagher, J. E., & Rebers, P. A. (1972). Fowl cholera: gel diffusion precipitin test for serotyping Pasteurella multocida from avian species. *Avian Dis*, 16(4), 925-936.
22. Hillen, S., von Berg, S., Köhler, K., Reinacher, M., Willems, H., & Reiner, G. (2014). Occurrence and severity of lung lesions in slaughter pigs vaccinated against Mycoplasma hyopneumoniae with different strategies. *Prev Vet Med*, 113(4), 580-588. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.12.012

23. Holst, E., Rollof, J., Larsson, L., & Nielsen, J. P. (1992). Characterization and distribution of Pasteurella species recovered from infected humans. *J Clin Microbiol*, 30(11), 2984-2987. https://doi.org/10.1128/jcm.30.11.2984-2987.1992
24. Hotchkiss, E. J., Hodgson, J. C., Schmitt-van de Leemput, E., Dagleish, M. P., & Zadoks, R. N. (2011). Molecular epidemiology of Pasteurella multocida in dairy and beef calves. *Vet Microbiol*, 151(3-4), 329-335. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2011.03.018
25. Karesh, W. B., Cook, R. A., Bennett, E. L., & Newcomb, J. (2005). Wildlife trade and global disease emergence. *Emerg Infect Dis*, 11(7), 1000-1002. https://doi.org/10.3201/eid1107.050194
26. Karesh, W. B., & Noble, E. (2009). The bushmeat trade: increased opportunities for transmission of zoonotic disease. *Mt Sinai J Med*, 76(5), 429-434. https://doi.org/10.1002/msj.20139
27. Kofteridis, D. P., Christofaki, M., Mantadakis, E., Maraki, S., Drygiannakis, I., Papadakis, J. A., & Samonis, G. (2009). Bacteremic community-acquired pneumonia due to Pasteurella multocida. *Int J Infect Dis*, 13(3), e81-e83. https://doi.org/10.1016/j.ijid.2008.06.023
28. Liu, H., Zhao, Z., Xi, X., Xue, Q., Long, T., & Xue, Y. (2017). Occurrence of Pasteurella multocida among pigs with respiratory disease in China between 2011 and 2015. *Ir Vet J*, 70, 2. https://doi.org/10.1186/s13620-016-0080-7 EDN: https://elibrary.ru/nhtxsu
29. López, C., Sanchez-Rubio, P., Betrán, A., & Terré, R. (2013). Pasteurella multocida bacterial meningitis caused by contact with pigs. *Braz J Microbiol*, 44(2), 473-474. https://doi.org/10.1590/S1517-83822013000200021
30. Mac Fadin, J. F. (2000). *Biochemical Tests for Identification of Medical Bacteria*. 3rd Ed., Lippincott Williams & Wilkins, Pennsylvania, USA, 912 p.
31. Minkus, D., Schutte, A., von Mickwitz, G., & Beutling, D. (2004). Lung health, meat content and meat ripening in pigs - defective lungs as a problem in meat inspection. *Fleischwirtschaft-Frankfurt*, 87(7), 110-113.
32. Oehler, R. L., Velez, A. P., Mizrachi, M., Lamarche, J., & Gomp, S. (2009). Bite-related and septic syndromes caused by cats and dogs. *The Lancet Infectious Diseases*, 9(7), 439-447. https://doi.org/10.1016/S1473-3099(09)70110-0 EDN: https://elibrary.ru/mmfypv
33. Ostanello, F., Dottori, M., Gusmara, C., Leotti, G., & Sala, V. (2007). Pneumonia disease assessment using a slaughterhouse lung-scoring method. *J Vet Med A Physiol Pathol Clin Med*, 54(2), 70-75. https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.2007.00920.x
34. Ozbey, G., Kilic, A., Ertas, H. B., & Muz, A. (2004). Random amplified polymorphic DNA (RAPD) analysis of Pasteurella multocida and Mannheimia hae-

molytica strains isolated from cattle, sheep and goats. *Vet Med Czech*, 49(3), 65-69. https://vetmed.agriculturejournals.cz/pdfs/vet/2004/03/01.pdf

35. Permentier, L., Maenhout, D., Deley, W., Broekman, K., Vermeulen, L., Agten, S., Verbeke, G., Aviron, J., & Geers, R. (2015). Lung lesions increase the risk of reduced meat quality of slaughter pigs. *Meat Sci*, 108, 106-108. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.06.005
36. Rajkhowa, S., Shakuntala, I., Pegu, S., Das, R., & Das, A. (2012). Detection of Pasteurella multocida isolates from local pigs of India by polymerase chain reaction and their antibiogram. *Trop Anim Health Prod*, 44(7), 1497-1503. https://doi.org/10.1007/s11250-012-0094-4 EDN: https://elibrary.ru/uyllxs
37. Reaser, J. K., Clark, E. E. Jr., & Meyers, N. M. (2008). All creatures great and minute: a public policy primer for companion animal zoonoses. *Zoonoses Public Health*, 55(8-10), 385-401. https://doi.org/10.1111/j.1863-2378.2008.01123.x
38. Rimler, R. B., & Rhoades, K. R. (1987). Serogroup F, a new capsule serogroup of Pasteurella multocida. *J Clin Microbiol*, 25(4), 615-618. https://doi.org/10.1128/jcm.25.4.615-618.1987
39. Smith, K. M., Anthony, S. J., Switzer, W. M., Epstein, J. H., Seimon, T., Jia, H., Sanchez, M. D., Huynh, T. T., Galland, G. G., Shapiro, S. E., Sleeman, J. M., McAloose, D., Stuchin, M., Amato, G., Kolokotronis, S. O., Lipkin, W. I., Karesh, W. B., Daszak, P., & Marano, N. (2012). Zoonotic viruses associated with illegally imported wildlife products. *PLoS One*, 7(1), e29505. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029505 EDN: https://elibrary.ru/ycmovl
40. Štukelj, M., Plut, J., & Toplak, I. (2015). Serum inoculation as a possibility for elimination of porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS) from a farrow-to-finish pig farm. *Acta Vet Hung*, 63(3), 389-399. https://doi.org/10.1556/004.2015.037
41. Szeredi, L., Cságola, A., Dán, Á., & Dencső, L. (2015). Vascular lesions and pneumonia in a pig fetus infected by porcine circovirus type 2. *Acta Vet Hung*, 63(2), 215-222. https://doi.org/10.1556/004.2015.019
42. Toplak, I., Lazić, S., Lupulović, D., Prodanov-Radulović, J., Becskei, Z., Došen, R., & Petrović, T. (2012). Study of the genetic variability of porcine circovirus type 2 detected in Serbia and Slovenia. *Acta Vet Hung*, 60(3), 409-420. https://doi.org/10.1556/AVet.2012.035
43. Weber, D. J., Wolfson, J. S., Swartz, M. N., & Hooper, D. C. (1984). Pasteurella multocida infections. Report of 34 cases and review of the literature. *Medicine (Baltimore)*, 63(3), 133-154.
44. Weese, J. S., McCarthy, L., Mossop, M., Martin, H., & Lefebvre, S. (2007). Observation of practices at petting zoos and the potential impact on zoonotic disease transmission. *Clin Infect Dis*, 45(1), 10-15. https://doi.org/10.1086/518572

45. Wilson, B. A. (2008). Global biosecurity in a complex, dynamic world. *Complexity*, 14(1), 71-88. https://doi.org/10.1002/cplx.20246
46. Wilson, B. A., & Ho, M. (2013). Pasteurella multocida: from zoonosis to cellular microbiology. *Clin Microbiol Rev*, 26(3), 631-655. https://doi.org/10.1128/CMR.00024-13 EDN: https://elibrary.ru/yaeeea
47. Woolhouse, M. E., & Gowtage-Sequeria, S. (2005). Host range and emerging and reemerging pathogens. *Emerg Infect Dis*, 11(12), 1842-1847. https://doi.org/10.3201/eid1112.050997
48. Woodford, M. H. (2009). Veterinary aspects of ecological monitoring: the natural history of emerging infectious diseases of humans, domestic animals and wildlife. *Trop Anim Health Prod*, 41(7), 1023-1033. https://doi.org/10.1007/s11250-008-9269-4

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Акобян Ануш Рафиковна, канд. вет. наук, доцент, исследовательский центр ветеринарии и ветеринарно-санитарной экспертизы
Национальный аграрный университет Армении
ул. Теряна, 74, г. Ереван, 0009, Республика Армения
akobian.anush@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Anush R. Akobian, Researcher, Research Center for Veterinary Medicine and Veterinary and Sanitary Expertise
Armenian National Agrarian University
74, Teryan Str., Yerevan, 0009, Republic of Armenia
akobian.anush@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7781-3045

Поступила 05.07.2024 Received 05.07.2024
После рецензирования 01.09.2024 Revised 01.09.2024
Принята 28.09.2024 Accepted 28.09.2024

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1437 **EDN: BGSVJN**

CC BY NC ND

Юбилеи | Anniversaries

О ФУНДАМЕНТАЛЬНОМ ВКЛАДЕ ИВАНА ВЛАДИМИРОВИЧА ХОЛИКОВА В РАЗВИТИЕ МЕДИЦИНЫ, ОРГАНИЗАЦИИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ И МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В ОБЛАСТИ ВОЕННОЙ МЕДИЦИНЫ

(К 50-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ УЧЕНОГО)

Наука подобно волне продвигается развитием теоретического знания и социальных институтов, формирующих научную картину мира и состоящих из действенных производственных единиц и творцов научной деятельности – работников нивы воспроизводства нового знания – ученых, которые своими кропотливыми методологическими, теоретическими, эмпирическими, практическими изысканиями формируют дисциплинарную матрицу науки и прогнозируют дальнейшее развитие сложных природных, социальных, технологических и виртуально-цифровых систем и закономерностей их функционирования.

Одним из выдающихся деятелей в сферах фиксации, описания, организации и развития правовых и регуляционных характеристик в области медицины и общественного здравоохранения, а также международного военного сотрудничества в предметном поле военной медицины является Иван Владимирович Холиков, который в этом году отмечает 50-летний юбилей.

Результаты многолетнего труда Ивана Владимировича широко известны в системе медицинской деятельности, поскольку им лично разработана концепция функционирования, воспроизводства предупреждения и предотвращения вызовов и угроз общественному здравоохранению, здоровью и эпидемиологической безопасности граждан, борьбе с заболеваниями, представляющими опасность для окружающих и лечению социально значимых заболеваний на международном и внутригосударственном уровне.

Юбиляр внес существенный вклад в объективацию организационно-правового и медицинского знания на страницах ведущих отечествен-

ных, иностранных и международных научных изданий. Палитра научных интересов Ивана Владимировича наглядно отразилась в его публикационной активности, широта которой поражает своим географическим и дисциплинарным размахом, что можно наглядно лицезреть на научно-статистических платформах.

Иван Владимирович является не только научным инженером теоретико-методологических конструкций, которые не всегда соотносятся с реальным социальным функционированием социальных систем. Он практический деятель, и организатор общественного здравоохранения, военной медицины, исследований в области военно-врачебной экспертизы и медицинского освидетельствования. Его практические действия связаны, с одной стороны, с организацией и участием российских специалистов в международных конгрессах, форумах и научно-практических конференциях по военной медицине.

С другой стороны юбиляр принимал личное участие и руководил российскими военно-медицинскими и миротворческими миссиями в различных регионах мира (в том числе с риском для жизни и здоровья, а также действуя в очаге особо опасной инфекции – лихорадки Эбола). Он отличился он в организации военно-дипломатического взаимодействия российского военно-медицинского компонента Вооруженных Сил Российской Федерации с Международным Комитетом Красного Креста, Международным комитетом военной медицины и другими международными организациями и медицинскими службами военно-политических союзов.

Иван Владимирович − настоящий офицер, честный, надежный и верный друг и талантливый научный коллега, способный прийти на выручку как в бытовых ситуациях, так и в научном творчестве, буквально в любое время дня и ночи и где бы он сам ни находился.

Сегодня ученый научными и организационно-правовыми средствами продолжает дело борьбы с вызовами и угрозами цивилизованному человечеству, путем научно-просветительской, организационно-научной и административно-научной деятельности в Институте законодательства и сравнительного правоведения при Правительстве Российской Федерации, Институте медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, Военном университете имени князя Александра Невского Минобороны России.

И.В. Холиков − постоянный автор журнала Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, на страницах издания опубликованы работы в об-

ласти организационно-правовых основ медицинской деятельности, проведения военно-врачебной экспертизы и производства судебно-медицинской экспертизы, которые регулярно выступают предметом дискуссионного обсуждения, критического осмысления и логического продолжения в научных работах коллег в иных ведущих изданиях.

С. К. Солдатов, *доктор медицинских наук, профессор, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, главный редактор журнала Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, начальник отдела Научно-исследовательского испытательного центра (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института Военно-Воздушных Сил Министерства обороны Российской Федерации*

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	7-24 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 УКАЗАНИЯ 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	7-24 pages A4 format, including tables, figures, references; for post-graduates pursuing degrees of candidate and doctor of sciences – 7–10.
Margins	all margins –20 mm each
Main text font	Times New Roman
Main text size	14 pt
Line spacing	1.5 interval
First line indent	1,25 cm
Text align	justify
Automatic hyphenation	turned on
Page numbering	turned off
Formulas	in formula processor MS Equation 3.0
Figures	in the text
References to a formula	(1)
References to the sources	[2, p.5], references are given in a single list at the end of the manuscript in the order in which they appear in the text
	DO NOT USE FOOTNOTES AS REFERENCES

Article structure requirements

TITLE (in English)

Author(s): surname and initials (in English)

Abstract (in English)
Keywords: separated with semicolon (in English)

Text of the article (in English)

1. Introduction.
2. Objective.
3. Materials and methods.
4. Results of the research and Discussion.
5. Conclusion.
6. Conflict of interest information.
7. Sponsorship information.
8. Acknowledgments.

References
References text type should be Chicago Manual of Style

DATA ABOUT THE AUTHORS
Surname, first name (and patronymic) in full, job title, academic degree, academic title

Full name of the organization – place of employment (or study) without compound parts of the organizations' names, full registered address of the organization in the following sequence: street, building, city, postcode, country

E-mail address

SPIN-code in SCIENCE INDEX:

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

ВЛИЯНИЕ ФИТОБИОТИЧЕСКИХ КОРМОВЫХ ДОБАВОК
НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И МИКРОБИОТУ КИШЕЧНИКА КАРПА
Е.П. Мирошникова, Е.В. Яушева, А.Е. Аринжанов, Ю.В. Килякова 11

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ УРОВНЯ СОМАТОТРОПИНА В ВОЛОСЕ
С МЯСНЫМИ КАЧЕСТВАМИ БЫЧКОВ ГЕРЕФОРДСКОЙ ПОРОДЫ
О.А. Завьялов, А.Н. Фролов, И.И. Слепцов 30

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ
НА ФИТОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛИСТЬЕВ И ШИШЕК ХМЕЛЯ
ОБЫКНОВЕННОГО (*HUMULUS LUPULUS* L.)
Д. Аль Хуссейн, Е. Алмуграби, А.А. Мостякова, О.А. Тимофеева 60

ГЕНОТИПИРОВАНИЕ *GLEDITSIA TRIACANTHOS* L.
ПО ЭКСПРЕССИИ ГЕНА RBCL И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ISSR-МАРКЕРОВ В УСЛОВИЯХ АРИДНОГО КЛИМАТА
П.А. Крылов, П.А. Кузьмин 82

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
В ВОДЕ РЕКИ ИРТЫШ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ В ГРАНИЦАХ
ОМСКОЙ ОБЛАСТИ
Н.Н. Жаркова, О.П. Баженова, А.С. Болтовская 98

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕДУР БИОТЕСТИРОВАНИЯ
В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ
А.С. Олькова 124

ВЕРМИТРАНСФОРМАЦИЯ ОДНОРАЗОВОЙ
БИОРАЗЛАГАЕМОЙ ПОСУДЫ
Е.В. Антонова, И.В. Пашкова, А.Б. Купчинский, С.Л. Максимова, Д.И. Стом 140

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДЕКСА ICE ДЛЯ СПУТНИКОВОГО
МОНИТОРИНГА ИРРИГАЦИОННЫХ МАССИВОВ
И СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ
И.Ю. Савин, А.Г. Терехов, Р.И. Мухамедиев 154

**БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА
И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ**

ОЦЕНКА УРОВНЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ
МОДИФИКАЦИИ БЕЛКОВ АДАПТИРОВАННЫХ
МОЛОЧНЫХ СМЕСЕЙ
Ю.Г. Розенфельд, В.Е. Высокогорский, Ю.А. Подольникова, Н.В. Стрельчик, Н.Л. Чернопольская 176

ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF GREEN SYNTHESIZED SILVER
NANOPARTICLES USING AQUEOUS EXTRACT OF AELUROPUS
LITTORALIS AND THEIR ANTICANCER AND ANTIOXIDANT
PROPERTIES
A.M. Alrudainy, A.A. Shareef 195

THE ECO-FREIENDLY SYNTHESIS
OF SILVER NANOPARTICLES (AgNPs) USING
MARANTA LEUCONEURA ETHANOLIC EXTRACT
WITH THE ASSESSMENT OF ANTIBACTERIAL,
ANTIOXIDANT, ANTICANCER ACTIVITIES
N.M. Alassadi, G.J. Al-Ghizzawi 217

ВЫЯВЛЕНИЕ НОСИТЕЛЕЙ МУТАНТНЫХ
АЛЛЕЛЕЙ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА НА ТЕРРИТОРИИ
ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЁМНОГО РЕГИОНА РОССИИ
С ПОМОЩЬЮ NGS-СЕКВЕНИРОВАНИЯ
Э.А. Снегин, А.С. Бархатов, А.А. Сычев, Е.А. Снегина, С.Р. Юсупов, А.Ю. Юсупова 237

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЛИФОСАТА И АНТИБИОТИКОВ НА СОСТАВ И ФУНКЦИИ МИКРОБИОМА КИШЕЧНИКА БРОЙЛЕРОВ
Д.Г. Тюрина, Е.А. Йылдырым, Г.Ю. Лаптев, Н.И. Новикова, Л.А. Ильина, В.А. Филиппова, А.В. Дубровин, К.А. Калиткина, Е.С. Пономарева, И.А. Ключникова, В.А. Заикин, Е.П. Горфункель 261

«PROBABLE ACETYLTRANSFERASE» TTHA1209 БАКТЕРИИ *THERMUS THERMOPHILUS*: КЛОНИРОВАНИЕ ГЕНА, СТРУКТУРНЫЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЕРМЕНТА
Т.А. Кудряшов, Е.В. Локтюшов, М.В. Трунилина, В.В. Быков, А.С. Соколов, Ю.С. Лаптева 295

ВИДОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ БАКТЕРИЙ РОДА *CLOSTRIDIUM*, ВЫДЕЛЕННЫХ ОТ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА, ПРИ ПОМОЩИ МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ПЦР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ
А.В. Нефедченко, Т.Е. Судоргина, Т.И. Глотова, С.В. Котенева, А.Г. Глотов 315

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

ANALYSIS OF GENE EXPRESSION CHANGES IN CANOLA IN RESPONSE TO INOCULATION WITH BIOTIC AND ABIOTIC ELICITORS TO *ALTERNARIA BRASSICAE*
J.T. Alkooranee 334

КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ РАЗНЫХ ГИБРИДОВ ОГУРЦА (*CUCUMIS SATIVUS* L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРОКА ПЛОДОНОШЕНИЯ И СРОКА ПОСЕВА В ЗАКРЫТОМ ГРУНТЕ
В.А. Гулидова, Р.В. Щучка, В.Л. Захаров, Ю.В. Попов, Б.А. Сотников 350

ВЫРАЩИВАНИЕ ГИБРИДОВ ПОДСОЛНЕЧНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБРАБОТКИ АГРОХИМИКАТАМИ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ
Д.В. Лебедев, Д.В. Виноградов, Т.В. Зубкова, М.П. Макарова 370

АФИДОФАГИ ЧЕРНОМОРСКОГО
ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ И ИХ РОЛЬ
В РЕГУЛИРОВАНИИ ЧИСЛЕННОСТИ ВРЕДИТЕЛЕЙ
Е.В. Кашутина, Л.Н. Бугаева, Т.Н. Игнатьева 387

ПРИСПОСОБЛЕННОСТЬ ИЗОЛЯТОВ
VENTURIA INAEQUALIS С УСТОЙЧИВОСТЬЮ К НЕСКОЛЬКИМ
ХИМИЧЕСКИМ КЛАССАМ ФУНГИЦИДОВ IN VITRO
А.И. Насонов, Г.В. Якуба, М.В. Бардак,
Н.А. Марченко 412

СИСТЕМА СЕЛЕКЦИИ И СЕМЕНОВОДСТВА

РАСОСПЕЦИФИЧЕСКАЯ ЛИСТОВАЯ И КОРНЕВАЯ
УСТОЙЧИВОСТЬ РАПСА (*BRASSICA NAPUS* L.) К *XANTHOMONAS CAMPESTRIS* PV. *CAMPESTRIS*
А.В. Вишнякова, М.А. Никитин, О.О. Румянцева,
А.А. Миронов, С.Г. Монахос 434

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЛЕСНОЙ
СЕЛЕКЦИИ И СОРТОВОГО СЕМЕНОВОДСТВА
ДЛЯ ЛЕСОМЕЛИОРАЦИИ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ
С.Н. Крючков, А.И. Беляев, А.М. Пугачёва,
А.С. Соломенцева, С.А. Егоров, А.К. Романенко 456

ОЦЕНКА ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ СОРТОВ И ГИБРИДОВ
МАСЛИНЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ
С.Ю. Цюпка, Ю.В. Плугатарь, В.А. Цюпка,
И.В. Булавин 478

САДОВОДСТВО И ЛЕСОВОДСТВО

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ
ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ
РАСТЕНИЙ *ULMUS PUMILA* L. К НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ФАКТОРАМ
СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ
Е.В. Калмыкова, К.А. Мельник, А.И. Передриенко 505

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

ИНВАЛИДНОСТЬ ВЗРОСЛОГО НАСЕЛЕНИЯ ПО ПРИЧИНЕ ВИЧ-ИНФЕКЦИИ: РЕГИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТ
И.А. Джиоева, З.Б. Дзираева, З.Р. Аликова 521

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА МУНИЦИПАЛЬНОГО РАЙОНА
Я.М. Иваньо, С.А. Петрова 535

ФЕНО-ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНТЕРОМИКРОБИОТЫ ДИКИХ И ЗООПАРКОВЫХ ЖИВОТНЫХ КАК ПРИРОДНОГО РЕЗЕРВУАРА АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНЫХ ШТАММОВ МИКРООРГАНИЗМОВ
В.И. Плешакова, Н.А. Лещёва, Т.И. Лоренгель 553

ОПЫТ РЕГИОНОВ

ПАРАЗИТОФАУНА РЫБ ТАВУШСКИХ ВОДОЕМОВ
Л.Г. Григорян, А.Р. Акобян, Ж.С. Мелконян, С.В. Ерибекян, Г.С. Баласанян, В.В. Григорян 570

ВОЗВРАЩЕНИЕ ЗАБРОШЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ В РЕЖИМ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МАСШТАБЫ ЭТОГО ПРОЦЕССА
А.С. Некрич 590

ПОСЛЕУБОЙНАЯ ДИАГНОСТИКА ПАСТЕРЕЛЛЕЗА СВИНЕЙ
А.Р. Акобян 610

О ФУНДАМЕНТАЛЬНОМ ВКЛАДЕ ИВАНА ВЛАДИМИРОВИЧА ХОЛИКОВА В РАЗВИТИЕ МЕДИЦИНЫ, ОРГАНИЗАЦИИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ И МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В ОБЛАСТИ ВОЕННОЙ МЕДИЦИНЫ (К 50-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ УЧЕНОГО) 628

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 631

CONTENTS

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

EFFECTS OF PHYTOBIOTIC FEED ADDITIVES ON PRODUCTIVITY AND GUT MICROBIOTA OF COMMON CARP
E.P. Miroshnikova, E.V. Yausheva, A.E. Arinzhanov, Y.V. Kilyakova 11

ASSESSMENT OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE LEVEL OF SOMATROPIN IN HAIR AND MEAT QUALITIES OF HEREFORD BULLS
O.A. Zavyalov, A.N. Frolov, I.I. Sleptsov 30

PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY

INFLUENCE OF DIFFERENT PROCESSING METHODS ON THE PHYTOCHEMICAL COMPOSITION OF LEAVES AND CONES OF COMMON HOPS (*HUMULUS LUPULUS* L.)
D. Al Hussein, E. Almugrabi, A.A. Mostyakova, O.A. Timofeeva 60

GENOTYPING OF *GLEDITSIA TRIACANTHOS* L. BASED ON RBCL GENE EXPRESSION AND USING ISSR MARKERS IN ARID CLIMATE CONDITIONS
P.A. Krylov, P.A. Kuzmin 82

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE

DYNAMICS OF HEAVY METALS CONTENT IN THE IRTYSH RIVER WATER DURING THE OPEN WATER PERIOD WITHIN THE BOUNDARIES OF OMSK REGION
N.N. Zharkova, O.P. Bazhenova, A.S. Boltovskaya 98

QUALITY IMPROVEMENT BIOASSAY PROCEDURE IN SPECIALIZED LABORATORIES
A.S. Olkova 124

VERMITRANSFORMATION OF BIODEGRADABLE
DISPOSABLE TABLEWARE
E.V. Antonova, I.V. Pashkova, A.B. Kupchinsky, S.L. Maximova, D.I. Stom 140

USE OF ICE INDEX FOR SATELLITE
MONITORING OF IRRIGATION MASSIFS
AND LAND CONDITIONS
I.Yu. Savin, A.G. Terekhov, R.I. Mukhamediev 154

BIOCHEMISTRY, GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

ASSESSMENT OF THE LEVEL
OF OXIDATIVE MODIFICATION OF PROTEINS
ADAPTED MILK MIXTURES
Yu.G. Rosenfeld, V.E. Vysokogorskiy, Yu.A. Podolnikova, N.V. Strelchik, N.L. Chernopolskaya 176

ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF GREEN
SYNTHESIZED SILVER NANOPARTICLES
USING AQUEOUS EXTRACT OF AELUROPUS
LITTORALIS AND THEIR ANTICANCER
AND ANTIOXIDANT PROPERTIES
A.M. Alrudainy, A.A. Shareef 195

THE ECO-FREIENDLY SYNTHESIS
OF SILVER NANOPARTICLES (AgNPs) USING
MARANTA LEUCONEURA ETHANOLIC EXTRACT
WITH THE ASSESSMENT OF ANTIBACTERIAL,
ANTIOXIDANT, ANTICANCER ACTIVITIES
N.M. Alassadi, G.J. Al-Ghizzawi 217

IDENTIFICATION OF THE CARRIERS
OF THE MUTANT ALLELES IN THE CATTLE
IN THE CENTRAL BLACK EARTH REGION
OF RUSSIA USING NGS SEQUENCING
E.A. Snegin, A.S. Barkhatov, A.A. Sychev, E.A. Snegina, S.R. Yusupov, A.Yu. Yusupova 237

THE RESULTS OF THE STUDY OF THE EFFECTS OF GLYPHOSATE AND ANTIBIOTICS ON THE COMPOSITION AND FUNCTIONS OF THE INTESTINAL MICROBIOME OF BROILERS
D.G. Tyurina, E.A. Yildirim, G.Y. Laptev, N.I. Novikova, L.A. Ilyina, V.A. Filippova, A.V. Dubrovin, K.A. Kalitkina, E.S. Ponomareva, I.A. Klyuchnikova, V.A. Zaikin, E.P. Gorfunkel 261

"PROBABLE ACETYLTRANSFERASE" TTHA1209 *THERMUS THERMOPHILUS* BACTERIA: GENE CLONING, STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF THE ENZYME
T.A. Kudryashov, E.V. Loktyushov, M.V. Trunilina, V.V. Bykov, A.S. Sokolov, Yu.S. Lapteva 295

SPECIES IDENTIFICATION OF BACTERIA OF THE GENUS *CLOSTRIDIUM*, ISOLATED FROM CATTLE, BY MULTIPLEX REAL-TIME PCR
A.V. Nefedchenko, T.E. Sudorgina, T.I. Glotova, S.V. Koteneva, A.G. Glotov 315

SOIL FERTILITY AND PLANT PROTECTION

ANALYSIS OF GENE EXPRESSION CHANGES IN CANOLA IN RESPONSE TO INOCULATION WITH BIOTIC AND ABIOTIC ELICITORS TO *ALTERNARIA BRASSICAE*
J.T. Alkooranee 334

PRODUCT QUALITY OF DIFFERENT CUCUMBER HYBRIDS (*CUCUMIS SATIVUS* L.) DEPENDING ON THE FRUITING PERIOD AND SOWING TIME IN GREENHOUSES
V.A. Gulidova, R.V. Schuchka, V.L. Zakharov, Yu.V. Popov, B.A. Sotnikov 350

CULTIVATION OF SUNFLOWER HYBRIDS DEPENDING ON TREATMENT WITH AGROCHEMICALS IN CONDITIONS OF THE SOUTHERN PART OF THE NON-BLACK EARTH REGION OF THE RUSSIA
D.V. Lebedev, D.V. Vinogradov, T.V. Zubkova, M.P. Makarova 370

APHIDOPHAGES OF THE BLACK SEA COAST
OF THE KRASNODAR TERRITORY AND THEIR ROLE
IN REGULATING THE NUMBER OF PESTS
E.V. Kashutina, L.N. Bugaeva, T.N. Ignatieva 387

FITNESS OF *VENTURIA INAEQUALIS* ISOLATES WITH RESISTANCE
TO MULTIPLE CHEMICAL CLASSES OF FUNGICIDES IN VITRO
A.I. Nasonov, G.V. Yakuba, M.V. Bardak, N.A. Marchenko 412

PLANT BREEDING AND SEED PRODUCTION

RACE-SPECIFIC LEAF AND ROOT RESISTANCE OF WINTER OILSEED
RAPE (*BRASSICA NAPUS* L.) TO *XANTHOMONAS CAMPESTRIS* PV.
CAMPESTRIS
A.V. Vishnyakova, M.A. Nikitin, O.O. Rumiantseva,
A.A. Mironov, S.G. Monakhos 434

EFFECTIVE METHODS OF FOREST BREEDING AND VARIETAL SEED
PRODUCTION FOR FOREST RECLAMATION OF ARID TERRITORIES
OF EUROPEAN RUSSIA
S.N. Kryuchkov, A.I. Belyaev, A.M. Pugacheva,
A.S. Solomentseva, S.A. Egorov, A.K. Romanenko 456

DROUGHT RESISTANCE ASSESSMENT OF EUROPEAN OLIVE
CULTIVARS AND HYBRIDS
S.Yu. Tsiupka, Y.V. Plugatar, V.A. Tsiupka, I.V. Bulavin 478

HORTICULTURE AND FORESTRY

PHYSIOLOGICAL PARAMETERS FORMATION OF DROUGHT
RESISTANCE IN THE PROCESS OF ADAPTATION OF PLANTS
ULMUS PUMILA L. TO ADVERSE ENVIRONMENTAL FACTORS
IN THE CONDITIONS OF THE ASTRAKHAN REGION
E.V. Kalmykova, K.A. Melnik, A.I. Peredrienko 505

PUBLIC HEALTH AND PREVENTIVE MEDICINE

DISABILITY OF THE ADULT POPULATION DUE
TO HIV INFECTION: A REGIONAL ASPECT
Dzhioeva I.A., Z.B. Dziraeva, Z.R. Alikova 521

INTERDISCIPLINARY RESEARCH

COMPREHENSIVE ASSESSMENT
OF THE DEVELOPMENT POTENTIAL OF PLANT PRODUCTION
IN THE MUNICIPAL DISTRICT
Ya.M. Ivanyo, S.A. Petrova 535

PHENO-GENOTYPIC CHARACTERIZATION
OF THE ENTEROMICROBIOTA OF WILD AND ZOO ANIMALS
AS A NATURAL RESERVOIR OF ANTIBIOTIC-RESISTANT
MICROBIAL STRAINS
V.I. Pleshakova, N.A. Lescheva, T.I. Lorengel 553

EXPERIENCE OF REGIONS

FISH PARASITOFAUNA OF TAVUSH RESERVOIRS
**L.G. Grigoryan, A.R. Hakobyan, Zh.S. Melkonyan,
S.V. Yeribekyan, H. S. Balasanyan, V.V. Grigoryan** 570

INVOLVEMENT OF ABANDONED AGRICULTURAL LAND
IN BRYANSK OBLAST TO AGRICULTURAL USE AND FACTORS
DETERMINING THE SCALE OF THIS PROCESS
A.S. Nekrich 590

POST-MORTEM DIAGNOSIS OF PIG PASTERELLOSIS
A.R. Akobian 610

ON THE FUNDAMENTAL CONTRIBUTION
OF IVAN VLADIMIROVICH KHOLIKOV TO THE DEVELOPMENT
OF MEDICINE, HEALTHCARE ORGANIZATION AND INTERNATIONAL
COOPERATION IN THE FIELD OF MILITARY MEDICINE
(DEDICATED TO THE 50TH ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST) 628

RULES FOR AUTHORS 631

Подписано в печать 30.04.2025. Дата выхода в свет 30.04.2025. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 46,02. Тираж 50 экз. Свободная цена. Заказ SJLSA172/025. Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Издательство «Авторская Мастерская» (ИП Давгуненко А.А. ИНН 344210747590). Адрес типографии: ул. Проезд Добролюбова 3 стр. 2, г. Москва, 127254, Россия.