

ИЗВЕСТИЯ

ТИМИРЯЗЕВСКОЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
АКАДЕМИИ

Научно–теоретический журнал
Российского государственного аграрного университета —
МСХА имени К.А. Тимирязева

Сообщаются результаты экспериментальных, теоретических и методических исследований в различных областях сельскохозяйственной науки и практики, выполненных в разных природно–экономических зонах страны

Основан в 1878 году
6 номеров в год

Выпуск

6

ноябрь–декабрь

Москва
Издательство РГАУ-МСХА
2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: д.с.-х.н., д.э.н., академик РАН, проф. **В.И. Трухачев**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.с.-х.н., профессор **С.Л. Белопухов**; доктор наук, PhD, профессор **Р. Валентини** (Италия);
д.б.н., профессор **И.И. Васенев**; д.э.н., профессор **Р.С. Гайсин**;
д.э.н., профессор **А.В. Голубев**; д.с.-х.н., профессор **С.А. Грикшас**;
д.с.-х.н., профессор **Ж. Данаилов** (Болгария); д.б.н., профессор **Ф.С. Джалилов**;
профессор **Д.А. Джукич** (Сербия); д.с.-х.н., профессор, академик РАН **Н.Н. Дубенок**;
д.в.н., профессор **Г.П. Дюльгер**; д.б.н., профессор **А.А. Иванов**;
д.б.н., профессор, академик РАН **В.И. Кирюшин**; д.б.н., профессор **В.Н. Корзун** (Германия);
д.в.н., профессор **Р.Г. Кузьмич** (Беларусь); д.б.н., профессор **Я.В. Кузяков** (Германия);
д.с.-х.н., профессор **Н.Н. Лазарев**; д.с.-х.н., профессор **В.И. Леунов**;
д.с.-х.н., профессор, академик РАН **В.М. Лукомец**; д.б.н., профессор **А.Г. Маннапов**;
д.б.н., профессор, академик НАНУ и НААНУ **Д.А. Мельничук** (Украина);
к.э.н., PhD MSU, **Р.А. Мигунов**; к.с.-х.н. **Г.Ф. Монахос**; д.с.-х.н., профессор **С.Г. Монахос**;
д.б.н., профессор **В.Д. Наумов**; д.т.н., профессор, академик РАН **В.А. Панфилов**;
д.б.н., профессор **С.Я. Попов**; д.х.н., профессор **Н.М. Пржевальский**;
д.с.-х.н., профессор **А.К. Раджабов**; д.с.-х.н., профессор **Г.В. Родионов**;
д.б.н., профессор **В.С. Рубец**; д.э.н., профессор, чл.-корр. РАН **Н.М. Светлов**;
д.б.н., профессор **М.И. Селионова**; к.б.н., доцент **О.В. Селицкая**;
д.б.н., профессор **А.А. Соловьев**; д.б.н., профессор **И.Г. Тараканов**;
д.б.н., профессор **С.П. Торшин**; д.в.н., профессор **С.В. Федотов**;
д.б.н., профессор **Л.И. Хрусталева**; д.с.-х.н., профессор **В.А. Черников**;
д.э.н., профессор **С.А. Шелковников**; д.т.н., профессор **И.Н. Шило** (Беларусь);
д.с.-х.н., профессор **А.В. Шитикова**; д.с.-х.н., профессор **А.С. Шуварики**;
д.с.-х.н., профессор, академик РАН **Ю.А. Юлдашбаев**

Редакция

Научный редактор – **А.В. Лебедев**

Редактор – **В.И. Марковская**

Перевод на английский язык – **Н.А. Сергеева**

Компьютерная верстка – **А.С. Лаврова**

Журнал входит в перечень

ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК

Журнал включен в базы данных BIOSIS (WoS), RSCI (WoS),

CA(pt), CrossRef, AGRIS, РИНЦ, ядро РИНЦ

Правила оформления научных статей для опубликования в журнале «Известия ТСХА» размещены в Интернете (https://izvestiia.timacad.ru/jour/manager/files/1603286771_treb_stat.pdf)

Плата с аспирантов за публикацию статей не взимается

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2025

© Издательство РГАУ-МСХА, 2025

IZVESTIYA

of
Timiryazev Agricultural Academy

Academic Journal
of Russian Timiryazev State Agrarian University

The journal publishes the results of experimental,
theoretical and procedural research in different areas
of agricultural science and practice carried out
in various natural and economic zones of the country

Founded in 1878
Six issues per year

Issue

6

November–December

Moscow
Publishing house of Russian Timiryazev State Agrarian University
2025

EDITOR-IN-CHIEF: Prof. **Vladimir I. Trukhachev**,
DSc (Ag), DSc (Econ), Full Member of RAS

EDITORIAL BOARD

Prof. **Sergey L. Belopukhov**, DSc (Ag); Prof. **Riccardo Valentini**, DSc, PhD (Italy);
Prof. **Ivan I. Vasenev**, DSc (Bio); Prof. **Rafkat S. Gaysin**, DSc (Econ);
Prof. **Aleksei V. Golubev**, DSc (Econ); Prof. **Styapas A. Griksas**, DSc (Ag);
Prof. **Zhivko Danailov**, DSc (Ag) (Bulgaria); Prof. **Fevzi S. Dzhalilov**, DSc (Bio);
Prof. **Dragutin A. Djukic** (Serbia); Prof. **Nikolai N. Dubenok**, DSc (Ag), Full Member of RAS;
Prof. **Georgy P. Dulger**, DSc (Vet); Prof. **Aleksei A. Ivanov**, DSc (Bio);
Prof. **Valerii I. Kiryushin**, DSc (Bio), Full Member of RAS; Prof. **Victor N. Korzun**, DSc (Bio) (Germany);
Prof. **Rostislav G. Kuzmich**, DSc (Vet) (Belarus); Prof. **Yakov V. Kuzyakov**, DSc (Bio) (Germany);
Prof. **Nikolay N. Lazarev**, DSc (Ag); Prof. **Vladimir I. Leunov**, DSc (Ag);
Prof. **Vyacheslav M. Lukomets**, DSc (Ag), Full Member of RAS; Prof. **Alfir G. Mannapov**, DSc (Bio);
Prof. **Dmitrii A. Melnichuk**, DSc (Bio), Member of NASU and NAASU (Ukraine);
Rishat A. Migunov, CSc (Econ), PhD MSU; **Grigory F. Monakhos**, CSc (Ag);
Prof. **Sokrat G. Monakhos**, DSc (Ag); Prof. **Vladimir D. Naumov**, DSc (Bio);
Prof. **Victor A. Panfilov**, DSc (Eng), Full Member of RAS; Prof. **Sergei Ya. Popov**, DSc (Bio);
Prof. **Nikolai M. Przhevalskiy**, DSc (Chem); Prof. **Agamagomed K. Radzhabov**, DSc (Ag);
Prof. **Gennady V. Rodionov**, DSc (Ag); Prof. **Valentina S. Rubets**, DSc (Bio);
Prof. **Nikolai M. Svetlov**, DSc (Econ), Corresponding Member of RAS;
Prof. **Marina I. Selionova**, DSc (Bio); Assoc. Prof. **Olga V. Selitskaya**, CSc (Bio);
Prof. **Alexander A. Soloviev**, DSc (Bio); Prof. **Ivan G. Tarakanov**, DSc (Bio);
Prof. **Sergei P. Torshin**, DSc (Bio); Prof. **Sergei V. Fedotov**, DSc (Vet);
Prof. **Ludmila I. Khrustaleva**, DSc (Bio); Prof. **Vladimir A. Chernikov**, DSc (Ag);
Prof. **Sergey A. Shelkovnikov**, DSc (Econ); Prof. **Ivan N. Shilo**, DSc (Eng) (Belarus);
Prof. **Aleksandra V. Shitikova**, DSc (Ag); Prof. **Anatolii S. Shuvarikov**, DSc (Ag);
Prof. **Yusupzhan A. Yuldashbayev**, DSc (Ag), Full Member of RAS

EDITORIAL STAFF

Scientific editor – **Aleksandr V. Lebedev**

Editor – **Vera I. Markovskaya**

Translation into English – **Natalya A. Sergeeva**

Computer design and making-up – **Anneta S. Lavrova**

The journal is listed in the VAK (Higher Attestation Commission) register
of the top peer reviewed journals and editions

The journal is also included in BIOSIS (WoS), RSCI (WoS), CA(pt), CrossRef, AGRIS,
Russian Index of Science Citation, Core Collection of Russian Index of Science Citation

Article submission guidelines of the journal “Izvestiya of TAA” are available
at https://izvestiia.timacad.ru/jour/manager/files/1603286771_treb_stat.pdf

Articles submitted by postgraduates are exempt from the processing charge

УЧЕННЫЕ ТИМИРЯЗЕВКИ

К 95-летию профессора Игоря Иоганновича Грандберга (1930–2011)

Николай Михайлович Пржевальский✉, Геннадий Петрович Токмаков

✉ **Автор, ответственный за переписку:** prjevalski@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается научная и педагогическая деятельность выдающегося советского и российского ученого в области органической химии, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, доктора химических наук, профессора Игоря Иоганновича Грандберга. Приведена краткая биография ученого, показан его вклад в отечественную и мировую науку. Научные интересы И.И. Грандберга были связаны с разработкой новых способов синтеза и изучением химических и биологических свойств гетероциклических соединений. В этом разделе химии он открыл новую важную реакцию, которая мировым сообществом была названа как «Реакция Грандберга». Рассмотрены достижения ученого в изучении механизма химических реакций, решении прикладных задач для различных отраслей народного хозяйства. Обсуждается значительный вклад И.И. Грандберга в подготовку кадров для агропромышленного комплекса страны, связанный с многократно переизданным учебником «Органическая химия» для бакалавров и специалистов по сельскохозяйственным, биологическим и медицинским специальностям.

Ключевые слова

Органическая химия, гетероциклические соединения, научная деятельность, пиразолы, триптамины, органические реакции, педагогическая деятельность

Для цитирования

Пржевальский Н.М., Токмаков Г.П. К 95-летию профессора Игоря Иоганновича Грандберга (1930–2011) // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 5–13.

SCIENTISTS OF TIMIRYAZEV ACADEMY

On the 95th anniversary of Professor Igor I. Grandberg (1930–2011)

Nikolay M. Przhevalskiy✉, Gennadiy P. Tokmakov

✉ **Corresponding author:** prjevalski@mail.ru

Abstract

This article examines the scientific and pedagogical activities of Igor I. Grandberg, a prominent Soviet and Russian scientist in the field of organic chemistry, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Chemical Sciences, and Professor. A brief biography of the scientist is presented, showcasing his contribution to both national and global science. I.I. Grandberg's scientific interests were focused on the development of novel synthetic methods and the study of the chemical and biological properties of heterocyclic compounds. In this area of chemistry, he discovered a significant

new reaction, which the international scientific community subsequently named the “Grandberg Reaction.” The article also discusses his achievements in studying the mechanisms of chemical reactions and solving applied problems for various sectors of the national economy. Furthermore, the significant contribution of I.I. Grandberg to the training of specialists for the country’s agro-industrial sector is discussed, particularly through his repeatedly reissued textbook “Organic Chemistry” for bachelor’s and specialist degree students in agricultural, biological, and medical areas.

Key words

Organic chemistry, heterocyclic compounds, scientific activities, pyrazoles, tryptamines, organic reactions, pedagogical activities

For citation

Przhevalskiy N.M., Tokmakov G.P. On the 95th anniversary of Professor Igor I. Grandberg (1930–2011). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 5–13.

Введение Introduction

19 февраля 2025 г. исполнилось 95 лет со дня рождения Игоря Иоганновича Грандберга, выдающегося советского и российского ученого, химика-органика, доктора химических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, автора именной «реакции Грандберга», автора и соавтора более 500 статей и 61 авторского свидетельства, учебника «Органическая химия» и практикума «Органическая химия. Практические работы и семинарские занятия». 46 лет трудовой деятельности Игорь Иоганнович провел в Тимирязевской академии, 30 лет был заведующим кафедрой органической химии, которая в этот период стала одной из ведущих в стране. Поэтому юбилейная статья, посвященная памяти ученого, является весьма актуальной.

Цель исследований: описать научную, педагогическую и общественную деятельность выдающегося ученого, создателя научной школы органической химии в академии – профессора Игоря Иоганновича Грандберга.

Методика исследований Research method

Исследования были проведены в библиотеке химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, в Центральной научной библиотеке имени Н.А. Железнова Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, в сети Интернет в 2024 г. Были подробно проанализированы научные и педагогические труды профессора И.И. Грандберга и его учеников, что позволило дополнить и расширить представление о роли И.И. Грандберга в развитии отечественной и мировой химической науки.

Результаты и их обсуждение Results and discussion

Игорь Иоганнович Грандберг родился 19 февраля 1930 г. в Москве. Окончив среднюю школу, он поступил на химический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, который окончил с отличием в 1953 г. Через 3 года (1956 г.) И.И. Грандберг успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Некоторые реакции азинов» (руководитель – профессор А.Н. Кост).

Свою дальнейшую научную деятельность И.И. Грандберг посвятил химии гетероциклических соединений. В 1962 г. он блестяще защитил докторскую диссертацию «Исследования пиразолов» и оказался самым молодым доктором химических наук в СССР. Результаты этой фундаментальной работы оказались настолько важными, что были опубликованы в 1966 г. в престижном международном научном журнале [1]. Отметим, что Игорь Иоганнович называл своим учителем профессора МГУ Алексея Николаевича Коста, который, несомненно, повлиял на его творческий научный почерк. Знаменательно, что в 2006 г. профессор И.И. Грандберг был награжден медалью имени профессора А.Н. Коста за выдающиеся достижения в области химии азотистых гетероциклов.

В 1965 г. молодого ученого пригласили на освободившуюся должность заведующего кафедрой органической химии Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева, и вся последующая научно-педагогическая деятельность Игоря Иоганновича была связана с этим вузом. Начиная практически с нуля, И.И. Грандберг создал кафедру,

которую в химических кругах называли филиалом химфака МГУ. Он привлек для работы на кафедре уже известных ученых (профессор В.Н. Дрозд и профессор Р.А. Хмельницкий) и перспективных молодых ученых – выпускников ведущих химических вузов.

И.И. Грандберг оснастил кафедру самыми современными спектральными приборами, прекрасным лабораторным оборудованием, химической посудой (которой не было даже в МГУ). Кроме спектральной и хроматографической лабораторий, на кафедре были созданы лаборатории микроанализа и фотолиза, а также стеклодувная мастерская. Все это предоставляло возможность вести научную работу на высочайшем уровне. В течение 30 лет (1965–1995) он руководил кафедрой, но и после продолжал проводить эксперименты до конца своей жизни.

Результаты, полученные в ходе исследований И.И. Грандберга, способствовали существенному развитию химии гетероциклических соединений. На наш взгляд, главная причина такого бурного развития – это творческий почерк исследователя. Он заключался, во-первых, в строгой логике при решении синтетических задач, во-вторых, в обязательном выяснении механизма химических реакций и, наконец, в-третьих, в непременном изучении путей практического применения полученных соединений. Именно такой подход к научному поиску характеризует все работы И.И. Грандберга и становится определяющим в работах его учеников.

В начальный период самостоятельной научной деятельности И.И. Грандберг впервые систематически изучил вопросы корреляции между электронной структурой, сопряжением и реакционной способностью двухъядерных гетероароматических систем [2]. Продолжая исследования гетероциклов, Игорь Иоганнович Грандберг открыл новый одностадийный синтез триптамина – важнейших производных индола [3]. Эта реакция оказалась настолько удобной, важной и перспективной, что с ее помощью на кафедре впервые были получены неизвестные или труднодоступные ранее биологически активные производные триптамина, в том числе азатриптамины, гомотриптамины, физовенины, эзеролины, триптофолы и гомотриптофолы, эзерины и гомоэзерины. По результатам



И. И. Грандберг

этих исследований было защищено 11 диссертаций на соискание ученой степени кандидата химических наук, получено 21 авторское свидетельство на изобретения. Всего под руководством И.И. Грандберга защищено 39 кандидатских диссертаций, при его участии в качестве консультанта – 5 докторских, получено 61 авторское свидетельство.

Обобщая данные по изучению механизма открытой реакции, И.И. Грандберг предположил [4], что ключевые стадии образования триптаминов по его реакции и индолов по реакции Фишера протекают по единому механизму [3,3]-сигматропного сдвига, что впоследствии было экспериментально подтверждено [5]. Данная гипотеза оказалась весьма плодотворной и позволила предсказать, объяснить и осуществить ряд реакций [6, 7].

В 1974 г. в ТСХА была издана монография И.И. Грандберга «Основы принципа сохранения симметрии молекулярных орбиталей» [8]. Этот труд он написал, творчески осмыслив и переложив на доступный язык теорию перициклических реакций нобелевских лауреатов Вудворда и Гофмана. Монография явилась первым в нашей стране пособием для студентов, аспирантов и научных сотрудников, посвященным новой концепции органической химии. Отметим, что И.И. Грандберг существенно развил данную теорию, предложенную для углеродных цепей, распространив ее на системы с гетероатомами [9].

Ученики профессора И.И. Грандберга были достойны своего учителя. Так, профессор Г.П. Токмаков обнаружил необычную перегруппировку арилиндолов в дибензазепины – важный класс биологически активных соединений [10]. Доцент Н.Л. Нам разработала оригинальный синтез новых конденсированных гетероциклических систем на основе amino- и оксипиразолов и β-дикарбонильных соединений [11].

Начиная с 70-х гг. XX столетия, коллектив кафедры по инициативе профессора И.И. Грандберга, при его участии и под его руководством решал ряд прикладных задач для различных отраслей народного хозяйства. Работы публиковались в престижных отечественных и международных журналах. Для химической и нефтехимической промышленности был разработан перспективный метод очистки сернистых щелоков нефтепереработки от вредных органических примесей – фенолов и меркаптанов [12].

Были найдены композиции для изготовления долгоиграющих пластинок [13], активная среда для лазеров на растворах органических соединений [14], светостойкий полиметилметакрилат [15].

В 80-е – начале 90-х гг. по инициативе И.И. Грандберга проведены фундаментальные исследования по синтезу и спектрально-люминесцентным свойствам производных 7-аминокумаринов. [16]. Было найдено 45 веществ, которые имеют КПД генерации лазерного излучения не менее 20%. Ряд лазерных сред на основе 3-замещенных кумаринов обладает рекордными характеристиками по КПД или фотостабильности. Все синтезированные соединения защищены 7 авторскими свидетельствами. Работы были выполнены под непосредственным руководством М.А. Кирпичёнка – талантливого ученика профессора И.И. Грандберга, защитившим докторскую диссертацию по результатам этих исследований.

И.И. Грандберг постоянно соблюдал принцип, согласно которому исследования, проводимые на непрофилирующей кафедре в сельскохозяйственном вузе, должны иметь тематику, определяемую сельскохозяйственной наукой. В связи с этим на кафедре были организованы группа доцента Н.К. Семёновой (занималась строением, свойствами и классификацией гуминовых кислот почв) и группа Л.Б. Дмитриева (впоследствии – профессора), которая анализировала состав эфирных масел различных эфироносов [17]. Л.Б. Дмитриев был и остается ведущим специалистом в стране по применению метода хромато-масс-спектрометрии для анализа эфирных масел и других сельскохозяйственных продуктов [18]. Он является старейшим выпускником академии, впитавшим идеи профессора И.И. Грандберга, одаренным специалистом

как в области химии, так и в сфере эксплуатации весьма сложных приборов для физико-химических и спектральных исследований органических молекул.

Важной и востребованной оказалась работа, в которой был изучен процесс фотохимической деградации ряда пестицидов, широко используемых в сельскохозяйственной практике [19].

Педагогический талант профессора Игоря Иоганновича Грандберга в полной мере раскрылся при создании учебника «Органическая химия» (1974). Основной материал учебника написан на основе оригинального курса лекций, который И.И. Грандберг читал студентам агрохимического факультета. Его практикум «Органическая химия. Практические работы и семинарские занятия» (1973) способствовал развитию у студентов навыков анализа веществ, выделяемых из природных объектов. Обе книги неоднократно переиздавались (в 2019 г. вышло в свет 10-е издание учебника) и до сих пор используются в качестве базовых для подготовки бакалавров и специалистов по сельскохозяйственным, биологическим и медицинским специальностям.

Организационный талант И.И. Грандберга проявился в создании в конце 70 – начале 80-х гг. при кафедре органической химии сервисной лаборатории физико-химических методов исследования органических веществ (ИК-, УФ-, ЯМР масс-спектрометрия и хромато-масс-спектрометрия). В дальнейшем лаборатория развивалась и сейчас функционирует как важная структурная единица академии – Учебно-научный центр коллективного пользования – «Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений».

Все вышесказанное позволяет говорить о научной школе профессора И.И. Грандберга [20]. Его работы имеют фундаментальное значение для ряда разделов химии гетероциклических соединений. «Реакция Грандберга» – блестящее достижение школы, признание ее заслуг мировым химическим сообществом [21]. За первую четверть XXI в. опубликовано свыше 40 работ отечественных и зарубежных ученых, в которых реакцию Грандберга использовали для синтеза различных биологически активных соединений [22–27]. В этот перечень вошли некоторые значимые с нашей точки зрения работы.

По результатам научных исследований Игорь Иоганнович Грандберг опубликовал более 500 работ, в том числе свыше 60 авторских свидетельств на изобретения. Это веское доказательство новизны проведенных исследований, их значимости для народного хозяйства. Циклы работ профессора И.И. Грандберга дважды удостоивались первых премий на конкурсах, проводимых Всесоюзным химическим обществом им. Д.И. Менделеева: «Синтетические исследования и изыскание новых лекарственных препаратов в ряду пиразолов» (1961); «Исследования в области важнейших биогенных аминов индольного ряда» (1972).

И.И. Грандберг принимал активное участие в научно-организационной и общественной работе. В течение многих лет он был председателем специализированного совета по защите кандидатских диссертаций в МСХА имени К.А. Тимирязева, членом экспертного совета ВАК по докторским диссертациям, председателем ГЭК на химическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова (1965–1990), входил в состав редколлегии журналов «Известия ТСХА», «Журнал органической химии», издательства «Мир».

В 1995 г. И.И. Грандбергу было присвоено звание «Заслуженный деятель науки РФ». В 2010 г. ученый совет РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева была опубликована биобиблиография «Игорь Иоганнович Грандберг» [28].

И.И. Грандберг сохранял преемственность в руководстве. В 1995 г. он передал кафедру коллеге – профессору В.Н. Дрозду, затем ее возглавил профессор В.Н. Князев (1997 г.). С 2005 г., до ее объединения с кафедрой физической и коллоидной химии в 2011 г. кафедрой заведовал ученик И.И. Грандберга – профессор Н.М. Пржевальский.

В 6 учебном корпусе на третьем этаже, где ныне размещается отделение органической химии, установлена памятная доска с портретом ученого, с надписью «Здесь с 1965 по 2011 годы работал профессор, заслуженный деятель науки РФ ИГОРЬ ИОГАННОВИЧ ГРАНДБЕРГ (1930–2011)».

Выводы Conclusions

Многолетняя плодотворная научная и педагогическая деятельность Игоря Иоганновича Грандберга – яркий пример служения науке и Отечеству. За все время существования кафедры органической химии в академии (1890–2011) 45-летний период 1965–2010 гг. является самым выдающимся. Под руководством профессора И.И. Грандберга кафедра приобрела известность в ученом мире высоким уровнем исследований в различных научных направлениях: теоретическая органическая химия, органический синтез, химия гетероциклических соединений, проблемы сельскохозяйственной науки. Вершина достижений: «Реакция Грандберга» – это признание заслуг школы органической химии профессора И.И. Грандберга, роли РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в организации учебного и научного процессов. Несомненно, творческое научное наследие профессора Игоря Иоганновича Грандберга послужит будущим поколениям химиков академии.

Список источников

1. Kost A.N., Grandberg I.I. Progress in Pyrazole Chemistry. *Advances in Heterocyclic Chemistry*. 1966;6:347-429. [https://doi.org/10.1016/S0065-2725\(08\)60579-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2725(08)60579-6)
2. Грандберг И.И. О взаимной электроноакцепторности сопряженных ароматических систем // *Журнал общей химии*. 1963. Т. 33. С. 504–506.
3. Грандберг И.И., Зуянова Т.И., Афонина Н.И., Иванова Т.А. Новый метод синтеза важнейших биогенных аминов // *Доклады академии наук СССР*. 1967. Т. 176, № 3. С. 583–585.
4. Грандберг И.И. Индолы XXXIII. Синтез индолов по Фишеру и некоторые родственные реакции как сигматропные перегруппировки: Обзор // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1972. Вып. 5. С. 188-203
5. Грандберг И.И., Пржевальский Н.М., Ключев Н.А. Прямое доказательство протекания синтеза индолов по Фишеру по схеме сигматропной [3,3]-перегруппировки // *Химия гетероциклических соединений*. 1976. № 8. С. 1065–1071.
6. Грандберг И.И., Сорокин В.И., Направление циклизации арилгидразонов и о-фениловых эфиров оксимов несимметричных кетонов в условиях реакции Фишера: Обзор // *Успехи химии*. 1974. Т. 43. Вып. 2. С. 266–293.
7. Пржевальский Н.М., Костромина Л.Ю., Грандберг И.И. Новые данные о механизме синтеза индолов по Фишеру: Обзор // *Химия гетероциклических соединений*. 1988. № 7. С. 867–880. EDN: XDVXQD
8. Грандберг И.И. Основы принципа сохранения симметрии молекулярных орбиталей: Учебное пособие. Москва: ТСХА, 1974. 176 с.
9. Пржевальский Н.М., Грандберг И.И. Аза-перегруппировка Коупа в органическом синтезе // *Успехи химии*. 1987. Т. 56. Вып 5. С. 814–820. EDN: WSSIMV
10. Tokmakov G.P., Grandberg I.I. Rearrangement of 1-arylindoles to 5H-dibenz[b, f]azepines. *Tetrahedron*. 1995;51(7):2091-2098. [https://doi.org/10.1016/0040-4020\(94\)01082-B](https://doi.org/10.1016/0040-4020(94)01082-B)
11. Грандберг И.И., Нам Н.Л., Конденсированные системы на базе аминокислот и оксипиразолов и β-дикарбонильных соединений: Обзор / Под ред. В.Г. Карцева

- // *Избранные методы синтеза и модификации гетероциклов*. Москва: IBS PRESS, 2003. Т. 2. С. 228–247.
12. Грандберг И.И., Пржевальский Н.М., Либин А.Л. Очистка сернистых щелоков нефтепереработки от органических примесей с помощью параформа и кристаллизации // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1975. Вып. 3. С. 201–204. EDN: WWCAKX
13. Авторское свидетельство 279047 А1 (СССР): С08f 29/18, С08f 45/44. Композиция для изготовления долгоиграющих пластинок / И.И. Грандберг, В.М. Хазанджи, Л.Н. Солдатова, 1970.
14. Авторское свидетельство 819873 А1 (СССР): H01S3/20. Активная среда для лазеров на растворах органических соединений / Грандберг И.И., Денисов Л.К., Козлов Н.А., Ланцов А.М. и др., 1981.
15. Авторское свидетельство 1776659 А1 (Российская Федерация: С08f 120/14. Светостойкий полиметилметакрилат с люминофорными звеньями в цепи / Грандберг И.И., Барашков Н.Н., Сахно Т.В., Муравьева Т.М. и др., 1992.
16. Горожанкин С.К., Кирпичёнок М.А., Грандберг И.И. Синтез 4-алкил-функционально замещенных 7-диалкиламинокумаринов // *Химия гетероциклических соединений*. 1990. № 10. С. 1326–1330.
17. Zamureenko V.A., Kluev N.A., Dmitriev L.B., Grandberg I.I. Gas-liquid combination in the analysis of essential oils. *Journal of Chromatography*. 1984;303(1):109-115. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)96050-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)96050-9)
18. Грандберг И.И., Замуреенко В.А., Ключев Н.А., Дмитриев Л.Б. Изучение состава эфирного масла мяты перечной (menthapiperita) с использованием хромато-масс-спектрологии // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1980. Вып. 1. С. 169–173. <http://elbib.timacad.ru/dl/full/23-1980-1.pdf>
19. Grandberg I.I., Brodsky E.S., Kluev N.A., Bocharov B.V. et. al. Photodegradation of the herbicide goal. *Toxicology & Environmental Chemistry*. 1992;34: 105-111. <https://doi.org/10.1080/02772249209357783>
20. Белопухов С.Л., Пржевальский Н.М., Смарицын С.Н. Научно-педагогическая школа химии в Петровской земледельческой и лесной академии – Российском государственном аграрном университете – МСХА имени К.А. Тимирязева // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2014. Вып. 6. С. 114–140. EDN: TLABQR
21. Джоуль Дж., Миллс К. *Химия гетероциклических соединений*. Москва: Мир, 2004. 452 с.
22. Лайпанов Р.К., Токмаков Г.П., Денисов П.Д., Пржевальский Н.М. Синтез триптамина по Грандбергу для мультикомпонентных реакций // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2012. Вып. 5. С. 123–129. EDN: PGERYX
23. Пржевальский Н.М., Лайпанов Р.К., Токмаков Г.П., Нам Н.Л. Реакция Грандберга в синтезе биологически активных соединений // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2016. № 7. С. 1709–1715. EDN: WJDCFX
24. Пржевальский Н.М., Лайпанов Р.К., Токмаков Г.П., Лукина И.В. и др. Синтез новых потенциально биологически активных пиранопиридонов с фрагментом триптамина // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2021. № 3. С. 555–561. EDN: CFWFHF
25. Пржевальский Н.М., Аникина Л.В., Глоба А.А., Токмаков Г.П. и др. Цитотоксичность пиранопиридонов с триптаминовым фрагментом // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2023. Вып. 3. С. 5–24. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-3-5-24>
26. Slade J., Parker D., Girgis M., Wu R. et al. Optimization and Scale-Up of the Grandberg Synthesis of 2-Methyltryptamine. *Organic Process Research & Developmen*. 2007;11(4):721-725. <https://doi.org/10.1021/op7000518>

27. Bosch J., Roca T. Armengol M., Fernández-Forner D. Synthesis of 5-(sulfamoylmethyl) indoles. *Tetrahedron*. 2001;57(6):1041-1048. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(00\)01091-7](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(00)01091-7)
28. Игорь Иоганович Грандберг: Материалы к биобиблиографии / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; Центральная научная библиотека имени Н.И. Железнова. Москва: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 83 с.

References

1. Kost A.N., Grandberg I.I. Progress in Pyrazole Chemistry. *Advances in Heterocyclic Chemistry*. 1966;6:347-429. [https://doi.org/10.1016/S0065-2725\(08\)60579-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2725(08)60579-6)
2. Grandberg I.I. About mutual electron acceptor of conjugated aromatic systems. *Zhurnal obshchei khimii*. 1963;33:504-506. (In Russ.)
3. Grandberg I.I., Zuyanova T.I., Afonina N.I., Ivanova T.A. A new method of synthesis of the most important biogenic amines. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1967;176(3):583-585. (In Russ.)
4. Grandberg I.I. Indoles XXXIII. Synthesis of indoles according to Fischer and some related reactions as sigmatropic rearrangements: a review. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1972;(5):188-203. (In Russ.)
5. Grandberg I.I., Przhevalskiy N.M., Kluev N.A. Direct evidence of the Fischer synthesis of indoles according to the sigmatropic [3,3] rearrangement scheme. *Khimiya geterotsiklicheskih soedineniy*. 1976;(8):880-885. (In Russ.)
6. Grandberg I.I., Sorokin V.I., Direction of cyclization of arylhydrazones and o-phenyl ethers of unsymmetrical ketone oximes under Fischer reaction conditions: a review. *Uspekhi khimii*. 1974;43(2):266-293. (In Russ.)
7. Przheval'skii N.M., Kostromina L. Yu., Grandberg I.I. New data on the mechanism of the fischer indole synthesis (review). *Khimiya geterotsiklicheskih soedineniy*. 1988;(7):867-880. (In Russ.)
8. Grandberg I.I. *Fundamentals of the principle of conservation of symmetry of molecular orbitals*: a textbook. Moscow, Russia: TSKhA;1974:176. (In Russ.)
9. Przhevalskiy N.M., Grandberg I.I. Aza-Cope rearrangement in organic synthesis. *Uspekhi khimii*. 1987;56(5):814-820. (In Russ.)
10. Tokmakov G.P., Grandberg I.I. Rearrangement of 1-arylindoles to 5H-dibenz[b, f]azepines. *Tetrahedron*. 1995;51(7):2091-2098. [https://doi.org/10.1016/0040-4020\(94\)01082-B](https://doi.org/10.1016/0040-4020(94)01082-B)
11. Grandberg I.I., Nam N.L. Condensed systems based on amino- and hydroxypyrazoles and β -dicarbonyl compounds. In: *Selected methods for the synthesis and modification of heterocycles*. V.G. Kartsev (Ed). Moscow, Russia: IBS PRESS, 2003;2:228-247. (In Russ.)
12. Grandberg I.I., Przhevalskiy N.M., Libin A.L. Purification of sulfurous oil refining liquors from organic impurities using paraform and crystallization. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1975;(3):201-204. (In Russ.)
13. Author's certificate 279047 A1 (USSR): C08f 29/18, C08f 45/44. Composition for making long-playing records. Grandberg I.I., Hazandzhi V.M., Soldatova L.N., 1970. (In Russ.)
14. Author's certificate 819873 A1 (USSR): H01S3/20. Active medium for lasers using solutions of organic compounds. Grandberg I.I., Denisov L.K., Kozlov N.A., Lantsov A.M. et. al., 1981. (In Russ.)
15. Author's certificate 1685947 A1 (Russian Federation): C08f 120/14. Light-resistant polymethylmethacrylate with phosphor links in the chain. Grandberg I.I., Barashkov N.N., Sakhno T.V., Muraviova T.M., 1992. (In Russ.)

16. Gorozhankin S.K., KirpichĖnok M.A., Grandberg I.I. Synthesis of 4-alkyl-functionally substituted 7-dialkylaminocoumarins. *Khimiya geterotsiklicheskikh soedineniy*. 1990;(10):1326-1330. (In Russ.)
17. Zamureenko V.A., Kluev N.A., Dmitriev L.B., Grandberg I.I. Gas liquid combination in the analysis of essential oils. *Journal of Chromatography*. 1984;303(1):109-115. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)96050-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)96050-9)
18. Grandberg I.I., Zamureenko V.A., Kluev N.A., Dmitriev L.B. Study of the composition of peppermint (menthapiperita) essential oil using gas chromatography-mass spectroscopy. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1980;(1):169-173. (In Russ.) <http://elib.timacad.ru/dl/full/23-1980-1.pdf>
19. Grandberg I.I., Brodsky E.S., Kluev N.A., Bocharov B.V. et. al. Photodegradation of the herbicide goal. *Toxicology. & Environmental Chemistry*. 1992;34:105-111. <https://doi.org/10.1080/02772249209357783>
20. Belopukhov S.L., Przhevalskiy N.M., Smarygin S.N. Scientific and pedagogical school of chemistry in Peter's Academy of Agriculture and Forestry – Russian Timiryazev State Agrarian University. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2014;(6):114-140. (In Russ.)
21. Joule J., Mills K. *Chemistry of heterocyclic compounds*. Moscow; Russia: Mir, 2004:452. (In Russ.)
22. Laipanov R.K., Tokmakov G.P., Denisov P.D., Przheval'skii N.M. Synthesis of tryptamines by the grandberg method for multi-component reactions use. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2012;(5):123-129. (In Russ.)
23. Przheval'skii N.M., Laipanov R.K., Tokmakov G.P., Nam N.L. The Grandberg reaction in the synthesis of biological active compounds. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Khimicheskaya*. 2016;(7):1709-1715. (In Russ.)
24. Przhevalskii N.M., Laipanov R.K., Tokmakov G.P., Lukina I.V. et. al. Synthesis of new potentially biologically active pyranopyridones with tryptamine fragment. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Khimicheskaya*. 2021;(3):555-561. (In Russ.)
25. Przhevalskiy N.M., Anikina L.V., Globa A.A., Tokmakov G.P. et. al. Cytotoxicity of pyranopyridones with tryptamine fragment. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2023;(3):5-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-3-5-24>
26. Slade J., Parker D., Girgis M., Wu R. et. al. Optimization and Scale-Up of the Grandberg Synthesis of 2-Methyltryptamine. *Organic Process Research & Development*. 2007;11(4):721-725. <https://doi.org/10.1021/op700051>
27. Bosch J., Roca T., Armengol M., Fernández-Fornier D. Synthesis of 5-(sulfamoylmethyl) indoles. *Tetrahedron*. 2001;57(6):1041-1048. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(00\)01091-7](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(00)01091-7)
28. *Essay on the life, scientific, pedagogical, educational activities of I.I. Grandberg*. Przhevalskiy N.M. et al. (Comp.). Moscow, Russia: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2016:83. (In Russ.)

Сведения об авторах

Николай Михайлович Пржевальский, д-р хим. наук, профессор; e-mail: prjevalski@mail.ru

Геннадий Петрович Токмаков, канд. хим. наук; e-mail: tokmakovgp@gmail.com

Information about the authors

Nikolay M. Przhevalskiy, DSc (Chem), Professor; e-mail: prjevalski@mail.ru

Gennadiy P. Tokmakov, CSc (Chem); e-mail: tokmakovgp@gmail.com

АГРОХИМИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ

**Возможность применения реологических исследований
при определении структурно-механических свойств почвы**

**Денис Викторович Доня[✉], Юлия Владиславовна Устинова,
Максим Валерьевич Просин, Ренат Салимович Хамитов,
Светлана Михайловна Хамитова, Юлия Александровна Мырксина**

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: priap@rgau-msha.ru

Аннотация

Приведены исследования реологических свойств образцов модельных почв при различной влажности с целью определения возможности повышения точности в определении реологических уравнений течения путем использования для обработки экспериментальных данных и кривых течения с применением программного продукта со встроенным математическим аппаратом. Исследованием структурно-механических свойств в процессе его деформирования занимается реология – наука о течении и деформации материалов. Исследование реологических свойств почвы позволит проследить характер межчастичных взаимодействий в почве и, кроме того, определить их структурно-механические свойства – такие, как вязкость, упругость, пластичность, предельное напряжение сдвига и т.п. Полученные результаты говорят о том, что все образцы модельных почв могут быть отнесены к структурно-вязким системам, для описания деформационного поведения которых применимо реологическое уравнение Оствальда-де-Вилля. Применив для обработки результатов экспериментальных данных, полученных методом ротационной вискозиметрии программного продукта, можно получить значения коэффициентов, входящих в реологическое уравнение, которые с соответствующей точностью описывают деформационное поведение исследованных образцов.

Ключевые слова

Реология, вискозиметрия, кривые течения, реологические уравнения, ньютоновская жидкость, индекс течения, ошибка аппроксимации

Для цитирования

Доня Д.В., Устинова Ю.В., Просин М.В., Хамитов Р.С. и др. Возможность применения реологических исследований при определении структурно-механических свойств почвы // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 14–24.

**Potential applications of rheological studies
in determining soil structural-mechanical properties**

**Denis V. Donya[✉], Yulia V. Ustinova, Maksim V. Prosin, Renat S. Khamitov,
Svetlana M. Khamitova, Yulia A. Myrksina**

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

[✉]**Corresponding author:** priap@rgau-msha.ru

Abstract

This study presents investigations into the rheological properties of model soil samples at various moisture contents. The aim was to determine the feasibility of enhancing the accuracy of rheological flow equation determination by employing a software product with an integrated mathematical apparatus for processing experimental data and flow curves. Rheology, the science of flow and deformation of materials, is concerned with the study of structural-mechanical properties during the deformation process. Investigating the rheological properties of soil will allow for tracing the nature of inter-particle interactions within the soil and, furthermore, for determining its structural-mechanical properties, such as viscosity, elasticity, plasticity, ultimate shear stress, and others. The obtained results indicate that all model soil samples can be classified as structural-viscous systems, for which the Ostwald-de Waele rheological equation is applicable for describing their deformation behavior. By utilizing a software product to process experimental data obtained by rotational viscometry, it is possible to derive the values of the coefficients within the rheological equation, which accurately describe the deformation behavior of the investigated samples.

Keywords

Rheology, viscometry, flow curves, rheological equations, Newtonian fluid, flow index, approximation error

For citation

Donya D.V., Ustinova Yu.V., Prosin M.V., Khamitov R.S. et al. Potential applications of rheological studies in determining soil structural-mechanical properties. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 14–24.

**Введение
Introduction**

С древних времен и до настоящего времени получение целого ряда пищевых продуктов неизменно связано с возделыванием почвы [1, 8, 13]. В течение всего этого времени менялись, как правило, только инструменты, при этом неизменным остается сам принцип возделывания. История развития инструмента для возделывания почвы продолжается уже многие сотни лет, при этом на протяжении всего этого времени развитие направлено на снижение трудозатрат при работе и, следовательно, на снижение себестоимости обработки. В последнее время при проектировании почвообрабатывающих инструментов применяют научный подход, который, помимо прочего, акцентирует внимание на структуре и свойствах обрабатываемого объекта [4, 7, 12, 13].

Почву можно отнести к многокомпонентной дисперсной системе, обладающей различными структурно-механическими свойствами [2, 9], причем эти свойства

не только будут отличаться в различных регионах страны, но даже в пределах одного поля возможны различия в зависимости от влажности, населяющих ее бактерий и организмов и т.д. Учет структурно-механических свойств почвы позволит более научно обоснованно подойти к решению не только вопроса проектирования почвообрабатывающей техники, но и других вопросов, касающихся сельскохозяйственной деятельности [3, 11].

Исследованием структурно-механических свойств в процессе его деформирования занимается реология – наука о течении и деформации материалов. Исследование реологических свойств почвы позволит проследить характер межчастичных взаимодействий в почве и, кроме того, определить их структурно-механические свойства – такие, как вязкость, упругость, пластичность, предельное напряжение сдвига и т.п. [5, 12].

Реологические исследования можно подразделить на исследования в статическом состоянии, например, с применением инденторов различного типа, и исследования деформационного поведения материала во времени. Для исследований второго типа применяются вискозиметры различного типа (капиллярные, шариковые, ротационные). Выбор типа вискозиметра зависит от требуемых задач и от исследуемого материала [3, 10].

Результатом измерений на вискозиметре является, как правило, так называемая «кривая течения», которая графически отображает деформационное поведение материала при заданных внешних воздействиях и строится в координатах «Напряжение сдвига – скорость сдвига» [3, 10]. По характеру полученной кривой течения исследуемый материал можно отнести к тому или иному типу реологических моделей и получить уравнение, описывающее поведение материала под нагрузками. Такое уравнение носит название «Реологическое уравнение». Однако процесс обработки экспериментальных данных и получение реологического уравнения – процесс сложный, и зачастую он дает не совсем точные результаты [5, 13]. Это связано с необходимостью графической обработки кривых течения оператором, что, несомненно, будет влиять на точность и достоверность результатов обработки. Следовательно, для повышения точности и субъективности обработки реологических исследований необходимо привлечение программного продукта со встроенным математическим аппаратом обработки данных.

Цель исследований: определение возможности повышения точности определения реологических уравнений течения путем использования для обработки экспериментальных данных и кривых течения с применением программного продукта со встроенным математическим аппаратом.

Методика исследований

Research method

Исследования проводились в лаборатории кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2024–2025 гг. В качестве объектов исследований выбраны модельные образцы почвы при разных значениях влажности ($W = 20 \dots 60\%$), обладающие сходным составом по элементарным почвенным частицам (примерный состав образцов: физической глины – 28,1%; песка – 10,0%; крупной пыли – 34,9%; средней и мелкой пыли – 16%). Измерение производили по известной методике на ротационном вискозиметре Brookfield Ametek (США) серии DV-E [6].

Для каждого измерения подготавливали требуемый объем образца с заданной влажностью и с определенной температурой. Подготовленный образец помещали

в измерительный стакан объемом 600 мл и устанавливали в прибор. Затем подобранный шпindel вискозиметра погружали в исследуемый образец и запускали прибор. Измерения проводились на всем диапазоне скоростей сдвига с фиксацией результатов измерения для каждой скорости. Таким образом, были получены данные для построения кривых течения для всех образцов с разной влажностью.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась как в среде Microsoft Office Excel 2021, так и с помощью специализированного программного продукта «Виртуальная модель кривых течения».

Обработка экспериментальных данных графическим методом в среде Microsoft Office Excel осуществляется следующим образом: все полученные результаты вносятся в таблицу, после чего по ним строится кривая течения в координатах «Напряжение сдвига – скорость сдвига». Помимо этого, по экспериментальным значениям рассчитываются значения вязкости для каждой скорости сдвига. Это необходимо для построения зависимости вязкости от скорости сдвига. По характеру полученных кривых (рис. 1) можно выделить следующие виды реологических тел [3, 5, 8, 13]:

- ньютоновская жидкость;
- псевдопластическая среда;
- структурно-вязкая среда;
- линейное пластичное тело;
- нелинейное пластичное тело.

Каждому из представленных реологических тел соответствует свое реологическое уравнение, которое связывает напряжения и деформации, возникающие при нагружении. В таблице 1 представлены эти реологические уравнения [3, 7, 9].

Определение входящих в реологические уравнения коэффициентов выполняется графическим методом, для чего необходимо представить графики течения в логарифмических шкалах. Однако данный процесс является трудоемким и не обеспечивает достаточно достоверной обработки результатов измерений, чем вносятся погрешности в конечное реологическое уравнение деформации исследуемого образца.

Для уменьшения времени и снижения трудоемкости обработки результатов экспериментальных исследований, для повышения точности получаемых реологических уравнений была создана программа «Виртуальная модель кривых течения». Данная программа позволяет в реальном времени получать различные реологические уравнения с определением ошибки аппроксимации [5].

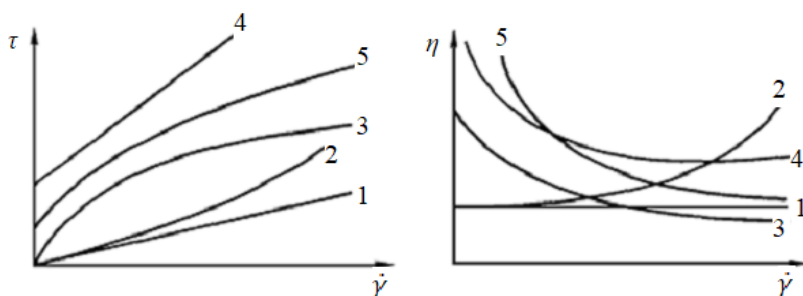


Рис. 1. Общий вид реологических кривых течения [3]:

- 1 – ньютоновская жидкость; 2 – псевдопластическая среда; 3 – структурно-вязкая среда;
4 – линейное пластичное тело; 5 – нелинейное пластичное тело

Figure 1. General view of rheological flow curves [3]:

- 1 – Newtonian fluid; 2 – pseudoplastic medium; 3 – structural-viscous medium;
4 – linear plastic body; 5 – non-linear plastic body

Основные реологические уравнения

Table 1

Basic rheological equations

№	Реологическое тело	Реологическое уравнение
1	Ньютоновская жидкость	$\tau = \eta / \dot{\gamma}$
2	Псевдопластическая среда	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$, при $0 < n < 1$
3	Структурно-вязкая среда	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$, при $n > 1$
4	Линейное пластичное тело	$\tau = \tau_0 + \eta_{пл}$
5	Нелинейное пластичное тело	$\tau = \tau_0 + B_0 \dot{\gamma}^n$

Примечание. τ – напряжение сдвига, Па; τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ; η – вязкость, Па·с; n – индекс течения; K – коэффициент консистенции; $\eta_{пл}$ – пластическая вязкость; B_0 – коэффициент, пропорциональный вязкости.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

По данным, полученным в результате проведенных исследований реологических свойств образцов модельных почв при заданных значениях влажности в среде Microsoft Office Excel, были построены кривые течения, представленные на рисунках 2, 3.

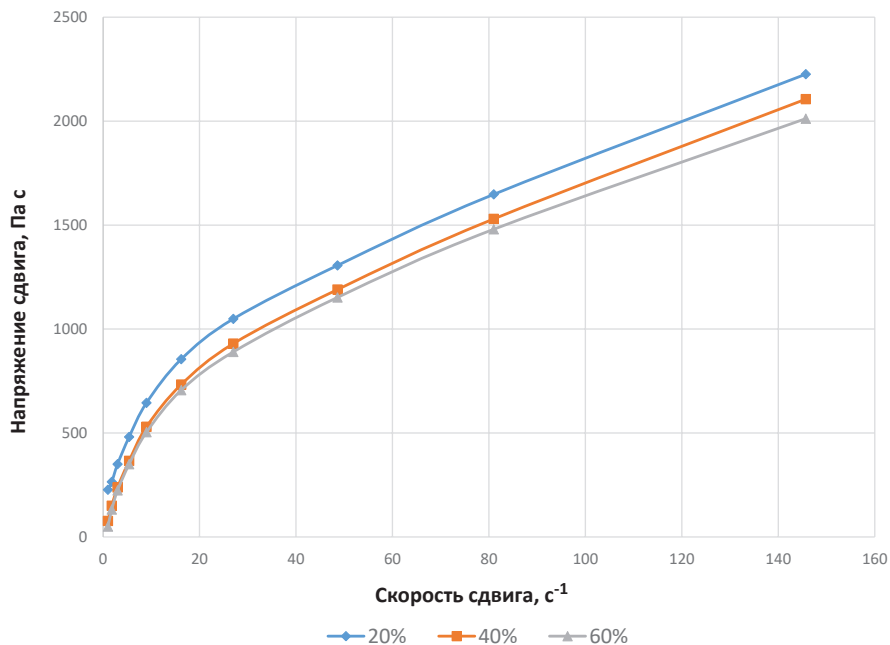


Рис. 2. Кривые течения образцов модельных почв

Figure 2. Flow curves of model soil samples

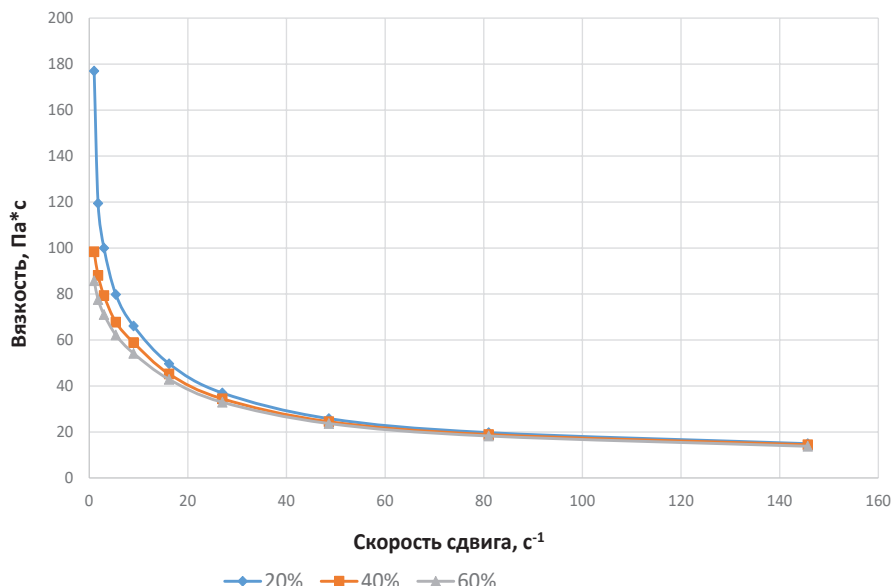


Рис. 3. Кривые вязкости образцов модельных почв

Figure 3. Viscosity curves of model soil samples

Анализируя полученные графические отображения деформационного поведения исследованных образцов модельных почв при разных значениях влажности, выяснили, что они имеют одинаковый характер реологического поведения. При этом с ростом значений влажности образцов снижается их сопротивление сдвиговой деформации, следовательно, значения вязкости так же снижаются. Образцы с влажностью 40 и 60% при малых скоростях деформации имеют довольно сходные значения напряжений сдвига, а при увеличении скорости деформации данное расхождение увеличивается. Это можно отнести к тому, что повышение влажности образцов приводит к снижению межчастичного взаимодействия, которое проявляется при увеличении значений внешнего воздействия.

Проведя анализ полученных кривых течения, можно сделать вывод о том, что все исследованные образцы модельных почв относятся к структурно-вязким средам, для описания реологического поведения которых применимо уравнение Оствальда-де-Вилля: $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ при $n > 1$. Для определения значений коэффициентов, входящих в это реологическое уравнение, необходимо перевести данные кривые в логарифмические координаты и затем, выполнив их анализ, получить значения коэффициентов. Однако облегчит данную задачу применение программного продукта. Для этого внесем данные в программу «Виртуальная модель кривых течения» и выберем соответствующее реологическое уравнение, по которому программа проведет обработку данных. Результатом работы программы являются как непосредственно кривая течения, так и реологическое уравнение, описывающее данную кривую, а также среднее квадратическое отклонение и средняя ошибка аппроксимации, по которой можно судить о точности обработки экспериментальных данных. Результаты обработки представлены на рисунке 4.

Реологическое уравнение, описывающее кривую течения каждого из исследуемых образцов, а также их среднее квадратическое отклонение и средние ошибки аппроксимации, представлены в таблице 2.

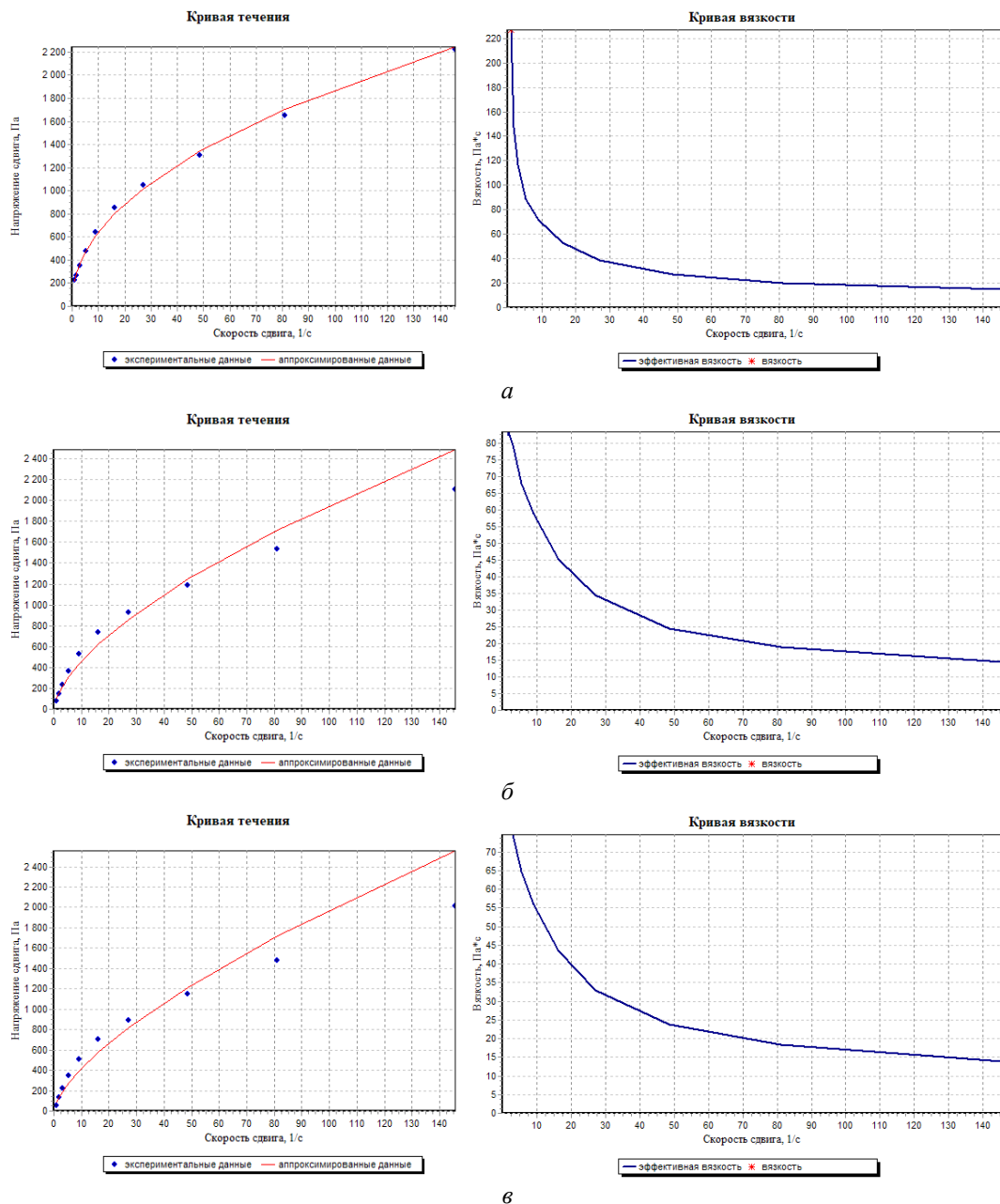


Рис. 4. Результаты обработки экспериментальных данных в программе «Виртуальная модель кривых течения» для образцов влажностью:
а – 20%; б – 40%; в – 60%

Figure 4. Results of processing experimental data in the program “Virtual Flow Curve Model” software for samples with moisture content:
а – 20%; б – 40%; в – 60%

Как следует из таблицы 2, ошибка обработки экспериментальных данных лежит в пределах, допустимых для дальнейшего применения в исследовательских или конструкторских целях.

**Результаты обработки экспериментальных данных
в программе «Виртуальная модель кривых течения»**

Table 2

Results of processing experimental data in the “Virtual Flow Curve Model” software

Влажность, %	Реологическое уравнение	Среднеквадратическое отклонение	Средняя ошибка аппроксимации
20	$\tau = 217,83 \cdot \dot{\gamma}^{0,47}$	1073,97	3,83
40	$\tau = 107,87 \cdot \dot{\gamma}^{0,63}$	1550,58	4,47
60	$\tau = 87,53 \cdot \dot{\gamma}^{0,68}$	2122,03	4,79

**Выводы
Conclusions**

В результате проведенных исследований реологических свойств модельных образцов почвы при разных значениях влажности (от 20 до 60%) были получены их кривые течения, отображающие деформационное поведение под действием внешних нагрузок. При анализе полученных графических отображений кривых течения исследованных образцов модельных почв при разных значениях влажности отмечен одинаковый характер их реологического поведения. При этом с ростом значений влажности образцов снижается их сопротивление сдвиговой деформации, следовательно, значения вязкости также снижаются.

Образцы с влажностью 40 и 60% при малых скоростях деформации имеют довольно сходные значения напряжений сдвига, а при увеличении скорости деформации данное расхождение увеличивается. Это можно объяснить тем, что повышение влажности образцов приводит к снижению межчастичного взаимодействия, которое проявляется при увеличении значений внешнего воздействия.

Помимо этого, можно сделать вывод о том, что все они могут быть отнесены к структурно-вязким системам, для описания деформационного поведения которых применимо реологическое уравнение Оствальда-де-Вилля: $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ при $n > 1$. Применяв для обработки результатов экспериментальных данных, полученных методом ротационной вискозиметрии программного продукта «Виртуальная модель кривых течения», получили значения коэффициентов, входящих в реологическое уравнение, которые с соответствующей точностью (средняя ошибка аппроксимации – не более 5%) описывают деформационное поведение исследованных образцов.

Таким образом, реологические свойства можно отнести к одному из показателей физического состояния почвы, имеющих как исследовательское, так и практическое значение. Применение полученных реологических кривых течения, а также реологических уравнений позволит более полно понимать суть процессов, происходящих в почве при воздействии на нее внешних воздействий, что в значительной степени полезно как в исследовательских целях, так и при проектировании нового оборудования для обработки почвы и усовершенствования уже имеющегося.

Список источников

1. Хохлов А.В., Гулин В.В. Кривые течения и деформирования нелинейной модели сдвигового течения тиксотропных вязкоупругопластичных сред, учитывающей эволюцию структуры // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2024. № 1. С. 112–143. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2024.1.10>
2. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020;103:108-148. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148>
3. Доня Д.В., Леонов А.А. *Инженерная реология: Учебно-методическое пособие*. Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2009. 124 с.
4. Чудецкий А.И., Заушинцева А.В., Родин С.А. и др. Использование современных ростостимулирующих экопрепаратов при микроклональном размножении брусники обыкновенной (*Vaccinium vitis-idaea* L.) // *Лесохозяйственная информация*. 2022. № 2. С. 56–66. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.05>
5. Литвинова И.А. *Компьютерные технологии в реологических исследованиях молочных продуктов*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 18 с. EDN: QHZQEB
6. Ключева В.В. Цифровая реометрия в современных почвенных исследованиях (обзор) // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2024. Вып. 121. С. 281–321. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-121-281-321>
7. Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // *Почвоведение*. 2016. № 8. С. 955–963. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>
8. Дьяков В.П. О природе сопротивления почвы механической нагрузке // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 8. С. 184–189. EDN: VQHNXD
9. Zhu G., Zhu L., Yu C. Rheological properties of soil: a review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2017;64:012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>
10. Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. *Scientia Agrícola*. 2018;75(2):154-162. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267>
11. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A. et al. Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil Tillage Research*. 2019;195:104388. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388>
12. Zhou L., Hu F., Xu C. Study of the rheological behavior of pisha sandstone slurry based on dynamic oscillatory shear. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2024;38:45-53. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.007>
13. Mezger T.G. *The Rheology Handbook*. 3rd ed. Hanover, Germany: Vincentz Network, 2011:28.

References

1. Khokhlov A.V., Gulín V.V. Flow curves and stress-strain curves generated by a nonlinear model for shear flow of thixotropic viscoelastic media accounting for structure evolution. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2024;(1):112-143. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2024.1.10>

2. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020;103:108-148. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148>
3. Donya D.V., Leonov A.A. *Engineering rheology: guidelines*. Kemerovo, Russia: Kemerovo Technological Institute of Food Industry, 2009:124. (In Russ.)
4. Chudetsky A.I., Zaushintsena A.V., Rodin S.A. et al. The use of modern growth-promoting eco-preparations for microclonal propagation of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.). *Forestry Information*. 2022;(2):56-66. (In Russ.) <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.05>
5. Litvinova I.A. *Computer technologies in rheological research of dairy products*: CSc (Eng) thesis. Kemerovo, Russia, 2012:18. (In Russ.)
6. Klyueva V.V. The rheometry approach in modern soil studies: a review. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2024;(121):281-321. (In Russ.) <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-121-281-321>
7. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovski E.Yu. Rheological properties of typical chernozems (Kursk Oblast) under different land uses. *Pochvovedenie*. 2016;(8):955-963. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>
8. Dyakov V.P. On the nature of soil resistance to mechanical stress. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2018;(8):184-189. (In Russ.)
9. Zhu G., Zhu L., Yu C. Rheological properties of soil: a review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2017;64:012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>
10. Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. *Scientia Agricola*. 2018;75(2):154-162. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267>
11. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A. et al. Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil Tillage Research*. 2019;195:104388. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388>
12. Zhou L., Hu F., Xu C. Study of the rheological behavior of pisha sandstone slurry based on dynamic oscillatory shear. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2024;38:45-53. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.007>
13. Mezger T.G. *The Rheology Handbook*. 3rd ed. Hanover, Germany: Vincentz Network, 2011:28.

Сведения об авторах

Денис Викторович Доня, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: priap@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Юлия Владиславовна Устинова, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии хранения и переработки продуктов животноводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: tppj@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1649-889X>

Максим Валерьевич Просин, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»;

127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: prosinmv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4615-5628>

Ренат Салимович Хамитов, д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры и землеустройства и лесоводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: r.khamitov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1490-3553>

Светлана Михайловна Хамитова, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры ландшафтной архитектуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: xamitowa.sveta@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3432-3804>

Юлия Александровна Мырксина, канд. экон. наук, доцент кафедры бухгалтерского учета, финансов и налогообложения, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: myrksina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8023-3183>

Information about the authors

Denis V. Donya, CSc (Eng), Associate Professor at the Department of Processes and Equipment of Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: priap@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Yulia V. Ustinova, CSc (Eng), Associate Professor at the Department of Technology of Storage and Processing of livestock Products, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: tpj@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1649-889X>

Maksim V. Prosin, CSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Processes and Equipment of Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: prosinmv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4615-5628>

Renat S. Khamitov, DSc (Ag), Associate Professor, Professor at the Department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: r.khamitov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1490-3553>

Svetlana M. Khamitova, CSc (Ag), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Landscape Architecture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: xamitowa.sveta@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3432-3804>

Yulia A. Myrksina, CSc (Econ), Associate Professor at the Department of Accounting, Finance and Taxation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: myrksina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8023-3183>

АГРОХИМИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ

**Экономическое и климатическое обоснование
приема биоактивации почвы для развития органического земледелия
в Кабардино-Балкарской Республике**

**Амиран Хабидович Занилов^{1,2✉}, Аслан Мухамедович Лешкенов²,
Сарина Руслановна Конова²**

¹Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова,
Нальчик, Россия

²Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Нальчик, Россия

✉ Автор, ответственный за переписку: amiran78@inbox.ru

Аннотация

С целью определения возможности повышения эффективности систем удобрения в органическом земледелии и сопоставления с традиционной системой в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики была выполнена комплексная оценка эффективности приема биологической активации почвы. В качестве средств биоактивации использовались агрономически ценные микроорганизмы, входящие в состав коммерческих биопрепаратов Ризоплан, Азолен, Ультрекс, Микотоп. Опыт заложен на участке многолетних наблюдений, входящем в Геосеть под № 082. Сравнительная оценка традиционной системы удобрения ($N_{63}P_{42}K_{32}$) и органической системы без внесения минеральных удобрений выполнялась по экономическому показателю и углеродному балансу как показателю климатического благополучия. В качестве органических удобрений использовались навоз, сидераты (озимый рапс), солома озимой пшеницы и их сочетание. Варианты с биоактивацией почвы обозначались литером «а». В результате обработки данных было установлено, что отказ от использования минеральных удобрений без внесения органических удобрений (контроль) не отвечает критериям эффективного земледелия. По отношению к варианту с традиционной системой питания отмечается снижение урожайности на 0,95 т/га, экономической эффективности (–3015 руб/га) и доли CO_2 -экв в агроэкосистеме на 0,42 т/га. Использование моноорганических удобрений сопровождается ростом урожайности озимой пшеницы и сопоставимыми экономическими показателями. Максимальная эффективность формируется при сочетании всех исследуемых органических удобрений и приема биоактивации почвы. Данный вариант по отношению к варианту с внесением минеральных удобрений способствует повышению урожая на 0,24 т/га, возрастанию экономического и климатического эффекта на 6945 руб/га и 23,5 т CO_2 -экв соответственно.

Ключевые слова

Органическое земледелие, система удобрения, озимая пшеница, парниковые газы, углеродный баланс

Благодарности

Исследования проведены за счет гранта Российского научного фонда № 25–16–00243 и Государственного задания Минобрнауки ИСХ КБНЦ РАН (FMEW-2025–0017).

Для цитирования

Занилов А.Х., Лешкенов А.М., Конова С.Р. Экономическое и климатическое обоснование приема биоактивации почвы для развития органического земледелия в Кабардино-Балкарской Республике // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 25–38.

AGROCHEMISTRY, SOIL SCIENCE, ECOLOGY

Economic and climatic justification for soil bioactivation practices to develop organic farming in the Kabardino-Balkarian Republic

Amiran Kh. Zanirov^{1,2✉}, Aslan M. Leshkenov², Sarina R. Konova²

¹Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

²Institute of Agriculture – Branch of the Kabardin-Balkar Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia

✉Corresponding author: amiran78@inbox.ru

Abstract

A comprehensive evaluation of the effectiveness of soil bioactivation was conducted in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic to determine the potential for enhancing the efficiency of fertilizer systems in organic farming and compare them with conventional systems. Agronomically valuable microorganisms, incorporated into commercial biopreparations such as Rhizoplan, Azolen, Ultrex, and Mycotop, were used as bioactivation agents. The experiment was established on a long-term observation plot, part of the Geoset No. 082. A comparative assessment of the conventional fertilizer system ($N_{63}P_{42}K_{32}$) and the organic system without mineral fertilizer application was performed based on economic indicators and carbon balance, the latter serving as a measure of climatic well-being. Organic fertilizers utilized included manure, green manures (winter rapeseed), winter wheat straw, and their combinations. Treatments involving soil bioactivation were designated by the letter “a”. Data analysis revealed that the complete abandonment of mineral fertilizers without any organic fertilizers (control treatment) does not meet the criteria for effective farming. Compared to the conventional fertilizer system, this control treatment showed a yield reduction of 0.95 t/ha, a negative economic efficiency (–3015 RUB/ha), and a decrease in the CO₂-eq footprint within the agroecosystem by 0.42 t/ha. The use of single organic fertilizers resulted in increased winter wheat yields and comparable economic indicators. Maximum efficiency was achieved when combining all investigated organic fertilizers with soil bioactivation. This particular treatment, compared to the mineral fertilization option, led to a yield increase of 0.24 t/ha, and an enhancement in economic and climatic effects by 6945 RUB/ha and 23.5 t CO₂-eq, respectively.

Keywords

Organic farming, fertilizer system, winter wheat, greenhouse gases, carbon balance

Acknowledgements

The research was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 25–16–00243, and by the Ministry of Education and Science of the KBSU as a part of the state assignment (FMEW-2025–0017).

For citation

Zanirov A.Kh., Leshkenov A.M., Konova S.R. Economic and climatic justification for soil bioactivation practices to develop organic farming in the Kabardino-Balkarian Republic. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 25–38.

Введение Introduction

С учетом того, что вклад мирового сельского хозяйства в объем антропогенно образованных газов достигает 25% [1], использование технологических и рыночных возможностей по ограничению их поступления в атмосферу отвечает целям достижения устойчивости агропромышленного комплекса Российской Федерации.

Прямые выбросы парниковых газов в отрасли земледелия и растениеводства происходят в основном за счет преобразования азотных соединений минеральных и органических удобрений, а также азота, выделенного в процессе распада органического вещества почвы в закись азота (N_2O) – парниковый газ с высоким потенциалом глобального потепления (298) [2]. Значительную роль в тепловом загрязнении атмосферы играет парниковый газ – CO_2 , потенциал глобального потепления которого принят за единицу, но по концентрации содержания в атмосфере занимает лидирующее место.

Рыночные возможности органического сегмента АПК связаны с повышением интереса к органическим продуктам питания. Площади органических земель только в России за период 2016–2024 гг. увеличились более чем в 3 раза, а количество предприятий, производящих продукцию по зарубежным органическим стандартам (до вступления в действие Федерального закона № 280-ФЗ «Об органической продукции и о внесении в отдельные законодательные акты Российской Федерации от 1 января 2020 г.), с 2016 г. возросло с 84 [3] до 240 в 2024 г. [4].

Рынок органических продуктов к 2024 г. демонстрировал продолжение роста и по прогнозам к 2030 г. может достичь 230 млрд долл. США [5], что обеспечивает увеличение площадей, обрабатываемых по регенеративным технологиям. Особенностью данной системы земледелия является отказ от синтетических удобрений и средств защиты растений, что ограничивает прямые выбросы парниковых газов [6].

Климатическая составляющая органического земледелия позволяет рассчитывать на повышение конкурентоспособности российской сельскохозяйственной продукции на международном рынке продовольствия, а механизмами достижения данной цели могут быть не только прямое сокращение выбросов [7], но и использование компонентов агроэкосистем для секвестрации углерода [8].

В текущих условиях на международном уровне остро встает вопрос о сохранении баланса между целью сокращения выбросов парниковых газов, декларируемой Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (UNEP), и целью ликвидации голода и нищеты, декларируемой Всемирной продовольственной программой ООН (WFP). Достижению консенсуса в дискуссионных вопросах должны способствовать научное обоснование и комплексная оценка целесообразности выбранных решений. В связи с этим целью исследований являлась экономическая и климатическая оценка эффективности приема биологической активации почвы как элемента органической системы земледелия в сравнении с интенсивной формой земледелия среднего уровня (1/2 расчетной дозы минеральных удобрений).

Цель исследований: комплексная оценка эффективности приема биологической активации почвы для определения возможности повышения эффективности систем удобрения в органическом земледелии и сопоставления с традиционной системой в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики.

Методика исследований Objects and methods of research

Исследования проводились на участке долгосрочных исследований действия различных видов органических удобрений и дифференцированных доз минеральных

удобрений. Участок входит во Всероссийскую географическую сеть многолетних опытов (Терский район, Кабардино-Балкарская Республика) под номером 082 и заложен в 1979 г. в соответствии с методическими указаниями [9]. 9-польный севооборот представлен четырьмя культурами: кукуруза, озимая пшеница, подсолнечник, горох.

С 2018 г. для исследования влияния фактора биологической активности почвы на эффективность систем удобрения было проведено расщепление опытных делянок. Существующая при этом схема удобрения в севообороте не претерпела изменений. Повторность опыта – 4-кратная. Почва участка представлена черноземом обыкновенным мицеллярно-карбонатным со средним показателем содержания гумуса в пределах 3,23...3,32% и слабощелочной реакцией $pH_{KCl} = 7,6$. Агрофизические свойства удовлетворительные, почва тяжелосуглинистая с общей пористостью более 50%. Наименьшая влагоемкость составляет 24,5–25,4%.

Базовая схема опыта представлена четырьмя уровнями обеспеченности минеральными удобрениями (0NPK, 1/3NPK, 1/2NPK и полная расчетная доза 1NPK). В связи с установленной ранее максимальной экономической эффективностью производства озимой пшеницы в варианте с использованием 1/2 расчетной дозы минеральных удобрений [10] схема опыта предусматривает сопоставление эффективности на двух уровнях обеспеченности минеральными удобрениями – 0NPK и 1/2NPK на фоне четырех схем органических удобрений: навоза, сидератов, соломы и сочетания всех видов органических удобрений (табл. 1).

Таблица 1

Схема опыта

Table 1

Experimental design

Варианты опыта	Фон минеральных удобрений	Фон органических удобрений	Биоактивация почвы
Контроль	$N_0P_0K_0$	Без ОУ	–
Эталон	$N_{63}P_{42}K_{32}$	Без ОУ	–
1	$N_0P_0K_0$	Контроль + Био	+
1а	$N_{63}P_{42}K_{32}$	Эталон + Био	+
2	$N_0P_0K_0$	Навоз	–
2а		Навоз + Био	+
3	$N_0P_0K_0$	Сидераты	–
3а		Сидераты + Био	+
4	$N_0P_0K_0$	Солома	–
4а		Солома + Био	+
5	$N_0P_0K_0$	Навоз + Сидераты + Солома (Н+С+С)	–
5а		Навоз + Сидераты + Солома + Био (Н+С+С+Био)	+

Внесение навоза проводится 2 раза за ротацию севооборота после кукурузы из расчета по 50 т/га. Сидераты в виде озимого рапса высеваются 4 года за ротацию после озимой пшеницы. Солома в соответствующем варианте измельчается и запахи-вается после уборки урожая озимой пшеницы 4 года за ротацию.

Биологическая активация почвы произведена совместным внесением микроорганизмов, входящих в состав коммерческих биопрепаратов Ризоплан (*Pseudomonas fluorescense*, штамм AP-33), Азолен Ж (*Azotobacter vinelandii* ИБ-4) по 2 л/га каждого и Ультрекс (*Trichoderma harzianum*) и Микотоп (*Trichoderma viride*) по 1 л/га соответственно. Внесение средств биоактивации проводилось перед высевом семян навесным опрыскивателем (ОН-300).

В качестве перспективной системы удобрения для органического земледелия рассматривались варианты 1, 2а, 3а, 4а, 5а, сочетающие органические удобрения с приемом биологической активации почвы без минеральных удобрений. Сравнение проводилось по отношению к эталонному варианту с минеральными удобрениями, отражающими систему питания растений в традиционном земледелии. Контрольный вариант, используемый в качестве абсолютного контроля, позволяет определить влияние минеральных удобрений на урожайность озимой пшеницы.

Для анализа использовались данные мониторинга урожайности озимой пшеницы за 6 лет (с 2019 по 2024 гг.).

Для экономической оценки органических систем удобрения и сопоставления с системами удобрения традиционного земледелия использовалась средняя стоимость затрат на каждую из них в 2019–2024 гг. (табл. 2).

Таблица 2

Стоимость систем удобрения, руб/га

Table 2

Cost of fertilizer systems, RUB/ha

Варианты опыта	Фон органических удобрений	Затраты, руб/га
Контроль	Без органических удобрений + 0NPK	–
Эталон	$N_{63}P_{42}K_{32}$	7815
1	Контроль + Био	1400
1а	$N_{63}P_{42}K_{32}$ +Био	9215
2	Навоз	1170
2а	Навоз + Био	2570
3	Сидераты	811
3а	Сидераты + Био	2211
4	Солома	225
4а	Солома + Био	1625
5	Н+С+С	2206
5а	Н+С+С + Био	3606

Климатическое обоснование систем удобрения проводилось по потоку закиси азота (N_2O), выделяемого азотсодержащими органическими и минеральными удобрениями [11], а также в результате распада органического вещества почвы, пожнивных и корневых остатков. Расчеты выбросов закиси азота производились в соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) с использованием усредненных значений коэффициента эмиссионного фактора ($ЭФ_{N_2O}$), равного 0,0126.

Формула расчета годовых прямых выбросов:

$$N_2O-N_{\text{поступл.}} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_1, \quad (1)$$

где F_{SN} – годовое количество азота минеральных удобрений, внесенных в почвы, кг N/год; F_{ON} – годовое количество азота навоза, внесенного в почвы, кг N/год; F_{CR} – годовое количество азота в растительных остатках (надземных и подземных) культурных растений, в том числе от азотфиксирующих культур, кг N/год; F_{SOM} – годовое количество азота в минеральных почвах, которое минерализуется в связи с потерей углерода из почвенного органического вещества в обрабатываемых почвах, кг N/год (по умолчанию используется коэффициент для всех полей, равный 30 кг N/га); EF_1 – коэффициент выбросов N_2O от антропогенного внесения азота в почву, кг N_2O -N/кг поступавшего N (0,0126).

Расчет производился с использованием формул, приведенных в таблице 3.

Таблица 3

Расчет массы с растительных остатков, т/га

Table 3

Calculated mass of plant residues, t/ha

Урожайность, ц/га	Пожнивные остатки	Корневые остатки
10–25	= (0,4 x Y + 2,6)	= (0,9 x Y + 5,8)
26–40	= (0,1 x Y + 8,9)	= (0,7 x Y + 10)

Примечание. Значение доли азота в растительных остатках принято за 0,45%.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Для оценки экономической эффективности систем удобрения ключевое значение имеет как урожайность (табл. 4), так и стоимость зерна озимой пшеницы.

Из данных таблицы следует, что внесение минеральных удобрений, соответствующих 1/2 расчетной дозы, обеспечивает прибавку урожая по отношению к контрольному варианту на 35,2% (0,95 т/га). По отношению к контрольному варианту эффективность проявляют и органические удобрения, уровень которой возрастает в сочетании с приемом предпосевной биоактивации почвы.

Логичным является то, что установление влияния органических и микробиологических удобрений проводится по отношению к эталонному варианту, отражающему систему питания озимой пшеницы в традиционном земледелии. Варианты 2–5 и 2а–5а в свою очередь отражают органическую систему питания, в которой не допускается применение минеральных удобрений.

Таблица 4

Средняя урожайность озимой пшеницы, т/га

Table 4

Average winter wheat yield, t/ha

Варианты опыта	Годы						Среднее
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Контроль	1,76±0,05	2,38±0,07	1,9±0,11	3,77±0,18	3,72±0,21	2,69±0,16	2,70
Эталон	2,30±0,10	3,39±0,09	2,44±0,07	5,86±0,26	4,55±0,25	3,38±0,13	3,65
1	1,95±0,07	2,84±0,10	2,27±0,09	4,53±0,27	4,15±0,25	3,22±0,12	3,16
1a	2,78±0,07	5,13±0,14	2,96±0,11	6,04±0,29	4,81±0,19	3,80±0,22	4,25
2	1,79±0,05	3,06±0,03	2,53±0,14	4,47±0,17	4,24±0,23	3,18±0,19	3,21
2a	2,13±0,12	3,56±0,11	2,80±0,03	5,12±0,21	4,48±0,15	3,71±0,20	3,63
3	1,82±0,04	1,65±0,04	2,23±0,13	4,63±0,09	4,01±0,19	3,12±0,16	2,91
3a	2,35±0,07	2,62±0,04	2,66±0,16	4,99±0,22	4,53±0,16	3,53±0,17	3,45
4	1,87±0,10	1,88±0,09	2,64±0,13	4,89±0,19	3,97±0,16	2,87±0,14	3,02
4a	2,23±0,13	2,45±0,12	3,08±0,10	5,09±0,22	4,31±0,14	3,39±0,11	3,43
5	2,06±0,14	2,07±0,12	2,96±0,12	5,16±0,20	4,35±0,11	3,46±0,14	3,34
5a	2,58±0,07	2,49±0,04	3,52±0,16	5,63±0,21	5,09±0,19	4,04±0,17	3,89
НСР ₀₅ по контролю	0,09	0,12	0,16	0,29	0,26	0,20	
НСР ₀₅ по Био	0,11	0,31	0,19	0,34	0,30	0,24	

Из данных таблицы 4 следует, что используемые органические удобрения, несмотря на повышение урожайности по отношению к контролю на 18,9% (вариант 2), на 7,8% (вариант 3), на 11,9% (вариант 4) и на 23,7% (вариант 5), уступали действию минеральных удобрений в тех же вариантах на 12,1; 20,3; 17,3 и 8,5% соответственно.

Прием биоактивации почвы оказался эффективным на всех фонах органических удобрений (рис.). Так, внесение в контрольную почву консорциума микроорганизмов (вариант 1) сопровождалось повышением урожая на 0,46 т/га (17,0%). На фоне навоза (вариант 2a), сидератов (3a) и соломы (4a) прием биоактивации почвы способствовал росту урожая на 0,42 т/га (13,1%); 0,54 (18,6%); 0,41 т/га (13,6%).

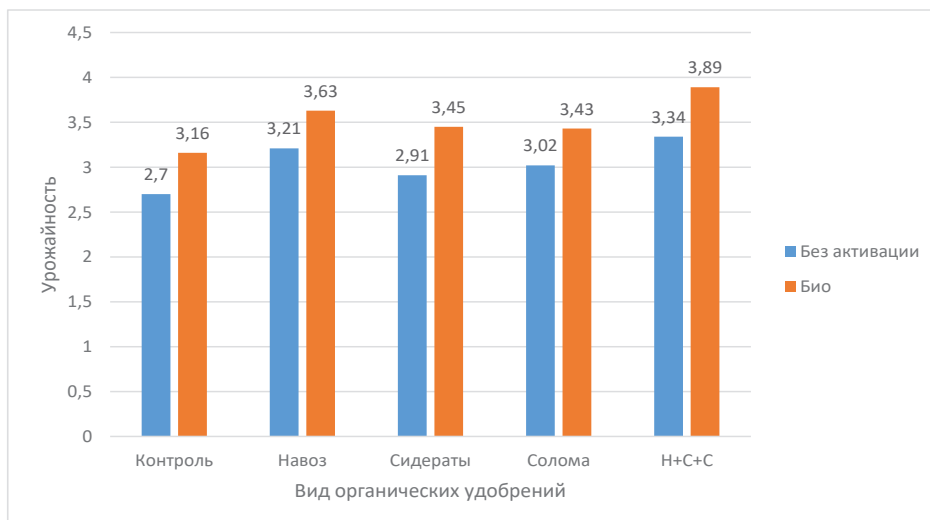


Рис. Влияние приема биоактивации почвы на эффективность органических удобрений, ц/га

Figure. Effect of soil bioactivation practice on the effectiveness of organic fertilizers, h/ha

Как следует из данных рисунка, наибольшая прибавка от использования био-препаратов отмечена на фоне сидератов (0,54 т/га), в то время как прибавка в других вариантах является относительно равной и находится в пределах 0,41–0,46 т/га. Это может быть связано с легкогидролизуемыми формами зеленых удобрений, эффективно используемыми интродуцированными в почву микроорганизмами. Максимальная абсолютная урожайность (3,89 т/га) под действием приема биоактивации почвы была установлена в варианте, сочетающем все рассматриваемые органические удобрения (5а) с прибавкой 0,55 т/га (16,5%).

Использование приема биоактивации почвы на фоне органических удобрений обеспечило урожайность озимой пшеницы, сопоставимую с урожайностью эталонного варианта. Так, на фоне навоза (вариант 2а) урожайность была равнозначной (3,63 т/га). На фоне сидератов и соломы урожайность была ниже незначительно – на 5,0 и 6,0% соответственно. В варианте с сочетанием всех органических удобрений (вариант 5а) отмечено повышение урожайности на 6,6% (0,24 т/га).

С целью демонстрации значения фактора биологической активности почвы и акцентирования универсальности его действия в таблице 4 представлен вариант, сочетающий использование минеральных удобрений с приемом предпосевной биоактивации почвы. Учитывая, что исследуемый прием предпосевной биоактивации почвы внесением микроорганизмов непосредственно в почву на текущий момент является малораспространенным, данный вариант можно рассматривать как перспективный прием, который, судя по влиянию на урожайность в будущем, может стать стандартным элементом биомодификации системы удобрения. До тех пор сравнительная оценка эффективности органических систем удобрения производится по отношению к эталонному варианту.

Изменение урожайности является одной из статей, формирующей экономическую эффективность производства. Средняя цена зерна за период 2019–2024 гг. составляла 11,4 тыс. руб/т. Второй, не менее важной статьёй экономических расчетов, является стоимость расходов на систему удобрения. Сопоставлением этих данных можно дать ответ на вопрос об экономической целесообразности перехода на органическую систему удобрения. В связи с этим проведено сопоставление стоимости урожая и стоимости систем удобрения сравниваемых вариантов (табл. 5).

Таблица 5

**Окупаемость органической и традиционной систем удобрения
озимой пшеницы**

Table 5

Payback of organic and conventional fertilizer systems for winter wheat

Варианты	Урожайность, ц/га	Стоимость зерна, руб/га	Стоимость системы удобрения, руб/га	Прибыль, руб/га	Прибыль, руб/га
Контроль	2,70	30780	–	30780	–3015
Эталон	3,65	41610	7815	33795	–
1	3,16	36024	1400	34624	829
1а	4,25	48450	9215	39235	5440
2	3,21	36594	1170	35424	1629
2а	3,63	41382	2570	38812	5017
3	2,91	33174	811	32363	–1432
3а	3,45	39330	2211	37119	3324
4	3,02	34428	225	34203	408
4а	3,43	39102	1625	37477	3682
5	3,34	38076	2206	35870	2075
5а	3,89	44346	3606	40740	6945

Из данных таблицы 5 следует, что повышение урожайности под влиянием высоких доз минеральных удобрений не способствует пропорциональному повышению экономической эффективности системы удобрения. Единственным вариантом органической системы удобрения, уступающей по экономическим показателям (–1432 руб/га), является вариант с заделкой сидератов без приема биоактивации почвы. В остальных случаях экономическая эффективность под действием органических систем удобрения находится в пределах 829–6945 руб/га.

Выше было отмечено, что сочетание минеральных удобрений с внесением в почву эффективных микроорганизмов обеспечивает максимальную урожайность (4,25 т/га), что превышает значение эталонного варианта на 16,3% (0,6 т/га). Данная система может быть условно обозначена как «биоинтенсивная», в которой проявляется синергетический механизм взаимодействия биологического и агрохимического факторов. При этом научный подход к органическому земледелию может обеспечить систему удобрения, превышающую по экономическим параметрам интенсивные (эталон) и биоинтенсивные (вариант 1а) системы удобрения. Так, сочетание заделки соломы, сидератов с навозом (вариант 5) при одновременном использовании агрономически ценных штаммов микроорганизмов (вариант 5а) способствует повышению эффективности систем удобрения на 1928 и 6945 руб/га. При этом

первоначальные инвестиции в систему удобрения – в 2,2–2,6 раз ниже, что имеет важное значения для финансовой устойчивости сельскохозяйственных предприятий.

Вопрос возможного органического бонуса на сертифицированную продукцию в работе не рассматривается осознанно несмотря на то, что стимулом для перехода предприятий на органические стандарты является именно возможность получения повышенной добавленной стоимости, которая может варьировать в пределах 15–60% в зависимости от культуры. Причина заключается в том, что возможность получения органического бонуса наступает не ранее, чем через 3 года переходного периода. До этого времени предприятие должно иметь возможность производства растениеводческой продукции с приемлемым уровнем экономической эффективности.

Климатический эффект. Климатическая сравнительная оценка систем удобрения выполнялась по их влиянию на объем выбросов закиси азота в атмосферу из различных источников (табл. 6) и формированию углеродного баланса, с учетом поступившего с органическими удобрениями и растительными остатками углерода в почву.

Таблица 6

Влияние систем удобрения на поступление в атмосферу N_2O-N , кг/га

Table 6

Effect of fertilizer systems on atmospheric N_2O-N emissions, kg/ha

Фон	Орг. удобрения, т/га/год	F_{ON}	F_{SN}	Масса остатков, т/га		F_{CR}	F_{SOM}	ΣF
				пожн.	корн.			
Контроль	–	–	–	0,56	1,40	8,83	30,00	38,8
Эталон	–	–	63	0,61	1,72	10,50	30,00	103,5
1	–	–	–	0,59	1,56	9,67	30,00	39,7
1a	–	–	63	0,64	1,93	11,56	30,00	104,6
2	11,1	49,95	–	0,59	1,57	9,74	30,00	89,7
2a	11,1	49,95	–	0,62	1,72	10,52	30,00	90,5
3	1,44	**27,36	–	0,27	1,47	7,84	30,00	65,2
3a	1,44	**27,36	–	0,60	1,66	10,15	30,00	67,5
4	*0,58	–	–	0,58	1,51	9,41	30,00	39,4
4a	*0,60	–	–	0,60	1,65	10,12	30,00	40,1
5	13,12	77,31	–	0,59	1,62	9,94	30,00	117,3
5a	13,14	77,31	–	0,62	1,81	10,92	30,00	118,2

*Рассчитываются как пожнивные остатки с привязкой к урожайности (табл. 3).

**Вклад азота с сидератами рассчитан исходя из 1,9% азота в сухом веществе крестоцветных культур [12].

Итоговый расчет углеродного баланса оценивается по разнице C–CO₂-эквивалента, содержащегося в органических удобрениях и растительных остатках и CO₂-экв. закиси азота (табл. 7).

Из данных таблицы следует, что основной вклад в формирование углеродного баланса обеспечивает углерод, поступающий с органическими удобрениями. Максимальный объем органического вещества поступает в почву в вариантах 5 и 5а, что отражает наибольшую климатическую приемлемость данной системы удобрения. Непосредственное влияние приема биоактивации почвы на поступление углерода не влияет, но опосредованно через повышение урожая и соответствующего количества пожнивных и корневых остатков ведет к формированию углеродного баланса дополнительно на 0,28 т/га.

Таблица 7

Углеродный баланс, сформированный системами удобрения, т/га

Table 7

Carbon balance generated by fertilizer systems, t/ha

Фон	Σ раст. остатков и органических удобрений, т/га	*C–CO ₂ -экв. растительных остатков и органических удобрений, т/га	ΣF, кг/га	N ₂ O-N _{поступл.} , кг/га	N–CO ₂ -экв., т/га	Баланс CO ₂ -экв., т/га
Контроль	1,96	3,48	38,8	0,49	0,15	3,33
Эталон	2,33	4,14	103,5	1,30	0,39	3,75
1	2,15	3,82	39,7	0,50	0,15	3,67
1а	2,57	4,56	104,6	1,32	0,39	4,17
2	13,21	23,45	89,7	1,13	0,34	23,11
2а	13,44	23,86	90,5	1,14	0,34	23,52
3	3,18	5,64	65,2	0,82	0,24	5,40
3а	3,64	6,46	67,5	0,85	0,25	6,21
4	2,67	4,74	39,4	0,50	0,15	4,59
4а	2,85	5,06	40,1	0,51	0,15	4,91
5	15,411	27,36	117,3	1,48	0,44	26,92
5а	15,57	27,64	118,2	1,49	0,44	27,20

*Углерод из растительных остатков и органических удобрений рассчитывается исходя из содержания 48,5% и переводится в CO₂-экв с использованием коэффициента 3,66.

Выводы

Conclusions

Дискуссионная напряженность в вопросе эффективности органической системы земледелия в общем, и соответствующей системы удобрения – в частности, сохраняется на протяжении последних двух десятилетий. Снижению напряжения способствуют

системный подход и научная аргументация принимаемых технологических решений. Так, из полученных данных можно сделать вывод о том, что органическая система удобрения озимой пшеницы, основанная только на отказе от минеральных удобрений, не отвечает интересам экономической и климатической эффективности землепользования.

Комплексный эффект в органическом земледелии можно достичь при сочетании нескольких видов органических удобрений, относительно равномерно распределенных во времени (вариант 5). Данная система в сравнении с традиционной системой удобрения (эталон) оказалась на 2,1 тыс. руб/га более экономически эффективной и способствовала секвестрации в системе «Удобрение-растение» более 23 т CO₂-экв. Исследуемый прием биоактивации почвы (вариант 5а) при равнозначном климатическом эффекте дополнительно повышал экономический показатель до 6,5 тыс. руб/га. Результаты обработки данных мониторинга подтверждают экономическую значимость применения биопрепаратов при производстве сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических зонах страны [13–15].

Список источников

1. Dyson F. Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? *Energy*. 1977;2(3):287-291. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(77\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(77)90033-0)
2. WMO Greenhouse Gas Bulletin. *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere*. 2019;15:8. <https://library.wmo.int/records/item/58687-no-15-25-november-2019>
3. Занилов А.Х., Мелентьева О.С., Накаряков А.М. *Организация органического сельскохозяйственного производства в России: Методические указания*. Москва: Росинформагротех, 2018. 124 с. EDN: NLISRM
4. Союз органического земледелия. *Количество выданных органических сертификатов по итогам 2024 года выросло почти на 50%*. URL: <https://soz.bio/kolichestvo-vydannykh-organicheskikh-se/> (дата обращения: 28.02.2025)
5. Бридская П.О., Бессонова Е.А., Жахов Н.В. Переход к зеленой экономике: анализ перспектив развития органического сельского хозяйства в России // *Мир экономики и управления*. 2023. Т. 23, № 3. С. 5–20. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2023-23-3-5-20>
6. Charles A., Rochette P., Whalen J. et al. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2017;236:88-98. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.021>
7. Mahajan D. Carbon Sequestration Potential of Urban Green Spaces (PMC Gardens) in Pune City, India. *Journal of Geography Environment and Earth Science International*. 2021;25(6):22-38. <https://doi.org/10.9734/JGEESI/2021/v25i630291>
8. Tsedeke R., Dawud S., Tafere S. Assessment of carbon stock potential of parkland agroforestry practice: the case of Minjar Shenkora; North Shewa, Ethiopia. *Environmental Systems Research*. 2021;10:2. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00211-3>
9. Минеев В.Г., Панников В.Д., Трепачев Е.П. и др. *Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями*: Методические указания. Москва: Всесоюзный НИИ удобрений и агропочвоведения имени Д.Н. Прянишникова, 1986. Ч. 1. 147 с. EDN: VMUIIP
10. Лешкенов А.М., Занилов А.Х. Влияние биоактивации почвы на эффективность минеральной и органоминеральной систем удобрения и продуктивность озимой пшеницы // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2021. № 2 (100). С. 39–49. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-2-100-39-49>
11. Farag A., Manal M., Mona M. et al. Carbon footprint for wheat and corn under Egyptian conditions. *Journal on Food, Agriculture and Society*. 2018;6(2):41-54. <https://doi.org/10.17170/kobra-2018122070>

12. Пискунова Х.А., Федорова А.В., Ершова Т.С. Поступление в почву элементов минерального питания с сидеральными культурами // *Владимирский земледелец*. 2012. № 2. С. 15–16. EDN: PAYAAZ
13. Накаряков А.М., Завалин А.А. Влияние биопрепаратов и удобрений на урожайность озимой пшеницы на светло-серой почве // *Плодородие*. 2021. № 4 (121). С. 26–30. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.08>
14. Засорина Э.В., Комарицкая Е.И., Машошин А.В. Эффективность применения препаратов органического земледелия в картофелеводстве // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 1. С. 49–55. EDN: FGPFSL
15. Мазалов В.И., Кузнецов М.Н., Жук Г.П. Использование агробiotехнологических приемов в органическом земледелии Орловской области // *Зернобобовые и крупяные культуры*. № 3 (51). 2024. С. 106–113. <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2024-3-106-113>

References

1. Dyson F. Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? *Energy*. 1977;2(3):287-291. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(77\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(77)90033-0)
2. WMO Greenhouse Gas Bulletin. *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere*. 2019;15:8. <https://library.wmo.int/records/item/58687-no-15-25-november-2019>
3. Zanirov A.Kh., Melentyeva O.S., Nakariakov A.M. *Organization of organic agricultural production in Russia: methodological guidelines*. Moscow, Russia: Rosinformagrotech, 2018:124. (In Russ.)
4. Union of Organic Farming. *The number of organic certificates issued by the end of 2024 increased by almost 50%*. (In Russ.) URL: <https://soz.bio/kolichestvo-vydannykh-organicheskikh-se/> (accessed: February 28, 2025).
5. Bridskaya P.O., Bessonova E.A., Zhakhov N.V. Transition to a green economy: an analysis of the prospects for the development of organic agriculture in Russia. *World of Economics and Management*. 2023;23(3):5-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2023-23-3-5-20>
6. Charles A., Rochette P., Whalen J. et al. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2017;236:88-98. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.021>
7. Mahajan D. Carbon Sequestration Potential of Urban Green Spaces (PMC Gardens) in Pune City, India. *Journal of Geography Environment and Earth Science International*. 2021;25(6):22-38. <https://doi.org/10.9734/JGEESI/2021/v25i630291>
8. Tsedeke R., Dawud S., Tafere S. Assessment of carbon stock potential of parkland agroforestry practice: the case of Minjar Shenkora; North Shewa, Ethiopia. *Environmental Systems Research*. 2021;10:2. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00211-3>
9. Mineev V.G., Pannikov V.D., Trepachev E.P. et al. *Guidelines for conducting research in long-term experiments with fertilizers: guidelines*. Moscow, USSR: All-Union Research Institute of Fertilizers and Agro-Soil Science named after D.N. Pryanishnikov, 1986:147. (In Russ.)
10. Leshkenov A.M., Zanirov A.K. The effect of soil bioactivation on the efficiency of mineral and organo-mineral fertilizer systems and the productivity of winter wheat. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021;(2(100)):39-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-2-100-39-49>
11. Farag A., Manal M., Mona M. et al. Carbon footprint for wheat and corn under Egyptian conditions. *Journal on Food, Agriculture and Society*. 2018;6(2):41-54. <https://doi.org/10.17170/kobra-2018122070>

12. Piskunova H.A., Fedorova A.V., Ershova T.S. Input of mineral nutrients into the soil with green manure crops. *Vladimirskiy zemledelets*. 2012;(2):15-16. (In Russ.)
13. Nakariakov A.M., Zavalin A.A. Influence of biorperarates and fertilizers on the yield and quality of winter wheat grain on light gray forest soil. *Plodorodie*. 2021;(4(121)):26-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.08>
14. Zasorina E.V., Komarnitskaya E.I., Mashoshin A.V. The effectiveness of the use of organic farming preparations in potato growing. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2022;(1):49-55. (In Russ.)
15. Mazalov V.I., Kuznetsov M.N., Zhuk G.P. The use of agrobiotechnological techniques in organic farming in the Orel Region. *Legumes and Groat Crops*. 2024;(3(51)):106-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2024-3-106-113>

Информация об авторах

Амиран Хабилович Занилов, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии и почвенных исследований, Институт сельского хозяйства – филиал Федерального научного центра «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; старший научный сотрудник Центра декарбонизации АПК и региональной экономики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова»; 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; e-mail: amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

Аслан Мухамедович Лешкенов, научный сотрудник, заведующий лабораторией агрохимии и почвенных исследований, Институт сельского хозяйства – филиал Федерального научного центра «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; 360004, г. Нальчик, ул. Кирова, 224; e-mail: aslan.leshkenov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>

Сарина Руслановна Конова, младший научный сотрудник лаборатории агрохимии и почвенных исследований, Институт сельского хозяйства – филиал Федерального научного центра «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; 360004, г. Нальчик, ул. Кирова, 224; e-mail: agrohimlabkbniish@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4426-2048>

Information about the authors

Amiran Kh. Zanilov, CSc (Ag), Senior Research Associate at the Laboratory of Agrochemistry and Soil Research, Institute of Agriculture – Branch of the Kabardin-Balkar Scientific Center of Russian Academy of Sciences; Senior Research Associate at the Center for Decarbonization of Agriculture and Regional Economics, Kabardino-Balkarian State University; 173 Chernyshevskogo St., Nalchik, 360004, Russian Federation; e-mail: amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

Aslan M. Leshkenov, Research Associate, Head of the Laboratory of Agrochemistry and Soil Research, Institute of Agriculture – Branch of the Kabardin-Balkar Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 224 Kirova St., Nalchik, 360004 Russian Federation; e-mail: aslan.leshkenov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>

Sarina R. Konova, Junior Research Associate at the Laboratory of Agrochemistry and Soil Research, Institute of Agriculture – Branch of the Kabardin-Balkar Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 224 Kirova St., Nalchik, 360004 Russian Federation; e-mail: agrohimlabkbniish@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4426-2048>

БОТАНИКА, ПЛОДОВОДСТВО

Влияние препарата Изабион на компоненты продуктивности растений малины ремонтантного типа плодоношения

**Людмила Викторовна Григорьева¹, Татьяна Александровна Кузнецова^{1✉},
Александр Валерьевич Зубков²**

¹Мичуринский государственный аграрный университет,
Мичуринск, Тамбовская обл., Россия

²Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

✉ **Автор, ответственный за переписку:** tatyana.anilova@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время наблюдается повышенный спрос на внесезонную ягодную продукцию малины. В связи с этим цель данной работы заключалась в изучении влияния биопрепарата Изабион на особенности роста и продуктивность насаждений малины красной ремонтантного типа плодоношения в условиях Центрально-Черноземного региона. В исследованиях приведены результаты трехлетних наблюдений по изучению действия биостимулятора роста растений Изабион на увеличение продуктивности интродуцированных сортов малины ремонтантного типа плодоношения Полька, Поляна, Шугана, Утренняя роса; в качестве контроля служил отечественный сорт Жар-Птица. Проведение трехкратных листовых подкормок препаратом Изабион (8 мл/л) способствовало активации вегетативного роста и продуктивности опытных растений, что, вероятно, связано с усилением метаболических процессов. За время наблюдений в вариантах опыта высота побегов изучаемых сортов увеличилась в среднем на 10–15%, количество латералов на побегах – на 1,9–3,1 шт., масса ягод – на 14,5–19,2%, урожайность насаждений малины – на 15–20% по сравнению с контролем. Наиболее крупноплодными сортами были Шугана и Утренняя роса с массой ягоды 6,3 и 5,6 г соответственно. Мелкоплодный сорт Поляна показал высокую отзывчивость на обработку препаратом – повышение средней массы ягод на 19,2%. Исследования выявили, что включение в технологический регламент возделывания малины ремонтантной некорневых подкормок физиологически активным препаратом (Изабион), содержащим комплекс аминокислот и пептидов, дает увеличение урожаев малины ремонтантной в среднем по сортам на 15–20%. Наибольший урожай отмечен у сортов Полька (24,4 т/га) и Шугана (33,7 т/га).

Ключевые слова

Малина, ремонтантные сорта, стимулятор роста, некорневые обработки, компоненты продуктивности, масса плода, урожайность

Для цитирования

Григорьева Л.В., Кузнецова Т.А., Зубков А.В. Влияние препарата Изабион на компоненты продуктивности растений малины ремонтантного типа плодоношения // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 39–51.

Effect of Isabion on productivity components of remontant raspberries

Lyudmila V. Grigorieva¹, Tatyana A. Kuznetsova^{1✉}, Aleksandr V. Zubkov²

¹Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Tambov Region, Russia

²Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉Corresponding author: tatyana.anilova@yandex.ru

Abstract

Currently, there is a heightened demand for off-season raspberry fruit. Consequently, the aim of this work was to investigate the effect of the biostimulant Isabion on the growth characteristics and productivity of red raspberry plants of the remontant type of fruiting under the conditions of the Central Black Earth Region. This study presents the results of three-year observations on the effect of the plant growth biostimulant Isabion on increasing the productivity of introduced cultivars of remontant raspberries Polka, Polyana, Shugana, Utrennyaya Rosa, with the domestic cultivar Zhar-Ptitsa serving as the control. Three foliar applications of Isabion (8 ml/l) promoted the activation of vegetative growth and productivity in the experimental plants, which is likely associated with enhanced metabolic processes. During the observation period, in the experimental treatments, the shoot height of the studied cultivars increased by an average of 10–15%, the number of laterals per shoot by 1.9–3.1, berry weight by 14.5–19.2%, and raspberry plantation yield by 15–20% compared to the control. The largest-fruited cultivars were Shugana and Utrennyaya Rosa, with berry weights of 6.3 g and 5.6 g, respectively. The small-fruited cultivar Polyana exhibited high responsiveness to the treatment, showing an increase in average berry weight by 19.2%. The research demonstrated that the inclusion of foliar feeding with a physiologically active preparation (Isabion), containing a complex of amino acids and peptides, into the technological cultivation protocol for remontant raspberries resulted in an average yield increase of 15–20% across cultivars. The highest yields were recorded for cultivars Polka (24.4 t/ha) and Shugana (33.7 t/ha).

Keywords

Raspberry, remontant varieties, growth stimulator, foliar treatments, productivity components, fruit weight, yield

For citation

Grigorieva L.V., Kuznetsova T.A., Zubkov A.V. Effect of Isabion on productivity components of remontant raspberries. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 39–51.

Введение

Introduction

Современное промышленное плодоводство средней полосы России не отличается большим разнообразием породного состава насаждений. Интенсификация производства плодовых и ягодных культур получила наибольшее развитие, что позволило существенно повысить качество получаемой продукции [1]. Основная площадь садов занята яблоней (более 85%), другие плодовые породы и ягодные культуры представлены крайне ограниченно. Однако в последние годы положение начало меняться: активно развиваются технологии редких культур (например, голубика), совершенствуется сортовой состав более традиционных для нашей страны культур (например,

малины) [2]. Если к концу 2010 г. отмечалось резкое сокращение общей площади плодовых насаждений, снижение их урожайности, а производство плодов и ягод на душу населения в нашей стране не превышало 15–20 кг [3], то политика импортозамещения дала ускорение развитию сельского хозяйства в нашей стране, стал активно нарастать экспорт товаров. Отрасль садоводства уступает в темпах развития другим отраслям сельского хозяйства, так как среди других отраслей она является самой материалоемкой, энерго- и наукоемкой. Анализируя современное состояние садоводства, ученые ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ» (2022) отмечают, что на внутреннем рынке до настоящего времени наблюдается отсутствие положительной динамики и тенденций роста. Это рассматривается авторами как «возможная угроза дальнейшего развития отечественного садоводства, что обуславливает целесообразность расширения рыночного потенциала за счет экспорта» [4].

По оценке «Интерагро», по итогам 2022 г. потребление фруктов и ягод на душу населения снизилось на 5% и составило 60 кг/чел. в год при медицинской обоснованной норме потребления не менее 100 кг [5].

В условиях средней полосы России одним из надежных и эффективных источников увеличения потребления витаминной продукции являются ягодные культуры, возделывание которых имеет существенные преимущества по сравнению с рядом древесных плодовых пород. Ягодные культуры отличаются быстрым вступлением в плодоношение, ранним сроком созревания плодов, высокими и регулярными урожаями, надежной адаптацией к условиям выращивания, легкостью вегетативного размножения и технологичностью возделывания [6–23].

Большое значение для получения высоких стабильных урожаев малины имеет сочетание высокого адаптивного потенциала используемых сортов с применением агротехнических приемов, обеспечивающих в конкретных почвенно-климатических условиях максимальную эффективность производства высококачественных товарных ягод. Все более возрастающие требования к стандартам качества и уровню продуктивности этой ценной культуры обуславливают необходимость дальнейшего совершенствования технологий возделывания. Использование малины в промышленном масштабе как наиболее скороплодной, продуктивной и востребованной во многом позволит решить проблему увеличения потребления ягодной продукции населением. Урожайность малины при оптимальных условиях возделывания может достигать более 13–20 т/га [24].

В современном сельском хозяйстве на различных культурах все большее применение находят физиологически активные вещества – такие, как аминокислоты, пептиды, регуляторы роста растений. Кроме регуляции ростовой активности, данные препараты повышают устойчивость растений к стрессам, химическому прессингу пестицидов, усиливают естественный иммунитет возделываемых культур [25, 26].

Есть данные о положительном влиянии биологически активных препаратов на улучшение водного режима растений, повышение их устойчивости к низким температурам. При этом они являются экологически безопасными и не оказывают серьезного негативного влияния на окружающую среду.

Одним из таких препаратов является Изабион (производитель – Syngenta AG, Швейцария) – препарат комплексного действия: биологическое удобрение, биостимулятор роста растений, обладающий самой высокой концентрацией и богатым набором аминокислот и пептидов, которые являются основным действующим веществом (концентрация – 62,5%). Препарат безопасен для окружающей среды, человека и животных. Плоды можно употреблять в пищу сразу после обработки. Вещества, содержащиеся в препарате Изабион, легко и быстро проникают в клетку и метаболизируются в растительных тканях, являясь при этом компонентами для построения

белков – ферментов, активаторами транспорта веществ по растению. Препарат способствует проникновению системных фунгицидов и инсектицидов внутрь растения, усиливая их действие. В рекомендациях производителя препарата есть сведения о том, что Изабион стимулирует образование цветочных и вегетативных почек, повышает качество продукции [27].

Особым технологическим преимуществом малины являются ее биологические особенности – наличие сортов с ремонтантным типом плодоношения. Их возделывание может удовлетворить повышенный спрос на внесезонную продукцию, потому что такие сорта способны давать урожай в течение достаточно продолжительного периода после окончания плодоношения традиционных сортов в открытом грунте. Есть сведения о том, что малина ремонтантная меньше повреждается вредителями и болезнями по сравнению с традиционной культурой. При использовании ростостимулирующих препаратов это поможет снизить химическую нагрузку и позволит получить безопасную продукцию [28–31]. В связи с этим актуальным является изучение возможности применения биологически активных веществ на плодоносящих плантациях малины ремонтантной.

Цель исследований: изучить влияние биопрепарата Изабион на особенности роста и продуктивность насаждений малины ремонтантного типа плодоношения в условиях Центрально-Черноземного региона.

Методика исследований

Research method

Исследования проводили на промышленной плантации малины (*Rubus idaeus* L.) в ООО «Снежеток» (Первомайский район Тамбовской области). Насаждения были заложены весной 2016 г. по схеме посадки $3,0 \times 0,5$ м. На участке установлена шпалера, междурядья содержались под черным паром, применялись капельный полив и полный комплекс уходных работ. Почвы участка – выщелоченный чернозем.

Объектом исследований служили ремонтантные сорта малины зарубежной и отечественной селекции: Полька, Поляна, Шугана, Утренняя роса, Жар-птица.

Варианты опыта:

1. Контроль (вода).
2. Трехкратная обработка препаратом Изабион (8 мл/л): первая – в период распускания почек; вторая – начало цветения; третья – завязывание ягод.

Обработку растений проводили водным раствором препарата до полного смачивания в полевых условиях с помощью ранцевого опрыскивателя. Учитывая, что конкретных рекомендаций по применению препарата на малине нет, использовали дозировку 80 мл на 10 л мягкой воды, 2 л на 1 пог. м.

Оценку показателей роста и урожайности опытных растений проводили в соответствии с «Программой и методикой сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур» [32]. Варианты размещены систематическим методом в 3-кратной повторности (длина учетной делянки – 3 м, на 1 пог. м – 10–12 побегов).

Анализ экспериментальных данных проводили по общепринятой методике с применением дисперсионного анализа [18], с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2019 и PAST 4.03.

Учет урожая определяли при съеме путем взвешивания плодов с каждой делянки. Сбор осуществляли по мере созревания ягод 7–8 раз. Вместе с тем определяли среднюю массу плода (взвешивали по 50 ягод в трехкратной повторности с каждого варианта).

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Особенность некорневых подкормок заключается в том, что питательные элементы и биологически активные вещества в форме легкодоступных соединений поглощаются растениями, включаются в синтез органических веществ и используются во внутриклеточном обмене, оказывая положительное влияние на важнейшие процессы обмена веществ. С экономической точки зрения внесение жидких комплексных удобрений с микроэлементами в почву считается невыгодным. Поэтому в настоящее время актуальным способом их внесения являются некорневые подкормки [34].

В процессе дисперсионного анализа по F-критерию была установлена существенность влияния вариантов опыта на изучаемый показатель, поэтому в таблице приведено значение наименьшей существенной разницы на 5%-ном уровне значимости (HCp_{05}) для более подробного сравнения каждого из значений по всем изучаемым вариантам (как опытным, так и контрольным) между собой. При оценке компонентов продуктивности сортов малины в опыте с применением препарата Изабион было установлено, что по всем изучаемым показателям опытные варианты существенно превышали контрольный.

В результате оценки биометрических показателей побегов было отмечено, что наиболее сильнорослые сорта ремонтантного типа плодоношения в контроле без обработок формируют побеги высотой более 150 см: Шугана – 174,3 см; Поляна – 153,7 см; Утренняя роса – 150,5 см. Высоту менее 1,5 м имели побеги сортов Польша (149,2 см) и Жар-Птица (146,7 см) (табл. 1).

В результате трехкратных некорневых подкормок препаратом Изабион опытные растения малины красной формируют более мощные побеги с большим количеством латералов, что является важным фактором, потенциально влияющим на урожайность растений. Обработка препаратом способствовала увеличению длины побегов в среднем на 10–15%, что является существенным по сравнению с контролем без обработки препаратом (табл. 1).

В среднем за период исследований в вариантах с применением препарата Изабион исследуемые сорта образовывали от 11,4 до 17,7 латералов на побеге. Максимальное количество латералов отмечено у сортов Утренняя Роса (17,7 шт.) и Шугана (15,9 шт.). Наименьшее число латералов наблюдалось у сортов малины Польша, Поляна, Жар-Птица (11,4–12,5 шт.); существенность разницы подтверждается при математической обработке.

Одним из основных компонентов продуктивности, напрямую влияющим на величину урожая, является средняя масса ягод. Без обработки препаратом масса ягод в среднем по сортам колебалась от 2,6 г (Поляна) до 5,5 г (Шугана). Среди изученных сортов данный показатель при обработке препаратом Изабион повышался на 14,5–18,75% (табл. 1, рис.).

В среднем за годы исследований при обработке препаратом Изабион в условиях Центрально-Черноземного региона выявлены наиболее крупноплодные сорта малины ремонтантной: Шугана (6,3 г) и Утренняя роса (5,6 г), что существенно превосходит контрольный сорт Жар-Птица на 36,9 и 21,7% соответственно. Наименьшим показателем массы ягод характеризовался сорт Поляна (3,1 г), что на 67,3% меньше, чем у контрольного сорта Жар-Птица. Установлено, что применение биологического удобрения и биостимулятора роста растений Изабион обеспечило у сорта Польша повышение средней массы ягод на 18,75%; у сорта Поляна – на 19,2%; у сорта Шугана – на 14,5%; у сорта Утренняя роса – на 16,6%; у сорта Жар-Птица – на 15%. Можно отметить, что мелкоплодный сорт Поляна более отзывчив на применение подкормок и дает большую прибавку по показателю массы ягод.

Таблица 1

**Влияние некорневых обработок препаратом Изабион
на формирование компонентов продуктивности
малины ремонтантного типа плодоношения, 2021–2023 гг.**

Table 1

**Effect of foliar treatments with Isabion on the formation
of productivity components in remontant raspberries, 2021–2023**

Сорт	Вариант подкормки	Средняя высота побега, см	Среднее количество латералов на побеге, шт.	Средняя масса ягод, г	Урожай	
					кг/куст	т/га
Полька	некорневые подкормки Изабион (8 мл/л)	165,1*	12,5*	3,8*	4,3*	24,4*
	Контроль (H ₂ O)	149,2	10,2	3,2	3,6	20,5
НСР ₀₅		4,7	1,3	0,3	0,6	1,5
Поляна	некорневые подкормки	169,2*	11,4*	3,1*	3,8*	21,7*
	Контроль (H ₂ O)	153,7	9,5	2,6	3,2	18,2
НСР ₀₅		5,1	1,1	0,3	0,5	2,0
Шугана	некорневые подкормки	185,9*	15,9*	6,3*	5,9*	33,7*
	Контроль (H ₂ O)	174,3	12,8	5,5	4,9	28,0
НСР ₀₅		4,2	1,7	0,5	0,6	3,5
Утренняя роса	некорневые подкормки	166,8*	17,7*	5,6*	3,6*	20,5*
	Контроль (H ₂ O)	150,5	14,6	4,8	3,0	17,1
НСР ₀₅		4,6	1,6	0,5	0,2	2,4
Жар-Птица (к)	некорневые подкормки	163,4*	12,2*	4,6*	2,9*	16,5*
	Контроль (H ₂ O)	146,7	10,1	4,0	2,4	13,7
НСР ₀₅		5,1	1,1	0,4	0,3	1,7

*Отличия статистически достоверны по сравнению с контрольным вариантом опыта.

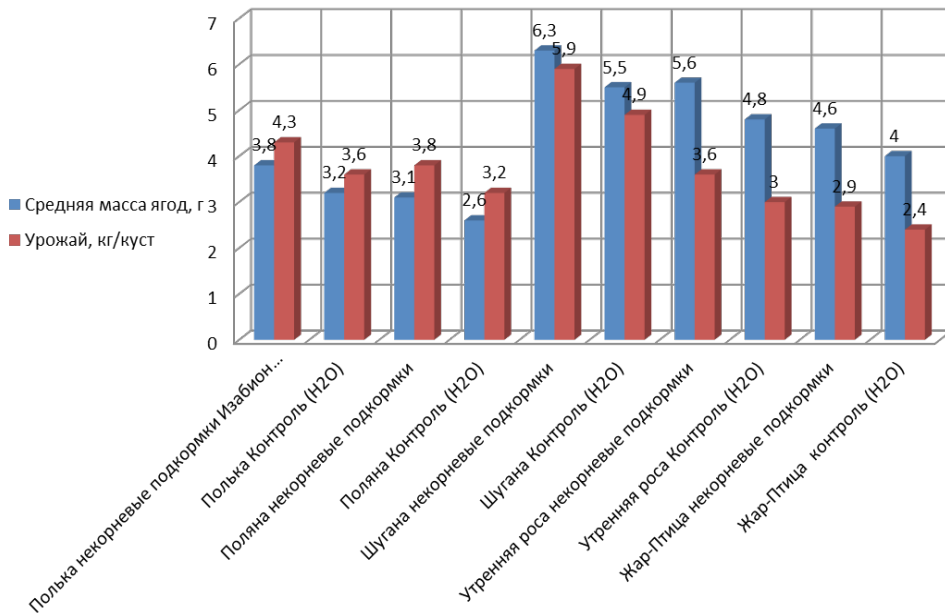


Рис. Урожай и масса ягод малины ремонтантной (в среднем, 2021–2023 гг.)

Figure. Yield and berry weight of remontant raspberries (on average 2021–2023)

Эффективность любого агроприема оценивается по величине урожая. Наибольшей продуктивностью растений в контрольном варианте опыта в изучаемый период характеризовались сорта малины Польша (3,6 кг/куст) и Шугана (4,9 кг/куст). Практически в два раза меньший урожай, чем у сорта Шугана, получен по сорту Жар-птица (2,4 кг/куст).

Более отзывчивым на некорневые подкормки препаратом Изабион оказался сорт Шугана, у которого прибавка составила 1,0 кг с куста, у остальных сортов прибавка урожая не превышала 0,7 кг/куст. В контроле без обработок максимальная урожайность выявлена у сорта Шугана, составив 28,0 т/га, наименьшая – у сорта Жар-Птица (13,7 т/га).

Во всех вариантах с некорневыми подкормками биостимулятором Изабион отмечено существенное повышение урожайности на 18,6–20,0%. К категории урожайных, с использованием некорневых подкормок препаратом Изабион, относятся сорта малины Шугана (33,7 т/га) и Польша (24,4 т/га), к категории среднеурожайных – Поляна (21,7 т/га), Утренняя роса (20,6 т/га).

Урожайность у контрольного сорта Жар-Птица с применением препарата Изабион составила 16,5 т/га, что на 20% больше по сравнению с вариантом без обработок.

Выводы

Conclusions

Таким образом, в результате трехкратной листовой обработки растений малины ремонтантного типа препаратом Изабион (8 мл/л) высота побегов увеличилась в среднем на 10–15%; существенно увеличилось количество латералов на побегах (на 1,9–3,1 шт.); возросла масса ягод на 14,5–19,2%, урожайность насаждений – на 15–20%. Наиболее крупноплодными сортами являются Шугана (6,3 г) и Утренняя роса (5,6 г). Прослеживается сортовая реакция на используемый препарат: сорт

Шугана давал наибольшую прибавку урожая с куста во все годы наблюдений, в среднем она составила 1 кг, тогда как по другим сортам – в среднем 0,5–0,7 кг.

Исследования показали возможность получения при использовании некорневых подкормок препаратом Изабион высоких урожаев малины ремонтантной (более 33 т/га) в условиях Мичуринского района Тамбовской области.

Список источников

1. Григорьева Л.В. *Агробиологические аспекты повышения продуктивности яблони в насаждениях ЦЧР РФ*: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Краснодар, 2015. 47 с.
2. Сайфетдинов А.Р., Лягоскина Н.Р. Современное состояние и направления развития отечественного плодовоговодства в условиях реализации программы импортозамещения // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2022. № 1 (385). С. 79–84. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_1_79
3. Казаков И.В. Состояние и перспективы развития ягодоводства в России // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2009. Т. 22, № 2. С. 64–72. EDN: KXWOKZ
4. Дубовицкий А.А., Климентова Э.А., Григорьева Л.В. Анализ современного состояния отрасли садоводства в России и перспективы развития на основе реализации рыночного потенциала // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2022. Т. 15, № 4 (75). С. 124–138. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_4_124-138
5. Рынок плодово-ягодной продукции в России: до насыщения нам еще расти // *Perfect Agriculture*. URL: <http://perfectagro.ru/2024/06/17/рынок-плодово-ягодной-продукции-в-рос/> (дата обращения: 17.05.2025)
6. Евдокименко С.Н., Сазонов Ф.Ф., Андропова Н.В. Новые сорта ягодных культур для Центрального региона России // *Садоводство и виноградарство*. 2017. № 1. С. 31–38. EDN: YJYEYT
7. Макаров С.С., Калашникова Е.А. Влияние состава питательной среды на клональное микроразмножение жимолости съедобной // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2017. Т. 49. С. 217–222. EDN: YZJZPL
8. Макаров С.С., Кузнецова И.Б. Влияние регуляторов роста при клональном размножении ежевики // *Лесохозяйственная информация*. 2017. № 4. С. 46–51. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2017.4.05>
9. Макаров С.С., Калашникова Е.А., Киракосян Р.Н. Вегетативное размножение жимолости синей (*Lonicera ceruleae* L.) в условиях *in vivo* и *in vitro* // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2018. № 1. С. 82–91. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-1-82-91>
10. Макаров С.С., Кузнецова И.Б. Влияние регуляторов роста на органогенез жимолости при клональном микроразмножении // *Вестник НГАУ*. 2018. № 4 (49). С. 36–42. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2018-49-4-36-42>
11. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Дрозд В.М. Влияние регуляторов роста на органогенез малины при клональном микроразмножении // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018. № 3 (71). С. 111–112. EDN: XRTRKH
12. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Смирнов В.С. Совершенствование технологии клонального микроразмножения княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) // *Лесохозяйственная информация*. 2018. № 4. С. 91–97. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.4.09>
13. Тяк Г.В., Макаров С.С., Калашникова Е.А., Тяк А.В. Размножение и культивирование княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2018. Т. 52. С. 95–99. EDN: XMSYKD

14. Коренев И.А., Тяк Г.В., Макаров С.С. Создание новых сортов лесных ягодных растений и перспективы их интенсивного размножения (*in vitro*) // *Лесохозяйственная информация*. 2019. № 3. С. 180–189. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.15>
15. Макаров С.С. Влияние минерально-витаминного комплекса на клональное микроразмножение ежевики // *Вестник Бурятской ГСХА имени В.Р. Филиппова*. 2019. № 1 (54). С. 115–119. EDN: GXIUDZ
16. Куликова Е.И., Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Чудецкий А.И. Особенности культивирования российских и зарубежных сортов жимолости съедобной (*Lonicera edulis* Turcz.) *in vitro* // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51, № 4. С. 712–722. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-712-722>
17. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Упадышев М.Т. и др. Особенности клонального микроразмножения клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.) // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51, № 1. С. 67–76. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-67-76>
18. Макаров С.С., Родин С.А., Кузнецова И.Б. и др. Влияние освещения на ризогенез ягодных растений при клональном микроразмножении // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51, № 3. С. 520–528. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-520-528>
19. Макаров С.С., Упадышев М.Т., Кузнецова И.Б. и др. Применение освещения различного спектрального диапазона при клональном микроразмножении лесных ягодных растений // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022. № 6 (390). С. 82–93. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-82-93>
20. Aniskina T.S., Ladyzhenskaya O.V., Kryuchkova V.A. Analysis of the contingency of traits in *Rubus* L. in connection with further selection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;979:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012001>
21. Макаров С.С., Чудецкий А.И., Сахоненко А.Н. и др. Создание биоресурсной коллекции ягодных растений на базе РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Тимирязевский биологический журнал*. 2023. № 4. С. 23–33. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-4-23-33>
22. Чудецкий А.И., Макаров С.С., Родин С.А. и др. Укоренение *in vitro* и адаптация к нестерильным условиям российских сортов брусники обыкновенной // *Лесохозяйственная информация*. 2023. № 2. С. 102–114. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.08>
23. Григорьева Л.В., Кузнецова Т.А. Слагаемые потенциальной продуктивности интродуцированных сортов малины ремонтантного типа плодоношения в условиях ЦЧР // *Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы современного садоводства и питомниководства (VI Потаповские чтения)» (Мичуринск, 14 ноября 2024 г.)*. Курск: Университетская книга, 2024. С. 74–79. EDN: INSBZR
24. Богомолова Н.И., Резвякова С.В., Лупин М.В. Биологическая продуктивность и фактическая урожайность малины красной как основа высокой экономической эффективности в условиях Центральной России // *Вестник аграрной науки*. 2020. № 3 (84). С. 10–16. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2020.3.10>
25. Григорьева Л.В., Кузнецова Т.А. Эффективность применения биостимулятора Изабион для повышения продуктивности насаждений малины в условиях ЦЧР // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2024. № 4 (79). С. 8–12. EDN: NRXXSW
26. Аладина О.Н., Акимова С.В., Карсункина Н.П., Скоробогатова И.В. Роль внекорневых обработок в зеленом черенковании садовых растений // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2006. Вып. 3. С. 46–55. EDN: HVJGMT

27. «Сингента» в России: Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.syngenta.ru/> (дата обращения: 20.07.2025)
28. Козявина К.Н. Индуцирование иммунитета у растений и иммунизация биологически активными препаратами // *Международная научно-практическая конференция «Молодежь и инновации-2013» (Республика Беларусь, Горки, 29-31 мая)*. Беларусь: Горки, 2013. Ч. 2. С. 187-190
29. Щербакова Г.В., Иванова Т.А., Лаврищев А.В., Петрова М.Н. Подбор сортов ремонтантной малины для Ленинградской области // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2022. № 4. С. 92–100. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2022-4-92-100>
30. Коротаева М.С., Попов Ю.Г., Трушечкин В.Г., Ярославцев Е.И. О регенерации стеблевых верхушек малины // *Биологические науки*. 1975. № 10. С. 133-136
31. Щербакова Г.В., Иванова Т.А. Подбор сортов ремонтантной малины для Ленинградской области // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2022. № 3 (60). С. 92–100. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2022-4-92-100>
32. *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур* / Под общ. ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК, 1999. 606 с. EDN: YNAOZT
33. Доспехов Б.А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*: Учебник. Изд. 6-е. Москва: Альянс, 2011. 350 с.
34. Осипов А.И., Шкрабак Е.С. Роль некорневого питания в повышении продуктивности сельскохозяйственных культур // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2019. № 54. С. 44–52. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11044>

References

1. Grigorieva L.V. *Agrobiological aspects of increasing the productivity of apple trees in the plantations of the Central Black Earth Region of the Russian Federation*: DSc (Ag) thesis. Krasnodar, Russia, 2015:47. (In Russ.)
2. Saifetdinov A.R., Lyagoskina N.R. The current state and directions of development of domestic fruit growing in the context of the implementation of the import substitution program. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal*. 2022;(1(385)):79-84. (In Russ.) https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_1_79
3. Kazakov I.V. State and prospects for the development of berry growing in Russia. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2009;22(2):64-72. (In Russ.)
4. Dubovitskiy A.A., Klimentova E.A., Grigorieva L.V. Analysis of the current state of the horticultural industry in Russia and prospects for further development due to market potential realization. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(4(75)):124-138. (In Russ.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_4_124-138
5. Fruit and berry market in Russia: we still have a long way to go before saturation. *Perfect Agriculture*. (In Russ.) URL: <http://perfectagro.ru/2024/06/17/рынок-плодово-ягодной-продукции-в-рос/> (accessed: May 17, 2025).
6. Yevdokimenko S.N., Sazonova F.F., Andronova N.V. New varieties of small fruit crops for the Central Region of Russia. *Horticulture and viticulture*. 2017;(1):31-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2017-1-31-38>
7. Makarov S.S., Kalashnikova E.A. Influence of nutrient medium composition on clonal micropropagation of honeysuckle edible. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2017;49:217-222. (In Russ.)

8. Makarov S.S., Kuznetsova I.B. Influence of growth regulators in clonal micropropagation of the blackberry. *Forestry Information*. 2017;(4):46-51. (In Russ.) <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2017.4.05>
9. Makarov S.S., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N. Vegetative reproduction of blue honeysuckle (*Lonicera ceruleae* L.) *in vivo* and *in vitro*. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2018;(1):82-91. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-1-82-91>
10. Makarov S.S., Kuznetsova I.B. Influence of growth regulators on organogenesis of honeyberry when clonic micropropagation. *Vestnik NGAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2018;(4(49)):36-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2018-49-4-36-42>
11. Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Drozd V.M. Effect of growth regulators on raspberry organogenesis during clonal micropropagation. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018;(3(71)):111-112. (In Russ.)
12. Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Smirnov V.S. Improving technology of clonal micropropagation of arctic bramble (*Rubus arcticus* L.). *Forestry Information*. 2018;(4):91-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.4.09>
13. Tyak G.V., Makarov S.S., Kalashnikova E.A., Tyak A.V. Reproduction and cultivation of the arctic bramble (*Rubus arcticus* L.). *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2018;52:95-99. (In Russ.)
14. Korenev I.A., Tyak G.V., Makarov S.S. Creation of new varieties of forest berry plants and prospects for their intensive reproduction (*in vitro*). *Forestry Information*. 2019;(3):180-189. (In Russ.) <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.15>
15. Makarov S.S. Influence of mineral-vitamin complex on clonal micropropagation of blackberry. *Vestnik Buryatskoy GSKhA imeni V.R. Filippova*. 2019;(1(54)):115-119. (In Russ.)
16. Kulikova E.I., Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I. Russian and foreign cultivars of honeysuckle (*Lonicera edulis* Turcz.): cultivation studies *in vitro*. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(4):712-722. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-712-722>
17. Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Upadyshev M.T., Rodin S.A. et al. Clonal micropropagation of cranberry (*Oxycoccus palustris* Pers.). *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(1):67-76. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-67-76>
18. Makarov S.S., Rodin S.A., Kuznetsova I.B., Chudetsky A.I. et al. Effect of light on rhizogenesis of forest berry plants during clonal micropropagation. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(3):520-528. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-520-528>
19. Makarov S.S., Upadyshev M.T., Kuznetsova I.B., Zaushintsena A.V. et al. The use of lighting of various spectral ranges for clonal micropropagation of forest berry plants. *Russian Forestry Journal*. 2022;(6(390)):82-93. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-82-93>
20. Aniskina T.S., Ladyzhenskaya O.V., Kryuchkova V.A. Analysis of the contingency of traits in *Rubus* L. in connection with further selection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;979:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012001>
21. Makarov S.S., Chudetsky A.I., Sakhonenko A.N., Solovyov A.V. et al. Creation of a bioresource collection of berry plants on the basis of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Timiryazev Biological Journal*. 2023;(4):23-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-4-23-33>
22. Chudetsky A.I., Makarov S.S., Rodin S.A. et al. Rooting *in vitro* and adaptation to non-sterile conditions of Russian selection cultivars of lingonberry. *Forestry Information*. 2023;(2):102-114. (In Russ.) <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.08>

23. Grigorieva L.V., Kuznetsova T.A. Components of potential productivity of introduced raspberry varieties of remontant type of fruit bearing in the conditions of the CDR. *Natsional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem 'Aktualnyye voprosy sovremennogo sadovodstva i pitomnikovodstva (V I Potapovskiye chteniya).* November 14, 2024. Kursk, Russia: University Book CJSC, 2024:74-79. (In Russ.)
24. Bogomolova N.I., Rezvyakova S.V., Lupin M.V. Biological productivity and actual yield of red raspberries as the basis for high economic efficiency in the conditions of central Russia. *Bulletin of Agrarian Science.* 2020;(3(84)):10-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2020.3.10>
25. Grigorieva L.V., Kuznetsova T.A. Efficiency of using the biostimulator Izabion to increase the productivity of raspberry plants in the conditions of the Central Chernozem Region. *The bulletin of the Michurinsk State Agrarian University.* 2024;(4(79)):8-12. (In Russ.)
26. Aladina O.N., Akimova S.V., Karsunkina N.P., Skorobogatova I.V. The role of non-root treatment in green grafting of cultivated plants. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2006;(3):46-55. (In Russ.)
27. Syngenta in Russia: Official website. (In Russ.) URL: <https://www.syngenta.ru/> (accessed: July 20, 2025).
28. Kozyavina K.N. Induction of immunity in plants and immunization with biologically active drugs. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 'Molodezh' i innovatsii – 2013.* May 29-31, 2013. Gorki, Belarus, 2013;(2):187-190. (In Russ.)
29. Shcherbakova G.V., Ivanova T.A., Lavrishchev A.V., Petrova M.N. Selection of remontant raspberry varieties for the Leningrad Region. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University.* 2022;(4):92-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2022-4-92-100>
30. Korotaeva M.S., Popov Yu.G., Trushechkin V.G., Yaroslavtsev E.I. On the regeneration of raspberry stem tops. *Biologicheskie nauki.* 1975;(10):133-136. (In Russ.)
31. Shcherbakova G.V., Ivanova T.A. Selection of remontant raspberry varieties for the Leningrad Region. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University.* 2022;(3(60)):92-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2022-4-92-100>
32. *Program and methodology for variety study of fruit, berry and nut crops.* E.N. Sedov, T.P. Ogoltsova (Eds). Orel, Russia: VNIISPK, 1999:606. (In Russ.)
33. Dospekhov B.A. *Methodology of field experiment (with the basics of statistical processing of research results): a textbook.* 6th ed. Moscow, Russia: Alliance, 2011:350. (In Russ.)
34. Osipov A.I., Shkrabak E.S. The role of foliar nutrition in increasing the productivity of agricultural crops. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University.* 2019;(54):44-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11044>

Информация об авторах

Людмила Викторовна Григорьева, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры садоводства, биотехнологии и селекции сельскохозяйственных культур, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет»; 393760, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101; e-mail: grigorjeval@mail.ru

Татьяна Александровна Кузнецова, старший преподаватель кафедры садоводства, биотехнологий и селекции сельскохозяйственных культур, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет»; 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101; e-mail: tatyana.anilova@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3569-8238>

Александр Валерьевич Зубков, канд. экон. наук, доцент кафедры плодородства, виноградарства и виноделия, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: a.zubkov@rgau-msha.ru

Information about the authors

Lyudmila V. Grigorieva, DSc (Ag), Professor, Professor at the Department of Horticulture, Biotechnology and Selection of Agricultural Crop, Michurinsk State Agrarian University; 101 Internatsionalnaya St., Michurinsk, Tambov Region, 393760, Russian Federation; e-mail: grigorjeval@mail.ru

Tatyana A. Kuznetsova, Senior Lecturer at the Department of Horticulture, Biotechnology and Selection of Agricultural Crop, Michurinsk State Agrarian University; 101 Internatsionalnaya St., Michurinsk, Tambov Region, 393760, Russian Federation; e-mail: tatyana.anilova@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3569-8238>

Aleksandr V. Zubkov, CSc (Econ), Associate Professor at Department of Pomiculture, Viticulture and Winemaking, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: a.zubkov@rgau-msha.ru

БОТАНИКА, ПЛОДОВОДСТВО

**Аэрозольный способ применения регулятора корнеобразования
при зеленом черенковании подвоев косточковых культур**

**Егор Григорьевич Самощенко[✉], Иван Андреевич Фесютин,
Александр Валерьевич Соловьев, Александр Евгеньевич Буланов,
Светлана Владимировна Акимова**

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: samoshenkov@rgau-msha.ru

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения большого количества посадочного материала для закладки и обновления промышленных садов. Ускоренное размножение подвоев для косточковых культур будет способствовать развитию отрасли плодородства. В статье представлены двухлетние данные применения 4(индол-3ил) масляной кислоты (ИМК) в аэрозольной форме при укоренении зеленых черенков клоновых подвоев косточковых культур: ОП 23–23, ВСЛ-2 и сорта сливы Евразия 21. Нарезанные зеленые черенки связывали в пучки, базальную часть погружали в контейнер с дистиллированной водой на 1–1,5 см и помещали в пленочную камеру для аэрозольной обработки длительно-стью от 4 до 20 ч, которую создавали при помощи ультразвукового увлажнителя воздуха, подключенного к таймеру. Режим работы – циклический, генерация тумана – 1 мин, интервал – 9 мин. Рабочий раствор стимулятора корнеобразования (25 мг/л) готовили из препарата Корень Супер, ВРГ (5 г/кг индолил-3-масляной кислоты) АО «Август». Во всех вариантах наблюдали повышение укореняемости. Лучшей она была при 16–20-часовой экспозиции и достигала 97,7%, что на 10–11% выше по сравнению с контролем. Существенно увеличилось количество корней 1-го порядка, но средняя их длина возрастала незначительно. Заметно увеличилась средняя длина нового прироста. По среднему количеству новых приростов достоверное отличие получено только у подвоя ОП 23–23 при экспозиции 20 ч в 2024 г.

Ключевые слова

Зеленое черенкование, клоновые подвои, искусственный туман, аэрозольный способ применения стимулятора корнеобразования

Для цитирования

Самощенко Е.Г., Фесютин И.А., Соловьев А.В., Буланов А.Е. и др. Аэрозольный способ применения регулятора корнеобразования при зеленом черенковании подвоев косточковых культур // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 52–67.

Aerosol application of a rooting regulator for herbaceous cuttings of stone fruit rootstocks

Egor G. Samoshenkov✉, Ivan A. Fesyutin, Aleksandr V. Solovyov,
Alexander E. Bulanov, Svetlana V. Akimova

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉Corresponding author: samoshenkov@rgau-msha.ru

Abstract

The relevance of this work stems from the need to obtain a large amount of planting material for establishing and renewing commercial orchards. Accelerated propagation of rootstocks for stone fruit crops will contribute to the development of the fruit growing industry. This article presents two-year data on the aerosol application of 4-(indol-3-yl)butyric acid (IBA) for rooting herbaceous cuttings of clonal stone fruit rootstocks: OP 23–23, VSL-2, and plum cultivar Eurasia 21. Prepared herbaceous cuttings were tied into bundles, their basal ends immersed 1–1.5 cm deep in a container with distilled water, and then placed in a film chamber for aerosol treatment lasting 4 to 20 hours. The aerosol was generated using an ultrasonic humidifier connected to a timer. The operating mode was cyclic, with mist generation for one minute followed by a 9-minute interval. The working solution of the rooting stimulant (25 mg/l) was prepared from “Koren Super”, WDG (5 g/kg indolyl-3-butyric acid) produced by Avgust, AO. An increase in rooting success was observed across all treatments. The best rooting rate was achieved with 16–20 hours of exposure, reaching 97.7%, which is 10–11% higher compared to the control. The number of first-order roots significantly increased, but their average length increased only slightly. The average length of new growth noticeably increased. A significant difference in the average number of new shoots was observed only for rootstock OP 23–23 with 20 hours of exposure in 2024.

Keywords

Herbaceous cuttings, clonal rootstocks, artificial mist, aerosol application of a rooting stimulant

For citation

Samoshenkov E.G., Fesyutin I.A., Solovyov A.V., Bulanov A.E. et al. Aerosol application of a rooting regulator for herbaceous cuttings of stone fruit rootstocks. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 52–67.

Введение

Introduction

В настоящее время существует острый дефицит отечественного посадочного материала косточковых культур и подвоев для них. Посадочный материал необходим для закладки новых и реконструкции существующих промышленных садов. Увеличение площади промышленных насаждений необходимо для удовлетворения внутреннего спроса на плодово-ягодную продукцию. Согласно принятой доктрине продовольственной безопасности РФ отрасль плодоводства должна обеспечивать не менее 60% спроса на внутреннем рынке [1].

Размножение растений зелеными черенками позволяет получать генетически однородные корнесобственные растения с сохранением исходных сортовых

особенностей. В настоящее время этот способ является одним из основных в промышленности при выращивании многих садовых и лесных культур. Биологические и промышленные основы этой технологии разрабатывали ученые РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, значительно усовершенствованы они также исследователями других научных учреждений – в частности, Ф.Я. Поликарповой [2].

В результате технологическое оснащение зеленого черенкования находится на достаточно высоком уровне и продолжает развиваться в различных направлениях, в том числе в сочетании с другими способами вегетативного размножения. Однако черенки косточковых культур укореняются достаточно трудно, поэтому актуально совершенствовать приемы вегетативного размножения – в частности, найти более эффективные приемы обработки черенков стимуляторами корнеобразования [3, 4]. Исследования в области зеленого черенкования сфокусированы также и на методологии процесса. Исследователи работают над оптимизацией условий черенкования – таких, как температура, влажность и освещение, чтобы достичь оптимальных результатов. Это способствует увеличению процента приживаемости черенков и улучшает качество полученных растений [5].

Успешное использование данного способа вегетативного размножения, основанного на естественной способности растений к регенерации, зависит и от применения стимуляторов корнеобразования из группы ауксинов. Их использование является практически обязательным технологическим приемом, поскольку ускоряется процесс корнеобразования и значительно повышаются выход и качество укорененных черенков [6–8].

Способы применения регуляторов как самостоятельно, так и в сочетании с другими соединениями (витамины, аминокислоты, химические элементы, биостимуляторы и др.), различны в зависимости от производственных условий. Это могут быть водные и спиртовые растворы, ростовые пудры в сочетании с тальком, мелом, углем, а также в виде ланолиновой или гелевой пасты. При этом обрабатывается основание стебля зеленых черенков перед их укоренением [9, 10, 16–19].

Существует аэрозольное применение стимуляторов роста, которые проникают в ткани растений в основном через листья, где они и вырабатываются в нативной форме в соответствующих количествах [5]. При укоренении зеленых черенков подвоев и сортов косточковых культур этот способ практически не изучен.

Ранее проведенные опыты по оценке различных способов применения регулятора роста ИМК для обработки зеленых черенков перед их укоренением показали хорошие результаты [6, 9, 10]. Использование увлажнителя воздуха с раствором регулятора роста индолил-3-масляной (ИМК) перед укоренением черенков позволяет создавать в камере непосредственно туман с размером капель $5\text{--}15 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ и относительной влажностью воздуха 100%. Это предохраняет от переувлажнения, а также от вымывания из листьев легкорастворимых веществ [12]. Процесс испарения конденсата происходит достаточно быстро, что понижает температуру листа и повышает влажность в зоне устьиц. Лист не теряет воду, и обеспечивается важное условие разности температур для нижней и верхней частей черенка [5]. Регулятор роста с водяным паром проникает в листья, и включается метаболизм, соответственно влияя на процессы адвентивного ризогенеза зеленых черенков. Последствие этого процесса отражается на укореняемости зеленых черенков и качестве получаемых растений, однако необходимо уточнение экспозиции воздействия аэрозольной формы [5].

Цель исследований: оценка эффективности аэрозольного способа применения стимулятора корнеобразования ИМК при укоренении зеленых черенков подвоев и сорта косточковых культур.

Методика исследований

Research method

Для достижения поставленной цели исследований решались следующие задачи:

- изучение влияния экспозиции обработки зеленых черенков на их укореняемость и качество полученных растений;
- изучение влияния применения ИМК в аэрозольной форме на морфометрические показатели полученных растений.

Исследования проводили в отделе виноградарства, редких и декоративных культур УНПЦ садоводства и овощеводства имени В.И. Эдельштейна на базе РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2023–2024 гг. Объектом исследований служили клоновые подвой косточковых ОП 23–23 (используется для получения привитых саженцев сливы и абрикоса) и ВСЛ 2 (используется для получения привитых саженцев черешни, и избирательно – вишни), а также сорт сливы Евразия 21, который часто используется в качестве подвоя или скелетообразователя для получения привитых саженцев). Районированный среднерослый клоновый подвой сливы ОП 23–23 используется для получения привитых саженцев сливы и абрикоса, хорошо размножается зелеными черенками. ВСЛ-2 – районированный клоновый подвой, который используется для получения привитых саженцев вишни и черешни, характеризуется хорошей укореняемостью, зимостойкостью и засухоустойчивостью. Евразия 21 – сложный межвидовой гибрид сливы, полученный в результате спонтанной гибридизации диплоидного сорта Лакресцент селекции США; отобран из семян гексаплоидной группы от свободного опыления ($6x = 48$); оригинатор – Воронежский государственный аграрный университет.

Нарезку черенков проводили в фазу интенсивного роста побегов в середине июня по методике Тарасенко. При изучении эффективности проведения аэрозольной обработки зеленых черенков опытных растений проводили обработку водным раствором ИМК в концентрации 25 мг/л. В 5 опытных вариантах обработка проводилась также водным раствором этого регулятора, но в аэрозольной форме. Для этого они помещались в пленочную камеру объемом 0,3 м³, в которую помещен бытовой ультразвуковой увлажнитель воздуха NeoClima HNL-200 (NeoClima, КНР), наполненный водным раствором стимулятора корнеобразования с концентрацией ИМК 25 мг/л. Увлажнитель включался электронным таймером на 1 мин с интервалом через 9 мин. Соответственно в камере создавался непосредственно туман с размером капель $5\text{--}15 \cdot 10^{-6}$ м, и водная аэрозоль ИМК (25 мг/л) оседала на листья черенков, а относительная влажность воздуха поддерживалась на 100%-ном уровне. При этом длительность экспозиции составляла 4, 8, 12, 16 и 20 ч соответственно. Контрольные черенки обрабатывались водным раствором ИМК в концентрации 25 мг/л путем замачивания основания черенков в течение 16 ч.

После обработки зеленые черенки высаживали в кассеты по 35 ячеек с объемом 110 мл со смесью торфа (субстрат торфяной (pH_{KCl} 5,5+) питательный, гидрореагент Fiba Zorb «Peter Peat», 230 л) с агроперлитом (фракция 3–6 мм) в соотношении 3:1 и помещали на укоренение в пленочную теплицу, оборудованную туманообразующей установкой. Режим работы туманообразующей установки задавался контроллером Galkon; интервал – 10 мин, экспозиция – 5–10 с; в зависимости от погодных условий проводили корректировку режима туманообразования. На ночное время туманообразующую установку отключали.

Уход за зелеными черенками заключался в удалении загнивших черенков при обнаружении, сборе опавших листьев и удалении их из теплицы для предотвращения развития гнилей [17]. В осенний период проводили учеты по укореняемости и оценку качества укорененных черенков: количество корней 1-го порядка и их среднюю длину, а также среднюю длину образовавшихся приростов и их количество. Для каждого варианта опыта применяли 4-кратную повторность, по 20 черенков в каждой.

Статистическую обработку и анализ экспериментальных данных проводили по общепринятым методикам Б.А. Доспехова [14] и А.В. Исачкина [15] с использованием программ Microsoft Office Excel 2010 и PAST 4. Результаты выражены как среднее значение \pm стандартное отклонение. Для оценки достоверности результатов использовали наименьшую существенную разность на 5%-ном уровне значимости (HCP_{05}), которую рассчитывали при помощи двухфакторного дисперсионного анализа, где фактор А – продолжительность обработки; фактор В – год исследований.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

При размножении зелеными черенками клонового подвоя сливы ОП 23–23 было выявлено преимущество над контролем по укореняемости у вариантов с проведением аэрозольной обработки черенков. Также выявлено достоверное различие обработок от 8 до 20 ч на среднее число корней 1-го порядка. Что касается надземной системы укорененных черенков, то на среднюю длину приростов положительно влияла 16- и 20-часовая обработка, результаты в среднем были выше контроля на 5 и 3,9 см соответственно. По среднему количеству нового прироста достоверное отличие от контроля получено только в 2024 г. при экспозиции 20 ч (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние экспозиции аэрозольной обработки ИМК зеленых черенков
клонового подвоя ОП 23–23 в 2023–2024 гг.
на укореняемость и морфометрические показатели**

Table 1

Effect of aerosol IBA treatment exposure on rooting success and morphometric indicators of herbaceous cuttings of the OP 23–23 clone rootstock, 2023–2024

Продолжительность обработки (фактор А)	Год исследований (фактор В)		Среднее по фактору В
	2023	2024	2023–2024 гг.
Укореняемость зеленых черенков, %			НСП ₀₅ А = 1,68
Контроль (без обработки)	73,8±4,79	87,5±2,89 ^b	80,6
4 часа	73,8±2,50	93,8±2,50 ^{a, b}	83,8
8 часов	75,0±0,0	96,3±2,50 ^{a, b}	85,6
12 часов	80,0±0,00 ^a	92,5±2,89 ^{a, b}	86,3
16 часов	88,8±2,50 ^a	97,5±2,89 ^{a, b}	93,1
20 часов	87,5±2,89 ^a	97,5±2,89 ^{a, b}	92,5
Среднее по фактору А	79,8	94,2	—
НСП ₀₅ В = 1,02			
НСП ₀₅ ab = Fφ<Fт для сравнения частных случаев			

Продолжительность обработки (фактор А)	Год исследований (фактор В)		Среднее по фактору В
	2023	2024	2023–2024 гг.
Средняя длина корней 1-го порядка, см			HCP ₀₅ А = 0,85
Контроль (без обработки)	8,5±1,84	8,6±0,87	8,6
4 часа	9,4±1,67 ^a	7,4±1,25	8,4
8 часов	10,2±0,87 ^a	7,8±0,63 ^a	9,0
12 часов	10,3±0,66 ^a	9,8±0,89 ^a	10,1
16 часов	10,6±1,10 ^a	10,0±0,74 ^a	10,3
20 часов	10,0±0,90 ^a	10,2±1,29 ^a	10,1
Среднее по фактору А	5,0	4,2	–
HCP ₀₅ В = 0,40			
HCP ₀₅ АВ = 1,49 для сравнения частных случаев			
Среднее количество корней 1-го порядка, шт.			HCP ₀₅ А = 1,27
Контроль (без обработки)	7,4±2,67	8,1±1,29 ^b	7,8
4 часа	10,0±1,49 ^{a, b}	9,0±1,70	9,5
8 часов	11,9±1,60 ^{a, b}	10,2±1,23 ^a	11,1
12 часов	12,2±1,62 ^a	12,4±2,17 ^a	12,3
16 часов	12,3±1,49 ^a	12,8±1,62 ^a	12,6
20 часов	12,4±1,07 ^a	13,7±1,49 ^{a, b}	13,1
Среднее по фактору А	5,7	5,3	–
HCP ₀₅ В = 0,60			
HCP ₀₅ АВ = 2,22 для сравнения частных случаев			
Средняя длина приростов, см			HCP ₀₅ А = 1,50
Контроль (без обработки)	5,9±2,23	9,7±1,44 ^b	7,8
4 часа	10,1±2,12 ^{a, b}	8,6±1,51	9,3
8 часов	10,6±2,11 ^a	10,0±1,39	10,3

Продолжительность обработки (фактор А)	Год исследований (фактор В)		Среднее по фактору В
	2023	2024	2023–2024 гг.
12 часов	11,8±1,52 ^{a, b}	11,0±1,12	11,4
16 часов	11,8±1,81 ^a	13,7±1,45 ^{a, b}	12,8
20 часов	10,6±3,97 ^a	12,9±1,30 ^{a, b}	11,7
Среднее по фактору А	5,4	4,9	–
HCP ₀₅ В = 0,71			
HCP ₀₅ АВ = 2,62			
Среднее количество приростов, шт.			HCP ₀₅ А = 0,56
Контроль (без обработки)	2,1±0,88	1,8±0,63	2,0
4 часа	2,1±,88	2,0±,67	2,1
8 часов	2,3±0,48	1,8±0,92	2,1
12 часов	2,0±0,67	1,9±0,88	2,0
16 часов	2,1±0,74	2,2±0,63	2,2
20 часов	1,9±0,57	2,8±0,79 ^a	2,4
Среднее по фактору А	1,1	1,0	–
HCP ₀₅ В = Fφ<Fт			
HCP ₀₅ АВ = Fφ<Fт для сравнения частных случаев			

При размножении зелеными черенками клонового подвоя вишни и черешни ВСЛ-2 была установлена эффективность применения аэрозольной обработки черенков перед укоренением ИМК в концентрации 25 мг/л. Лучшие результаты получены при 12-, 16- и 20-часовой экспозиции, в среднем они превышают контроль на 2,5; 6,5; 3,2% соответственно (табл. 2).

Достоверные различия укорененных черенков выявлены по средней длине корней 1-го порядка в вариантах с экспозицией 12–20 ч и их среднему количеству в вариантах 8–20 ч. По показателю средней длины приростов достоверные различия получены при 12-, 16- и 20-часовой обработке. Также установлено достоверное влияние условий года исследований на среднее количество корней 1-го порядка. По средней длине нового прироста в 2023 г. все изучаемые варианты превзошли контроль, а в 2024 г. – только при экспозиции 16 и 20 ч. По среднему количеству нового прироста достоверные различия с контролем выявлены только в 2024 г. при экспозиции 16 и 20 ч (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние экспозиции аэрозольной обработки стимулятором
корнеобразования зеленых черенков клонового подвоя ВСЛ 2 в 2023–2024 гг.
на морфометрические показатели**

Table 2

**Effect of aerosol IBA treatment exposure on rooting success and morphometric
indicators of herbaceous cuttings of the VSL 2 clone rootstock, 2023–2024**

Продолжительность обработки (фактор А)	Год исследований (фактор В)		Среднее по фактору А
	2023	2024	2023–2024 гг.
Укореняемость зеленых черенков, %			$HCP_{05} a = 1,58$
Контроль (без обработки)	87,5±2,89	88,8±2,50 ^b	88,1
4 часа	81,3±2,50	88,8±2,50 ^b	85,0
8 часов	85,0±4,08	91,3±2,50 ^{a, b}	88,1
12 часов	88,8±2,50 ^a	92,5±2,89 ^{a, b}	90,6
16 часов	95,0±0,00 ^{a, b}	93,8±2,50 ^a	94,4
20 часов	90,0±0,00 ^a	92,5±2,89 ^{a, b}	91,3
Среднее по фактору А	87,9	91,3	—
$HCP_{05} B = 0,96$			
$HCP_{05} AB = F\phi < F\Gamma$ для сравнения частных случаев			
Среднее количество корней 1-го порядка, шт.			$HCP_{05} a = 1,83$
Контроль (без обработки)	12,2±3,79	10,6±1,90	11,4
4 часа	13,0±2,36 ^b	10,9±1,85	12,0
8 часов	13,9±2,08 ^b	12,0±2,00	13,0
12 часов	18,1±2,42 ^{a, b}	15,3±1,89 ^a	16,7
16 часов	15,6±1,43 ^{a, b}	13,7±1,49 ^a	14,7
20 часов	19,5±3,60 ^{a, b}	16±2,75 ^a	17,8
Среднее по фактору А	7,5	6,4	—
$HCP_{05} B = 0,87$			
$HCP_{05} ab = 3,20$ для сравнения частных случаев			
Средняя длина приростов, см			$HCP_{05} a = 2,23$
Контроль (без обработки)	9,2±1,51	9,4±1,20	9,3

Продолжительность обработки (фактор А)	Год исследований (фактор В)		Среднее по фактору А
	2023	2024	2023–2024 гг.
4 часа	13,5±4,70 ^a	13,2±1,65 ^a	13,3
8 часов	13,1±4,12 ^a	14,6±3,20 ^a	13,8
12 часов	16,0±4,17 ^a	14,1±1,99 ^a	15,1
16 часов	16,8±2,90 ^a	14,1±2,10 ^a	15,4
20 часов	16,3±3,32 ^a	16,8±2,45 ^a	16,5
Среднее по фактору В	7,0	7,0	–
$HCP_{05} B = F\phi < F_T$			
$HCP_{05} AB = F\phi < F_T$			
Среднее количество приростов, шт.			$HCP_{05} a = 0,47$
Контроль (без обработки)	1,8±0,63	1,5±0,53	1,7
4 часа	1,6±0,70	1,6±0,70	1,6
8 часов	1,9±0,74	1,7±0,48	1,8
12 часов	1,3±0,48	1,9±0,74	1,6
16 часов	1,1±0,32	2,2±0,79 ^a	1,7
20 часов	1,7±0,48	2,2±0,63 ^a	2,0
Среднее по фактору В	0,8	0,9	–
$HCP_{05} B = F\phi < F_T$			
$HCP_{05} AB = 0,82$ для сравнения частных случаев			

При размножении зелеными черенками сорта сливы Евразия 21 была подтверждена эффективность применения аэрозольной обработки черенков перед укоренением ИМК в концентрации 25 мг/л. В среднем за 2 года исследований укореняемость зеленых черенков составила 80,0–91,9% по сравнению с контрольным значением в 83,2%. Лучшие результаты получены при 12-, 16- и 20-часовой экспозиции, в среднем они превышают контроль на 2,5; 6,5; 3,2% соответственно. При 8-часовой экспозиции превышение контроля составило в среднем только 0,6%. По среднему количеству корней 1-го порядка в вариантах 12 и 20 ч за 2 года и 16 ч в 2024 г. По показателю средней длины приростов достоверные различия получены при 12-, 16- и 20-ти часовой обработке. По средней длине нового прироста варианты с экспозицией 12–20 ч превзошли контроль. По среднему количеству нового прироста достоверных различий с контролем нет (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние экспозиции аэрозольной обработки ИМК зеленых черенков
сорта сливы Евразия 21 в 2023–2024 гг. на их укореняемость
и морфометрические показатели**

Table 3

**Effect of aerosol IBA treatment exposure on rooting success and morphometric
indicators of herbaceous cuttings of the Eurasia plum varieties, 2023–2024**

Продолжительность обработки (фактор А)	Год исследований (фактор В)		Среднее по фактору В
	2023	2024	2023–2024 гг.
Укореняемость зеленых черенков, %			HCP ₀₅ A = 0,32
Контроль (без обработки)	88,8±2,50 ^b	76,3±6,45	80,0
4 часа	83,8±4,79 ^b	80,0±6,29 ^a	83,8
8 часов	87,5±2,89 ^b	81,3±0,00 ^a	85,0
12 часов	88,8±2,50 ^b	85,0±4,79 ^a	88,8
16 часов	92,5±2,89 ^{a, b}	88,8±4,08 ^a	91,9
20 часов	95,0±0,00 ^{a, b}	77,5±2,50	83,1
Среднее по фактору А	89,4	81,5	–
HCP ₀₅ B = 0,19			
Средняя длина корней 1-го порядка, см			HCP ₀₅ a = 2,38
Контроль (без обработки)	9,1±1,73	10,5±1,75	9,8
4 часа	9,7±0,94	10,4±0,97	10,0
8 часов	9,9±0,43 ^a	9,8±0,68	9,8
12 часов	10±0,50a	9,9±0,70	10,0
16 часов	10,0±0,57 ^a	10,8±0,93	10,4
20 часов	10,3±0,54 ^a	11,0±0,58	10,6
Среднее по фактору А	4,9	5	–
HCP ₀₅ b = Fφ<Fт			
HCP ₀₅ ab = 1,45 для сравнения частных случаев			
Среднее количество корней 1-го порядка, шт.			HCP ₀₅ A = 1,63
Контроль (без обработки)	14,7±3,20	15,8±2,62	15,3
4 часа	13,3±2,00	13,1±1,85	13,2

Продолжительность обработки (фактор А)	Год исследований (фактор В)		Среднее по фактору В
	2023	2024	2023–2024 гг.
8 часов	15,1±1,79	14,9±2,42	15,0
12 часов	17,0±1,94 ^a	17,8±1,87 ^a	17,4
16 часов	16,2±1,75	17,9±1,66 ^a	17,1
20 часов	17,2±2,35 ^a	17,9±,66 ^a	17,6
Среднее по фактору А	7,6	7,60	–
НСП ₀₅ В = Fφ<Fτ			
НСП ₀₅ АВ = Fφ<Fτ для сравнения частных случаев			
Средняя длина приростов, см			НСП ₀₅ А = 1,35
Контроль (без обработки)	6,5±3,07	9,7±1,89 ^b	8,1
4 часа	7,3±0,94	10,4±1,18 ^b	8,8
8 часов	8,3±1,62	10,9±1,13 ^b	9,6
12 часов	10,1±2,42 ^a	12,0±1,07 ^{a, b}	11,1
16 часов	11,5±1,37 ^a	11,6±1,29 ^a	11,5
20 часов	11,7±2,61 ^a	12,3±1,14 ^a	12,0
Среднее по фактору А	4,3	5,6	–
НСП ₀₅ В = 0,64			
НСП ₀₅ АВ = 2,36			
Среднее количество приростов, шт.			НСП ₀₅ А = 0,56
Контроль	1,7±1,06	1,3±0,4	1,5
4 часа	1,3±0,67	1,2±0,42	1,3
8 часов	1,5±0,71	1,3±0,48	1,4
12 часов	1,6±0,70	1,3±0,48	1,5
16 часов	1,5±0,71	1,4±0,52	1,5
20 часов	1,8±0,79	1,5±0,53	1,7
Среднее по фактору А	0,7	0,6	–
НСП ₀₅ В = Fφ<Fτ			
НСП ₀₅ АВ = Fφ<Fτ для сравнения частных случаев			

Применение стимулятора корнеобразования в аэрозольной форме повышает укореняемость зеленых черенков и способствует существенному увеличению средней длины и среднего количества корней 1-го порядка, а также средней длины нового прироста. Существенного влияния на количество нового прироста аэрозольная обработка не оказала, за исключением варианта с экспозицией 20 ч у подвоя ОП 23–23 в 2024 г.

Выводы

Conclusions

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Для стимулирования корнеобразования зеленых черенков клоновых подвоев ОП 23–23 и ВСЛ 2 и сорта сливы Евразия 21 эффективно использовать аэрозольную обработку стимулятором корнеобразования (ИМК 25 мг/л) продолжительностью от 16 до 20 ч.

2. Аэрозольная обработка зеленых черенков клоновых подвоев косточковых культур способствует увеличению числа корней 1-го порядка. Лучшие результаты получены при экспозиции 12, 16 и 20 ч.

3. Установлено положительное влияние аэрозольной обработки черенков на увеличение средней длины приростов при экспозиции 16 и 20 ч.

Полученные результаты показывают возможность применения аэрозольной обработки в промышленности для повышения качества получаемых подвоев. За счет аэрозоля в камере черенки не пересыхают, не требуются дополнительные затраты на их увлажнение и укрытие пленкой, как при классическом замачивании в растворе. Дальнейшие исследования имеют большие перспективы. Особенно эффективной аэрозольная обработка может оказаться для трудноукореняемых культур.

Список источников

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации: утв. Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20.

2. Аладина О.Н. Совершенствование технологии зеленого черенкования садовых культур // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2013. Вып. 4. С. 5–22. EDN: RCLYSR

3. Льянов В.В., Упадышева Г.Ю., Артюхова А.В. Особенности размножения декоративных сортов сливы и алычи методом зеленого черенкования // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2016. Т. 46. С. 207–211. EDN: WMHGPR

4. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. *Физиология растений*: Учебник. Изд. 4-е, перераб. и доп. Москва: Юрайт, 2016. Т. 2. 459 с. EDN: VTWYKX

5. Способ обработки растений биологически активным веществом (варианты): Патент 2110917 С1 Российская Федерация / К.П. Куценогий, В.И. Макаров, Е.И. Киров, Ю.Н. Самсонов, 1998.

6. Самощенко Е.Г., Фесютин И.А., Гебре К.В., Буланов А.Е. Влияние различной обработки на укореняемость зеленых черенков клоновых подвоев сливы ОП 23-23 и ВСЛ 2 в условиях искусственного тумана // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2023. № 6. С. 86–102. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-6-86-102>

7. Тютюма Н.В., Климов С.В. Зеленое черенкование как эффективный метод размножения клоновых подвоев косточковых культур // *Известия Нижневолжского*

- агроуниверситетского комплекса: *Наука и высшее профессиональное образование*. 2021. № 4 (64). С. 44–50. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-04-04>
8. Охунджанов А.Х. Размножение клоновых подвоев косточковых культур зелеными черенками с использованием стимуляторов корнеобразования // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020. № 9 (191). С. 28–33. EDN: VVYYJY
9. Усенко В.И., Бояндина Т.Е. Применение регуляторов роста на маточных растениях и зеленых черенках вишни степной // *III Всероссийский симпозиум косточководов «Северная вишня» (Челябинск, 3-4 марта 2015 г.)*. Челябинск: Челябинский дом печати, 2015. С. 134–138. EDN: UBVBND
10. Фесютин И.А., Самощенко Е.Г., Буланов А.Е. Доступные анти-транспиранты при укоренении зеленых черенков краснолистной алычи // *АгроЭкоИнфо*. 2024. № 6. URL: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/6/st_644.pdf. <https://doi.org/10.51419/202146644>
11. Самощенко Е.Г., Жучков А.Н., Буланов А.Е. Особенности настольной прививки вишни и черешни на укорененные черенки клонового подвоя ВСЛ-2 // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2020. Т. 63. С. 184–192. <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2020-63-184-192>
12. Фесютин И.А., Самощенко Е.Г., Буланов А.Е. Использование водорастворимых удобрений для повышения качества укорененных черенков клонового подвоя для вишни и черешни ВСЛ 2 // *АгроЭкоИнфо*. 2024. № 6. URL: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/6/st_645.pdf. <https://doi.org/10.51419/202146645>
13. Цепляев А.Н., Попова А.А., Пальцева А.В. Эффективность размножения различных сортов декоративных кустарников методом зеленого черенкования в условиях Воронежской области // *Международная молодежная научно-практическая конференция «Лесоводственно-биологические основы устойчивости природных и искусственных фитоценозов» (Воронеж, 21 февраля 2024 г.)*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2024. С. 249–254. https://doi.org/10.58168/FBFSNAP2024_249-254
14. Доспехов Б.А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*: Учебник. Изд. 6-е, стер. Москва: Альянс, 2011. 350 с.
15. Исачкин А.В., Крючкова В.А. *Основы научных исследований в садоводстве*: Учебник. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 420 с. EDN: ADEXKC
16. Abdikayumov Z., Yulchieva D. Impact of green initial cuttings of vegetative-active grafting points of cherry on rooting and its period, rods, and growth controlling plant substance concentration. *E3S Web of Conferences*. 2021;284:03010. 10.1051/e3s-conf/202128403010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128403010>
17. Islamov S., Khalmirzaev D., Abdikayumov Z. Growing a low-growth clone planting material of cherry from green cuttings. *E3S Web of Conferences*. 2023;389:03064. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338903064>
18. Khalmirzaev D.K., Yenileev N.Sh., Abdikayumov Z.A. Development of the assimilation apparatus of cherries and sweet cherries grown on clonal rootstocks in connection with crown forms. *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch*. 2002;5(06):200–205. <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2020.5587>
19. Khalmirzaev D.K., Yenileev N.Sh., Abdikayumov Z.A. Photosynthetic productivity of cherry and sweet cherry leaves due to rootstock and artificial forms of tree crowns in the garden. *EPRA International Journal of Research & Development (IJRD)*. 2020;5(11):146–150. <https://doi.org/10.36713/epra5623>

References

1. Presidential Decree, No. 20 dated January 21, 2020, "On Approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation." (In Russ.)
2. Aladina O.N. Optimization of propagation technology of garden plants by herbaceous cuttings. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2013;(4):5-22. (In Russ.)
3. Lyanov V.V., Upadysheva G.Yu., Artyukhova A.V. Features of reproduction of decorative varieties of plum and cherry plum by method of a green cuttings. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2016;46:207-211. (In Russ.)
4. Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Plant physiology: a textbook*. Vol. 2., 4th ed., rev. Moscow, Russia: Publishing House Yurayt, 2016:459. (In Russ.)
5. Patent 2110917 C1 (Russian Federation). Method of treating plants with a biologically active substance (versions). Kutsenogiy K.P., Makarov V.I., Kirov E.I., Samsonov Yu.N., 1998. (In Russ.)
6. Samoshchenkov E.G., Fesyutin I.A., Veldagiyorgis G.K., Bulanov A.E. Effect of different treatments on the rooting ability of herbaceous cuttings of clonal rootstocks of plum OP 23-23 and VSL 2 under artificial fog conditions. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2023;1(6):86-102. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-6-86-102>
7. Tyutyuma N.V., Klimov S.V. Green cuttings as an effective method of propagation of clonal rootstocks of stone fruit crops. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2021;(4(64)):44-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-04-04>
8. Okhunjanov A.H. The reproduction of clonal rootstock of stone fruit crops by green cuttings with the use of root stimulating agents. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;(9(191)):28-33. (In Russ.)
9. Usenko V.I., Boyandina T.E. Application of growth regulators on mother plot plants and soft-wood cuttings of frutescent cherry. *III Vserossiyskiy simpozium kostochkovedov 'Severnaya vishnya.'* March 3-4, 2015. Chelyabinsk, Russia: Chelyabinskiy Dom pechati, 2015:134-138. (In Russ.)
10. Fesyutin I.A., Samoschenkov E.G., Bulanov A.E. Available antitranspirants for rooting herbaceous cuttings of red-leaved cherry plum. *AgroEcoInfo*. 2024;(6). (In Russ.) URL: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/6/st_644.pdf <https://doi.org/10.51419/202146644>
11. Samoshchenkov E.A., Zhuchkov A.N., Bulanov A.E. Features of winter grafting of cherries and cherries on rooted cuttings of clonal rootstock VSL-2. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2020;63:184-192. (In Russ.) <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2020-63-184-192>
12. Fesyutin I.A., Samoschenkov E.G., Bulanov A.E. Use of water-soluble fertilizers to improve the quality of rooted cuttings of clonal rootstock for cherries and cherries VSL 2. *AgroEcoInfo*. 2024;(6). (In Russ.) URL: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/6/st_644.pdf <https://doi.org/10.51419/202146645>
13. Tseplyaev A.N., Popova A.A., Pal'ceva A.V. The green cuttings propagation of ornamental shrubs various varieties method efficiency in the Voronezh Region conditions. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 'Lesovodstvenno-biologicheskie osnovy ustoychivosti prirodnikh i iskusstvennykh fitotsenozov'*. February 21, 2024. Voronezh, Russia: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov. 2024:249-254. (In Russ.) https://doi.org/10.58168/FBFSNAP2024_249-254

14. Dospekhov B.A. *Methodology of field experiments: (with the basics of statistical processing of research results)*: a textbook. 6th ed. Moscow, Russia: Alliance, 2011:350. (In Russ.)

15. Isachkin A.V., Kryuchkova V.A. *Fundamentals of scientific research in horticulture*: a textbook. Moscow, Russia: Publishing House Lan, 2019:420. (In Russ.)

16. Abdikayumov Z., Yulchieva D. Impact of green initial cuttings of vegetative-active grafting points of cherry on rooting and its period, rods, and growth controlling plant substance concentration. *E3S Web of Conferences*. 2021;284:03010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128403010>

17. Islamov S., Khalmirzaev D., Abdikayumov Z. Growing a low-growth clone planting material of cherry from green cuttings. *E3S Web of Conferences*. 2023;389:03064. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338903064>

18. Khalmirzaev D.K., Yenileev N.Sh., Abdikayumov Z.A. Development of the assimilation apparatus of cherries and sweet cherries grown on clonal rootstocks in connection with crown forms. *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch*. 2002;5(06):200-205. <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2020.5587>

19. Khalmirzaev D.K., Yenileev N.Sh., Abdikayumov Z.A. Photosynthetic productivity of cherry and sweet cherry leaves due to rootstock and artificial forms of tree crowns in the garden. *EPRA International Journal of Research & Development (IJRD)*. 2020;5(11):146-150. <https://doi.org/10.36713/epra5623>

Сведения об авторах

Егор Григорьевич Самощенко, канд. с.-х. наук, доцент кафедры плодородства, виноградарства и виноделия, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: samoshenkov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1554-1670>

Иван Андреевич Фесютин, аспирант кафедры плодородства, виноградарства и виноделия, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: plodvin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0001-8470-224X>

Александр Валерьевич Соловьев, канд. с.-х. наук, доцент, заведующий кафедрой плодородства, виноградарства и виноделия, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: a.solovlev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3186-9767>

Александр Евгеньевич Буланов, канд. с.-х. наук, старший преподаватель кафедры плодородства, виноградарства и виноделия, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: bulanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7253-662X>

Светлана Владимировна Акимова, д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры плодородства, виноградарства и виноделия, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный

аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: akimova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7267-1220>

Information about the authors

Egor G. Samoshenkov, CSc (Ag), Associate Professor at the Department of Pomiculture, Viticulture and Winemaking, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: samoshenkov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1554-1670>

Ivan A. Fesyutin, postgraduate student at the Department of Pomiculture, Viticulture and Winemaking, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: plodvin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0001-8470-224X>

Aleksandr V. Solovyov, CSc (Ag), Associate Professor, Head of the Department of Pomiculture, Viticulture and Winemaking, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: a.solovev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3186-9767>

Alexander E. Bulanov, CSc (Ag), Senior Lecturer at the Department of Pomiculture, Viticulture and Winemaking, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: bulanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7253-662X>

Svetlana V. Akimova, DSc (Ag), Associate Professor, Professor at the Department of Pomiculture, Viticulture and Winemaking, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: akimova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7267-1220>

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

**Технология протопластов и соматическая гибридизация
в семействе *Ariaceae***

Насим Алжарамани, Сократ Григорьевич Монахос[✉]

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: s.monakhos@rgau-msha.ru

Аннотация

Семейство Зонтичные (*Ariaceae*) занимает значительную часть рынка, на котором в настоящее время преобладают перекрестноопыляемые сорта. Это приводит к отсутствию выровненности и неоптимальному качеству, что побуждает к созданию F1-гибридов. Проблемы селекции, связанные с ручной кастрацией цветков, заставили селекционеров использовать биотехнологические подходы включая соматическую гибридизацию, которые используют признаки самонесовместимости и мужской стерильности. Технология протопластов и соматическая гибридизация стали ключевыми инструментами в генетическом улучшении и селекции культур семейства *Ariaceae* – таких, как морковь и сельдерей, которые имеют большое экономическое значение, но традиционно зависят от сортов открытого опыления. В статье рассматривается применение технологии слияния протопластов для получения соматических гибридов и цибридов, а также отбора *in vitro* по таким коммерчески ценным признакам, как ЦМС (цитоплазматическая мужская стерильность) и ГМС (генетическая мужская стерильность), которые имеют решающее значение для производства гибридных семян и интрогрессии признаков. Приводятся сведения о растительных материалах и тканях для выделения протопластов. Обычно в качестве источников используются молодые листья, гипокотиль или суспензионные культуры клеток благодаря их высокой жизнеспособности и регенеративному потенциалу, а также различные ферментные смеси, используемые для переваривания клеточных стенок и выделения жизнеспособных протопластов. Этот всеобъемлющий обзор служит ценным источником информации для исследователей и селекционеров, стремящихся использовать технологию слияния протопластов для генетического улучшения культур семейства *Ariaceae*, что в конечном итоге будет способствовать повышению продуктивности сельского хозяйства и качества урожая.

Ключевые слова

Биотехнология, селекция, морковь, сельдерей, цибриды, мужская стерильность, выделение и слияние протопластов

Благодарности

Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования

Алжарамани Н., Монахос С.Г. Технология протопластов и соматическая гибридизация в семействе *Ariaceae* // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 68–78.

Protoplast technology and somatic hybridization in the Apiaceae family

Naseem Aljaramany, Sokrat G. Monakhos✉

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉Corresponding author: s.monakhos@rgau-msha.ru

Abstract

The Apiaceae family holds a significant market share, currently dominated by open-pollinated varieties. This results in a lack of uniformity and suboptimal quality, necessitating the development of F1 hybrids. Breeding challenges associated with manual flower emasculation have compelled breeders to employ biotechnological approaches, including somatic hybridization, which leverage traits of self-incompatibility and male sterility. Protoplast technology and somatic hybridization have emerged as crucial instruments in the genetic improvement and breeding of *Apiaceae* crops, such as carrot and celery, which are of significant economic importance but traditionally rely on open-pollinated varieties. This article discusses the application of protoplast fusion technology for generating somatic hybrids and cybrids, as well as *in vitro* selection targeting commercially important traits such as cytoplasmic male sterility (CMS) and genetic male sterility (GMS), which are critical for hybrid seed production and trait introgression. Information is provided on plant materials and tissues suitable for protoplast isolation. Typically, young leaves, hypocotyls, or cell suspension cultures are utilized as sources owing to their high viability and regenerative potential, alongside various enzyme mixtures employed for cell wall digestion and the release of viable protoplasts. This comprehensive review serves as a valuable resource for researchers and breeders aiming to utilize protoplast fusion technology for the genetic improvement of *Apiaceae* crops, thereby ultimately contributing to enhanced agricultural productivity and crop quality.

Keywords

Biotechnology, breeding, carrot, celery, cybrids, male sterility, protoplast isolation and fusion

Aknowledgements

This research was funded by the University Development Program within the framework of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030”.

For citation

Aljaramany N., Monakhos S.G. Protoplast technology and somatic hybridization in the Apiaceae family. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 68–78.

Введение

Introduction

Маловероятно, что традиционные методы селекции растений смогут адекватно удовлетворить растущие потребности в продовольствии и решить различные экологические проблемы [1]. В результате этого в атмосферу выбрасываются вредные вещества, образующиеся в процессе производства, и повышается уровень загрязнения окружающей среды [2].

Ограниченный набор генов, доступных при половой гибридизации скрещиваемых видов растений, препятствует внедрению интересных генов или признаков.

В связи с этим многие культуры требуют длительного времени для выбора предпочтительного признака или гена в новом генотипе. Достижения в области клеточных манипуляций *in vitro* и технологий генной инженерии обеспечивают альтернативный подход к традиционным методам селекции растений и обеспечивают новые подходы к объединению генов, которые до сих пор не были доступны в естественных условиях [3].

Культуры, выращиваемые во всем мире и имеющие питательную ценность для человека, распространены в различных географических регионах и характеризуются разным уровнем продуктивности. Среди них доминирующее положение на коммерческих рынках занимают свободноперекрестноопыляющиеся сорта, принадлежащие семейству Зонтичные (*Apiaceae*), примером которых являются морковь (*Daucus carota*), корневой и черешковый сельдерей (*Apium graveolens* var. *dulce* и *Apium graveolens* var. *rapaceum*, соответственно). Такие сорта, несмотря на свою продуктивность, часто не отличаются однородностью и стабильностью урожая в различных климатических условиях [4, 5].

Данные проблемы могут быть решены с помощью создания и выращивания F1-гибридов, для чего наличие высококачественных мужских стерильных линий имеет первостепенное значение. В настоящее время получение вышеупомянутых линий представляет собой сложную задачу в гибридной селекции культур семейства *Apiaceae* [6].

Существует необходимость преодоления ограничений традиционной селекции и использования биотехнологий (соматическая гибридизация, технологии *in vitro*) для получения эффективных гибридных линий с улучшенными агрономическими характеристиками, что способствует ускорению селекционного процесса и улучшению сельскохозяйственных показателей культур *Apiaceae*. Необходимы разработка и совершенствование технологии выделения и слияния протопластов для создания соматических гибридов и цибридов в семействе *Apiaceae*, направленных на расширение генетического разнообразия и интрогрессию коммерчески значимых признаков – таких, как цитоплазматическая мужская стерильность, с целью повышения продуктивности, стабильности урожая и качества гибридных семян культур семейства *Apiaceae*.

Цель исследований: аналитический обзор существующей ситуации в области разработки технологий выделения и слияния протопластов для создания соматических гибридов и цибридов в семействе *Apiaceae*, направленных на расширение генетического разнообразия и интрогрессию коммерчески значимых признаков.

Методика исследований

Research method

В обзоре проанализированы зарубежные и отечественные научные источники, в которых рассматриваются ЦМС- и ЯМС-формы мужской стерильности, гены-кандидаты, вовлеченные в этот процесс, и получение мужских стерильных генотипов с помощью методов соматической гибридизации. Кроме того, обсуждаются исследования, рассматривающие предварительную обработку растений-доноров, различные источники тканей, используемые для выделения родительских протопластов в семействе *Apiaceae*, и методы получения соматических гибридов и цибридов с их последующим культивированием.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Значение мужской стерильности в области селекции растений. Мужская стерильность у *Apiaceae*, включая морковь, сельдерей и кориандр, контролируется либо генетическими, когда только гены ядерного генома определяют ЯМС,

либо цитоплазматическими механизмами, когда митохондриальные гены, прямо или косвенно влияющие на функции ядерных генов, отвечают за ЦМС. Эта мужская стерильность используется в селекции для облегчения производства гибридных семян без ручной кастрации, которая затруднена ввиду небольшого размера цветков и склонности к самоопылению. Гены только ядерного генома определяют ЯМС [7].

Цитоплазматическая мужская стерильность (ЦМС). ЦМС, наследуемая по материнской линии, является более предпочтительным типом МС, поскольку позволяет лучше контролировать производство гибридных семян [8]. Эта технология находит все более широкое применение в различных сельскохозяйственных культурах, включая основные зерновые, овощные, бобовые, масличные, а также технические и декоративные культуры, с особым акцентом на различных представителях семейства *Apiaceae*, рассматриваемых в данных исследованиях.

Иранский образец P12295260 семейства *Apiaceae* является первой мужской стерильной линией сельдерея, о которой сообщили Quiros et al. в 1986 г. [9]. В двух последующих публикациях за 2006 г. Gao et al. впервые приписали ЦМС одиночному рецессивному гену ms-1 [10]. Однако в 2009 г. они пришли к выводу о том, что на самом деле два рецессивных ядерных гена в сочетании с фактором стерильности в цитоплазме контролируют мужскую стерильность [11]. В недавних исследованиях сравнительный анализ митохондриального генома китайского сельдерея «tanzhixi-angqin» между линией ЦМС и ее закрепителем стерильности позволил выявить 21 уникальный регион с 15 ORF в линии ЦМС. В ORF768a был обнаружен только один химерный ген, который имел последовательность гена *cox1* длиной 1497 п.н. и неизвестную последовательность длиной 810 п.н. Вероятно, ORF768a кодирует 11 трансмембранных доменов белка, что заставило группу исследователей Cheng et al. в 2021 г. указать, что ORF768a может быть хорошим геном-кандидатом, предопределяющим цитоплазматическую мужскую стерильность у сельдерея [12].

К сожалению, количество стабильных мужских стерильных линий у видов семейства *Apiaceae* остается ограниченным, и ни одна из них в настоящее время не используется для коммерческого массового производства семян. Однако потребность в единообразии роста подтверждается растущим числом F1-гибридов, доступных на рынке, несмотря на отсутствие эффективной системы ЦМС.

Технология протопластов в семействе Apiaceae. По сравнению с половым размножением соматическая гибридизация имеет множество преимуществ для передачи или создания ЦМС *de novo*, в частности, потому, что она позволяет избежать нежелательных/неконтролируемых признаков, возникающих в результате одновременной передачи генов, отличных от тех, которые отвечают за ЦМС. Однако для успешного использования соматической гибридизации в данном случае существует ряд условий. К ним относят эффективное и надежное выделение большего количества высокожизнеспособных протопластов обоих компонентов, а также создание воспроизводимых стратегий для повышения частоты регенерации растений из культивируемых протопластов, где задействован по меньшей мере один из предполагаемых компонентов слияния.

Изоляция протопластов из различных тканей у видов Apiaceae. К настоящему времени в семействе *Apiaceae* были получены данные о выделении протопластов у *Daucus carota* (морковь), *Apium graveolens* (сельдерей), *Coriandrum sativum* (кориандр), *Foeniculum vulgare* (фенхель) и *Petroselinum hortense* (петрушка) [13]. Выделение протопластов было успешно проведено из различных тканей растений семейства *Apiaceae* – таких, как сельдерей и морковь, которые являются обычными модельными видами в этом семействе. Например, была создана эффективная система для выделения и трансформации протопластов сельдерея из листьев. Протопласты моркови также были выделены из суспензионных культур клеток для исследований субклеточной локализации белков [14].

До сих пор использовали различные смеси ферментов, а также комбинации концентраций для получения лучшего выхода протопластов (табл.). В случае моркови протопласты, полученные из листьев, дают примерно в три раза больший урожай, чем протопласты, полученные из гипокотилей [15]. В этом отношении большинство авторов предпочитали использовать в качестве источника протопластов суспензии клеток, а не дифференцированные ткани, как в случае с листьями или гипокотильями сельдерея [16]. Интересен тот факт, что у моркови эффективность деления протопластов гипокотилей при измерении количества колоний, происходящих из отдельных клеток, была в два раза выше, чем у протопластов листьев, в то время как обычно используемые протопласты, полученные из суспензионных культур, демонстрировали эффективность деления ниже, чем у этих двух источников дифференцированных тканей [15].

Таблица

Ключевые различия в технологиях выделения протопластов растений семейства *Apiaceae*

Table

Key differences in protoplast isolation technologies for plants of the *Apiaceae* family

Вид растения	Источник ткани	Ферментная смесь и условия	Выход и жизнеспособность	Ссылки
Морковь (<i>Daucus carota</i>)	Листья и гипокотиль	1% целлюлазы Onozuka R10, 0,1% пектолиазы Y-23, 0,6 М маннитола, 5 мМ CaCl ₂ , 20 мМ MES, 14–18 ч, 30 rpm, 26 °C	листья: 3,21 × 10 ⁶ g/fw, 74% жизнеспособность; гипокотиль: 0,96 × 10 ⁶ g/fw	[15]
	Листья	1% целлюлазы Onozuka R10, 0,1% пектолиазы Y-23, 0,6 М маннитола, 5 мМ CaCl ₂ , 10 мМ MES, 14–16 ч, темнота, 30 rpm, 26 °C	Не указано	[17]
	Листья	1% целлюлазы Onozuka R10, 0,1% пектолиазы Y-23, 0,6 М маннитола, 5 мМ CaCl ₂ , 20 мМ MES, 12–16 ч, темнота, 30 rpm, 26 °C	2,8 × 10 ⁶ g/fw, 72–93% жизнеспособность	[18]
	Листья	2% целлюлазы Onozuka R10, 0,1% пектолиазы Y-23 и 1% мацерозима R-10, 0,6 М маннитола, 10 мМ CaCl ₂ , 10 мМ MES, 0,8% бычьего сывороточного альбумина, 15 ч, темнота, 30 rpm, 26 °C	Не указано	[19]
Кориандр (<i>Coriandrum sativum</i> vars.)	Суспензия эмбриогенных клеток	2% целлюлазы Onozuka R10, 1% пектиназы и 0,2% мацерозима R-10, 0,6 М маннитола, 5 мМ CaCl ₂ , 14–18 ч, темнота, 50 rpm	4,81 × 10 ⁶ g/fw, 90–93, 8% жизнеспособность	[20]

Соматическая гибридизация в семействе Ariaceae. Как правило, желаемое слияние протопластов может быть осуществлено либо химическим, либо электрическим способами. Химические фузогены обычно используются для вызывания слияния протопластов, поскольку спонтанное слияние происходит редко ввиду заряженной поверхности протопластов. Для семейства *Ariaceae* типичные химические фузогены включают в себя: Полиэтиленгликоль (ПЭГ) с различной молекулярной массой (например, ПЭГ 1540, 4000, 6000) в концентрации от 5 до 56%; декстран в концентрации около 15%; диметилсульфоксид (ДМСО) в концентрации около 10%; глицин и осмотические стабилизаторы – такие, как маннит или сорбит. Эти агенты способствуют слиянию путем уменьшения отрицательного заряда на поверхности протопластов или путем содействия адгезии через электростатические силы, что приводит к плотной агглютинации и последующему слиянию протопластов [21–23].

Среди других доступных стратегий экспериментального индуцирования ЦМС применяется слияние протопластов двух соматических родителей. У таких гибридов наследование хлоропластной ДНК, как правило, унипарентальное, то есть после деления клеток передается только хлоропластный геном одного из родителей [24]. Одна из ключевых особенностей, которая делает цибриды привлекательными для программ селекции, – сохранение целостности сорта, поскольку весь ядерный геном происходит от одного родителя. Это означает, что ядерный генетический материал остается неизменным, в то время как цитоплазматический (митохондриальный) геном происходит из другого источника – как правило, от донора яйцеклетки. Это позволяет селекционерам сочетать желаемые цитоплазматические признаки (например, устойчивость к болезням или другие характеристики, кодируемые органеллами) без изменения ядерного генома, определяющего сорт. Селекционеры крайне заинтересованы в эффективном, экономичном и быстром получении генетически однородных растений [25]. Примечательно, что цибриды часто бывают мужски-стерильными и позволяют идентифицировать и отбирать интересующие соматические гибридные линии [15]. В целом симметричное слияние максимизирует ядерное генетическое разнообразие, объединяя полные ядерные геномы, в то время как асимметричное слияние в первую очередь повышает цитоплазматическое генетическое разнообразие, смешивая органеллярные геномы с одним ядерным геномом. Оба подхода способствуют созданию новых генетических комбинаций, которые могут быть использованы для улучшения сельскохозяйственных культур, особенно для преодоления половой несовместимости и введения желательных цитоплазматических признаков [26].

Таким образом, цибрид – это тип асимметричного соматического гибрида, в котором ядерный геном происходит от одного родителя, а цитоплазматические геномы наследуются от обоих родителей.

Выводы

Conclusions

Рост численности населения остается вызовом современности ввиду повышения спроса на продукты питания, что приводит к одновременной необходимости роста объемов производства и урожайности в сочетании с высоким качеством продукции [27, 28]. Семейство *Ariaceae* вносит значительный вклад в рацион питания человека, что в свою очередь сигнализирует о потребности общества в увеличении производства продукции, принадлежащей данному семейству. Использование протопластов для соматической гибридизации получает все большее

распространение благодаря коммерчески важным признакам, которые регулируются митохондриями и пластидами. Линии ЦМС способны обеспечить однородность, качество и урожайность при производстве гибридных семян. Кроме того, соматические гибриды представителей семейства *Apiaceae* обладают такими агрономически и экономически значимыми характеристиками, как высокая питательная ценность и устойчивость к болезням, в связи с чем расширяются возможности их применения.

Для слияния протопластов необходимы хорошо отлаженные процедуры выделения, предварительной обработки и регенерации из различных источников тканей. Однако на данный момент слияние протопластов часто остается сложным методом для получения гибридов по причине малой доступности установок для ядерного облучения включая гамма-лучи и рентгеновское излучение. В качестве альтернативы используется более доступное ультрафиолетовое излучение. Кроме того, данный метод требует повышения эффективности химического и электрического способов слияния протопластов. На сегодняшний день в ряде исследований сообщается о соматической гибридизации в семействе *Apiaceae*, однако передача признака и его коммерциализация до сих пор остаются сложной задачей.

Список источников

1. Gao C. The future of CRISPR technologies in agriculture. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2018;19:275-276. <https://doi.org/10.1038/nrm.2018.2>
2. Монахос С.Г., Воронина А.В., Байдина А.В., Зубко О.Н. Селекция растений на устойчивость – основа защиты от болезней в органическом земледелии // *Картофель и овощи*. 2019. № 6. С. 38–40. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.92.83.009>
3. Gantai S., Mukherjee E., Jogam P., Babu K.H. et al. Improving crops through transgenic breeding – technological advances and prospects. *Advances in Plant Tissue Culture. Current Developments and Future Trends*. 2022;1:295-324. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90795-8.00011-4>
4. Godwin A., Pieralli S., Sofkova-Bobcheva S., McGill C. Natural genetic adaptation allows flexible reproductive behaviour: the case of wild carrot (*Daucus carota* L. subsp. *carota*) vs cultivated carrot (*Daucus carota* L. subsp. *sativus*). *Crop & Pasture Science*. 2025;76: CP24320. <https://doi.org/10.1071/CP24320>
5. Loarca J., Liou M., Dawson J.C., Simon P.W. Advancing utilization of diverse global carrot (*Daucus carota* L.) germplasm with flowering habit trait ontology. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1342513. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1342513>
6. Anisimova I.N., Gavrilenko T.A. Cytoplasmic male sterility and its use in hybrid breeding of crops. *Genetics*. 2020;56(11):1239-1249. <https://doi.org/10.18619/2658-4832-2020-1-10-22>
7. Wang X., Luo Q., Li T., Meng P. et al. Origin, evolution, breeding, and omics of *Apiaceae*: a family of vegetables and medicinal plants. *Horticulture Research*. 2022;9: uhac076. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac076>
8. Алижанова Р.Р., Монахос С.Г., Монахос Г.Ф. Молекулярные маркеры в селекции лука репчатого // *Картофель и овощи*. 2019. № 2. С. 32–35. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.28.2.007>
9. Quiros C.F., Rugama A., Dong Y.Y., Orton T.J. Cytological and genetical studies of a male sterile celery. *Euphytica*. 1986;3:867-875. <https://doi.org/10.1007/BF00028594>
10. Gu Z.-H. Discovery and botanical characters of celery male sterile material. *Tianjin Agricultural Sciences*. 2006;12:9-11

11. Gao G., Jin L., Lu F., Lu Z. et al. Genetic characters of 01-3A male sterile celery. *Journal of Changjiang Vegetables*. 2009;14:21-23.
12. Cheng Q., Wang P., Li T., Liu J. et al. Complete mitochondrial genome sequence and identification of a candidate gene responsible for cytoplasmic male sterility in celery (*Apium graveolens* L.). *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(16):8584. <https://doi.org/10.3390/ijms22168584>
13. Bruznican S., Eeckhaut T., Huylenbroeck J., Keyser A.D. et al. An asymmetric protoplast fusion and screening method for generating celeriac cybrids. *Scientific Reports*. 2021;1:4543. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83970-y>
14. Simpson K., Stange C. Carrot protoplasts as a suitable method for protein subcellular localization. In: *Methods in Enzymology*. Wurtzel E.T. (Ed). 2022;671:273-283. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2022.03.006>
15. Ranaware A.S., Kunchge N.S., Lele S.S., Ochatt S.J. Protoplast technology and somatic hybridisation in the family *Apiaceae*. *Plants*. 2023;12(5):1060. <https://doi.org/10.3390/plants12051060>
16. Bruznican S., Eeckhaut T., Huylenbroeck J., Clercq D.H. et al. Regeneration of cell suspension derived *Apium graveolens* L. protoplasts. *Plant Cell Tissue Organ Cult*. 2017;1:163-174. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1273-9>
17. Grzebelus E., Skop L. Effect of beta-lactam antibiotics on plant regeneration in carrot protoplast cultures. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 2014;5:568-575. <https://doi.org/10.1007/s11627-014-9626-0>
18. Maćkowska K., Jarosz A., Grzebelus E. Plant regeneration from leaf-derived protoplasts within the *Daucus* genus: effect of different conditions in alginate embedding and phytosulfokine application. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2014;2:241-252. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0436-1>
19. Meyer C.M., Goldman I.L., Grzebelus E., Krysan P.J. Efficient production of transgene-free, gene-edited carrot plants via protoplast transformation. *Plant Cell Reports*. 2022;4:947-960. <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02830-9>
20. Ali M., Mujib A., Zafar N., Tonk D. Protoplast isolation and plant regeneration in two cultivated coriander varieties, Co-1 and RS. *Biotechnologia*. 2018;4:345-355. <https://doi.org/10.5114/bta.2018.79965>
21. Tan F., Shen H., Wang S., Jink Z. et al. Preliminary study of asymmetric protoplast fusion between celery (*Apium graveolens* L.) and CMS carrot (*Daucus carota* L.). *Acta Horticulturae*. 2009;8:1169-1176
22. Han L., Zhou C., Shi J., Zhi D. et al. Ginsenoside Rb1 in asymmetric somatic hybrid calli of *Daucus carota* with *Panax quinquefolius*. *Plant Cell Reports*. 2009;4:627-638. <https://doi.org/10.1007/s00299-009-0674-6>
23. Gieniec M., Siwek J., Oleszkiewicz T., Maćkowska K. et al. Real-time detection of somatic hybrid cells during electrofusion of carrot protoplasts with stably labelled mitochondria. *Scientific Reports*. 2020;10:18811. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75983-w>
24. Joo S., Kariyawasam T., Kim M., Jin E. et al. Sex-linked deubiquitinase establishes uniparental transmission of chloroplast DNA. *Nature Communications*. 2022;13:1133. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28807-6>
25. Flores-Tornero M., Sapeta H., Becker J.D. Improving the haploidization toolbox: maternal factors take the stage. *Molecular Plant*. 2023;16(4):651-653. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.02.008>
26. Begna T. Intergeneric somatic hybridization and its application to crop genetic improvement. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*. 2020;6:25-37. <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0606004>

27. Zubareva I.A., Vinogradova S.V., Gribova T.N., Monakhos S.G. et al. Genetic diversity of turnip mosaic virus and the mechanism of its transmission by brassica seeds. *Biochemistry and Biophysics*. 2013;1:119-122. <https://doi.org/10.1134/S1607672913030034>
28. Lu L., Lim Y.P., Monakhos S.G., Yi S.Y. Early defense mechanisms of Brassica oleracea in response to attack by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Plants*. 2021;10(12):2705. <https://doi.org/10.3390/plants10122705>

References

1. Gao C. The future of CRISPR technologies in agriculture. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2018;19:275-276. <https://doi.org/10.1038/nrm.2018.2>
2. Monakhos S.G., Voronina A.V., Baidina A.V., Zubko O.N. Plant breeding for disease resistance is a base of plant protection in organic farming. *Potato and Vegetables*. 2019;(6):38-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.92.83.009>
3. Gantai S., Mukherjee E., Jogam P., Babu K.H. et al. Improving crops through transgenic breeding – technological advances and prospects. *Advances in Plant Tissue Culture. Current Developments and Future Trends*. 2022;1:295-324. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90795-8.00011-4>
4. Godwin A., Pieralli S., Sofkova-Bobcheva S., McGill C. Natural genetic adaptation allows flexible reproductive behaviour: the case of wild carrot (*Daucus carota* L. subsp. *carota*) vs cultivated carrot (*Daucus carota* L. subsp. *sativus*). *Crop & Pasture Science*. 2025;76: CP24320. <https://doi.org/10.1071/CP24320>
5. Loarca J., Liou M., Dawson J.C., Simon P.W. Advancing utilization of diverse global carrot (*Daucus carota* L.) germplasm with flowering habit trait ontology. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1342513. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1342513>
6. Anisimova I.N., Gavrilenko T.A. Cytoplasmic male sterility and its use in hybrid breeding of crops. *Genetics*. 2020;56(11):1239-1249. <https://doi.org/10.18619/2658-4832-2020-1-10-22>
7. Wang X., Luo Q., Li T., Meng P. et al. Origin, evolution, breeding, and omics of *Apiaceae*: a family of vegetables and medicinal plants. *Horticulture Research*. 2022;9: uhac076. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac076>
8. Alizhanova R.R., Monakhos S.G., Monakhos G.F. Molecular markers in onion breeding. *Potato and Vegetables*. 2019;(2):32-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.28.2.007>
9. Quiros C.F., Rugama A., Dong Y.Y., Orton T.J. Cytological and genetical studies of a male sterile celery. *Euphytica*. 1986;3:867-875. <https://doi.org/10.1007/BF00028594>
10. Gu Z.-H. Discovery and botanical characters of celery male sterile material. *Tianjin Agricultural Sciences*. 2006;12:9-11.
11. Gao G., Jin L., Lu F., Lu Z. et al. Genetic characters of 01-3A male sterile celery. *Journal of Changjiang Vegetables*. 2009;14:21-23.
12. Cheng Q., Wang P., Li T., Liu J. et al. Complete mitochondrial genome sequence and identification of a candidate gene responsible for cytoplasmic male sterility in celery (*Apium graveolens* L.). *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(16):8584. <https://doi.org/10.3390/ijms22168584>
13. Bruznican S., Eeckhaut T., Huylenbroeck J., Keyser A.D. et al. An asymmetric protoplast fusion and screening method for generating celeriac cybrids. *Scientific Reports*. 2021;11:4543. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83970-y>
14. Simpson K., Stange C. Carrot protoplasts as a suitable method for protein subcellular localization. In: *Methods in Enzymology*. Wurtzel E.T. (Ed). 2022;671:273-283. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2022.03.006>

15. Ranaware A.S., Kunchge N.S., Lele S.S., Ochatt S.J. Protoplast technology and somatic hybridisation in the family *Apiaceae*. *Plants*. 2023;12(5):1060. <https://doi.org/10.3390/plants12051060>
16. Bruznican S., Eeckhaut T., Huylenbroeck J., Clercq D.H. et al. Regeneration of cell suspension derived *Apium graveolens* L. protoplasts. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 2017;1:163-174. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1273-9>
17. Grzebelus E., Skop L. Effect of beta-lactam antibiotics on plant regeneration in carrot protoplast cultures. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant.* 2014;5:568-575. <https://doi.org/10.1007/s11627-014-9626-0>
18. Maćkowska K., Jarosz A., Grzebelus E. Plant regeneration from leaf-derived protoplasts within the *Daucus* genus: effect of different conditions in alginate embedding and phytosulfokine application. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2014;2:241-252. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0436-1>
19. Meyer C.M., Goldman I.L., Grzebelus E., Krysan P.J. Efficient production of transgene-free, gene-edited carrot plants via protoplast transformation. *Plant Cell Reports*. 2022;4:947-960. <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02830-9>
20. Ali M., Mujib A., Zafar N., Tonk D. Protoplast isolation and plant regeneration in two cultivated coriander varieties, Co-1 and RS. *Biotechnologia*. 2018;4:345-355. <https://doi.org/10.5114/bta.2018.79965>
21. Tan F., Shen H., Wang S., Jink Z. et al. Preliminary study of asymmetric protoplast fusion between celery (*Apium graveolens* L.) and CMS carrot (*Daucus carota* L.). *Acta Horticulturae*. 2009;8:1169-1176.
22. Han L., Zhou C., Shi J., Zhi D. et al. Ginsenoside Rb1 in asymmetric somatic hybrid calli of *Daucus carota* with *Panax quinquefolius*. *Plant Cell Reports*. 2009;4:627-638. <https://doi.org/10.1007/s00299-009-0674-6>
23. Gieniec M., Siwek J., Oleszkiewicz T., Maćkowska K. et al. Real-time detection of somatic hybrid cells during electrofusion of carrot protoplasts with stably labelled mitochondria. *Scientific Reports*. 2020;10:18811. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75983-w>
24. Joo S., Kariyawasam T., Kim M., Jin E. et al. Sex-linked deubiquitinase establishes uniparental transmission of chloroplast DNA. *Nature Communications*. 2022;13:1133. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28807-6>
25. Flores-Tornero M., Sapeta H., Becker J.D. Improving the haploidization toolbox: maternal factors take the stage. *Molecular Plant*. 2023;16(4):651-653. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.02.008>
26. Begna T. Intergeneric somatic hybridization and its application to crop genetic improvement. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*. 2020;6:25-37. <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0606004>
27. Zubareva I.A., Vinogradova S.V., Gribova T.N., Monakhos S.G. et al. Genetic diversity of turnip mosaic virus and the mechanism of its transmission by brassica seeds. *Biochemistry and Biophysics*. 2013;1:119-122. <https://doi.org/10.1134/S1607672913030034>
- Lu L., Lim Y.P., Monakhos S.G., Yi S.Y. Early defense mechanisms of Brassica oleracea in response to attack by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Plants*. 2021;10(12):2705. <https://doi.org/10.3390/plants10122705>

Сведения об авторах

Насим Алжарамани, аспирант кафедры молекулярной селекции, клеточных технологий и семеноводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский

государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: naseemjihadja@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-0407-3459>

Сократ Григорьевич Монахос, д-р с.-х. наук, профессор, заведующий кафедрой молекулярной селекции, клеточных технологий и семеноводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: s.monakhos@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9404-8862>

Information about the authors

Naseem Aljaramany, post-graduate student of the Department of Molecular Breeding, Cell Technologies and Seed Production, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: naseemjihadja@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-0407-3459>

Sokrat G. Monakhos, DSc (Ag), Professor, Head of the Department of Molecular Breeding, Cell Technologies and Seed Production, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: s.monakhos@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9404-8862>

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

**Эффективность применения биологических фунгицидов
против корневой гнили ячменя озимого на юге России**

**Галина Владимировна Волкова, Яна Викторовна Яхник[✉],
Александр Дмитриевич Кустадинчев**

Федеральный научный центр биологической защиты растений,
г. Краснодар, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: yahnik1@mail.ru

Аннотация

Цель исследований – изучить эффективность биологических фунгицидов против возбудителей корневых гнилей озимого ячменя для дальнейшего их практического применения в экологизированных технологиях защиты Краснодарского края. Опыты выполняли на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» в условиях полевого инфекционного питомника в 2023–2025 гг. Объект исследований – возбудители корневых гнилей ячменя озимого фузариозной и гельминтоспориозной этиологии. Для исследований отобраны препараты, содержащие различные агенты биологического происхождения, и их метаболиты (Геостим Фит, А, Ж 2 л/т; Алирин Б, Ж, 2 л/га; Псевдобактерин-2, Ж, 1 л/га; Стернифаг, СП, 80 г/т; Трихоцин, СП, 20 г/т; опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Bacillus velezensis* BZR336 g, Ж, 3 л/т; опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж, 3 л/т; Оргамика Ф, Ж, 0,7 л/т; Скарлет, МЭ, 0,4 л/т (химический эталон)). Максимальная эффективность против заражения семян фузариозной инфекцией выявлена после обработки препаратами Трихоцин, СП (94,5%), Геостим Фит, А, Ж (92,4%), Алирин-Б, Ж (92,3%) и Оргамика Ф, Ж (91,1%). Лабораторная и полевая всхожесть определена как максимальная после обработки семян препаратами на основе: *Trichoderma asperellum* – 96% (Оргамика Ф, Ж); *Bacillus velezensis* – 95% (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Bacillus velezensis* BZR336 g, Ж); *Pseudomonas chlororaphis* – 95% (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж). Наибольшие показатели густоты стояния выявлены на опытных делянках с препаратами Алирин-Б, Ж, Геостим Фит, А, Ж (по 488 раст/м²), Стернифаг, СП (по 485 раст/м²), Псевдобактерин-2, Ж и эталоном Скарлет, МЭ (по 484 раст/м²). Определены высокие показатели эффективности против корневых и прикорневых гнилей препаратов на основе *Bacillus subtilis* Алирин-Б, Ж (68,3%), на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж (65,2%) и *Trichoderma harzianum* Стернифаг, СП (60,3%). Исследования эффективности биологических препаратов для защиты ячменя от корневых гнилей крайне важны для практического применения в агропромышленном комплексе региона и страны.

Ключевые слова

Озимый ячмень, биологические фунгициды, корневые гнили, экологизация земледелия

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № Н-24.1/43.

Для цитирования

Волкова Г.В., Яхник Я.В., Кустадинчев А.Д. Эффективность применения биологических фунгицидов против корневой гнили ячменя озимого на юге России // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 79–91.

AGRONOMY, CROP PRODUCTION, PLANT PROTECTION

Efficacy of biological fungicides against winter barley root rot in the south of Russia

Galina V. Volkova, Yana V. Yakhnik✉, Aleksandr D. Kustadinchev

Federal Scientific Center for Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

✉Corresponding author: yahniki@mail.ru

Abstract

The aim of this research was to evaluate the efficacy of biological fungicides against winter barley root rot pathogens for their subsequent practical application in ecological protection technologies within the Krasnodar Territory. The experiments were conducted at the Federal Scientific Center for Biological Plant Protection (FRCBPP) under field infection nursery conditions during 2023–2025. The object of study comprised winter barley root rot pathogens of *Fusarium* and *Helminthosporium* etiology. Selected for the study were preparations containing various agents of biological origin and their metabolites: Geostim Fit, A, L (2 l/t); Alirin B, L (2 l/ha); Pseudobacterin-2, L (1 l/ha); Sterniphag, WP (80 g/t); Trichocin, WP (20 g/t); an experimental sample from the FRCBPP based on *Bacillus velezensis* BZR336 g, L (3 l/t); an experimental sample from the FRCBPP based on *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, L (3 l/t); Organica F, L (0.7 l/t); and Scarlet, ME (0.4 l/t) (chemical standard). The maximum efficacy against *Fusarium* seed infection was observed after treatment with Trichocin, WP (94.5%), Geostim Fit, A, L (92.4%), Alirin-B, L (92.3%), and Organica F, L (91.1%). Laboratory and field germination rates were highest after seed treatment with preparations based on *Trichoderma asperellum* – 96% (Organica F, L), *Bacillus velezensis* – 95% (experimental sample from the FRCBPP based on *Bacillus velezensis* BZR336 g, L), and *Pseudomonas chlororaphis* – 95% (experimental sample from the FRCBPP based on *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, L). The highest plant stand densities were recorded on experimental plots treated with Alirin-B, L, Geostim Fit, A, L (488 plants/m²), Sterniphag, WP (485 plants/m²), Pseudobacterin-2, L, and the Scarlet, ME standard (484 plants/m²). High efficacy rates against root and radical rots were determined for preparations based on *Bacillus subtilis* Alirin-B, L (68.3%), *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, L (65.2%), and *Trichoderma harzianum* Sterniphag, WP (60.3%). Research into the efficacy of biological preparations for protecting barley from root rot is crucial for practical application within the agro-industrial sector of both the region and the country.

Keywords

Winter barley, biological fungicides, root rot, ecologization of agriculture

Acknowledgments

This research was funded by the Kuban Scientific Foundation within the framework of scientific project No. H-24.1/43.

For citation

Volkova G.V., Yakhnik Y.V., Kustadinchev A.D. Efficacy of biological fungicides against winter barley root rot in the south of Russia. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 79–91.

Введение Introduction

Проблема корневых гнилей зерновых культур является актуальной по всему миру. Несмотря на то, что проявление болезни внешне является малозаметным, корневые гнили не только приводят к прямым потерям до 30% урожая, но и косвенно способствуют развитию болезней вследствие ингибирования нормальных физиологических процессов и снижения иммунитета растения-хозяина [1, 2]. Корневые гнили – это болезнь комплексной этиологии, возбудителями которой являются грибы родов *Fusarium*, *Gaeumannomyces*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Microdochium*, *Alternaria*, а также гриб *Bipolaris sorokiniana* [3, 4]. На юге России наиболее распространенными и вредоносными являются корневые гнили фузариозно-гельминтоспориозной этиологии [1]. Видовой состав грибов рода *Fusarium* и соотношение с грибами *Bipolaris sorokiniana* постоянно меняются в зависимости от климатических условий сезона, возделываемых в севообороте культур, способов обработки почвы и примененных в агроценозе фунгицидов, но находятся в динамическом равновесии в качестве доминантов. Ситуация осложняется накоплением инфекции в почве и дестабилизацией фитосанитарной ситуации агроценоза в севообороте вследствие широкой специализации фитопатогенных грибов [5] (рис. 1).

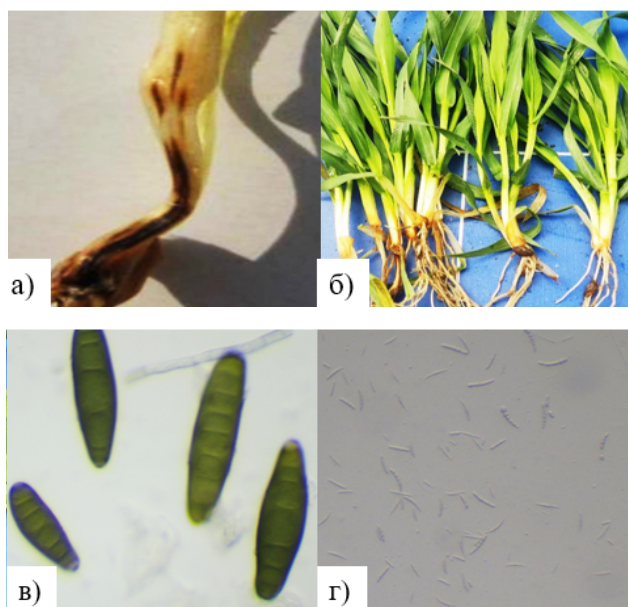


Рис. 1. Идентификация корневых гнилей различной этиологии:
а, б) корневые и прикорневые гнили на озимом ячмене;
в) возбудитель корневой гнили гельминтоспориозной этиологии
(гриб *Bipolaris sorokiniana*) (увеличение $\times 400$);
г) возбудитель фузариозной корневой гнили (грибы рода *Fusarium*)
(увеличение $\times 400$), ФГБНУ ФНЦБЗР, 2024–2025 гг. (ориг.)

Figure 1. Identification of root rot of various etiologies:
а, b) root and radical rot on winter barley;
c) pathogen of Helminthosporiosis root rot (*Bipolaris sorokiniana*)
(magnification $\times 400$);
d) pathogen of Fusarium root rot (*Fusarium* spp.) (magnification $\times 400$),
FRCBPP, 2024–2025 (orig.)

Современная интегрированная защита озимого ячменя от корневых гнилей включает в себя применение различных фитосанитарных мероприятий: возделывание устойчивых сортов, агротехнологические методы, протравливание семян, обработка почвы и посевов фунгицидами. Но микроэволюционные процессы изменили и структуру популяций фитопатогенов, так как новые условия с повышенной пестицидной нагрузкой спровоцировали высокую частоту мутаций, выявив и закрепив новые, а также наиболее приспособленные штаммы и расы, ставшие новыми источниками эпифитотий [6].

Принципиально новым и крайне перспективным подходом является применение фунгицидов на основе живых бактерий, грибов, а также их метаболитов (биологических препаратов). Внедрение биопрепаратов в современные схемы защиты растений является наукоемким процессом, требующим сопровождения работ высококвалифицированными специалистами [7]. В широком производстве внедрение ограничено такими факторами, как более низкая эффективность (в сравнении с химическими фунгицидами), более короткий период защитного действия, узкая специализация и прямая зависимость от погодных условий [3]. В связи с ужесточением правил использования химических средств защиты растений в последние годы применение биопрепаратов широко изучается ввиду потенциальных преимуществ, поэтому коммерческие компании активно расширяют спектр биологических агентов и способы их эффективного применения в схемах защиты производственных посевов зерновых культур. Помимо экологического контроля (токсическая нагрузка на агроценозы, потеря чувствительности патогенов к основному ассортименту фунгицидов, прямое фунгицидное действие), биопрепараты используются в качестве индукторов болезнеустойчивости, индуцируя системную устойчивость, улучшая усвоение питательных веществ, стимулируя рост и стрессоустойчивость, тем самым предоставляя растению эволюционное преимущество [7].

Бактерии рода *Bacillus* стимулируют рост растений и уменьшают заболевания фитопатогенными грибами, что в основном связано с профилями их вторичных метаболитов [8]. Различными антимикробными свойствами обладает группа вторичных метаболитов – нерибосомально синтезированных липопептидов, обладающих антибактериальными и/или антифунгальными свойствами, вызывающими лизис клеток, образование пор в мембранах грибов, ингибирование определенных ферментов или синтез бактериальных белков. Также бактерии рода *Bacillus* производят различные изоформы липопептидов, принадлежащие семействам сурфактинов, фенгицинов и итуринов. При субингибиторных концентрациях вторичные метаболиты проявляются как сигнальные молекулы в локальных ценозах, которые влияют на клеточную дифференциацию и поглощение питательных веществ, что приводит к уменьшению перекрытия ниш конкурирующих организмов [9].

Несбалансированное использование фунгицидов, помимо токсического эффекта на экосистему, привело к росту площадей деградированных, кондуктивных и фитотоксичных почв, потере биоразнообразия, что в комплексе повлияло на заселение агроценозов возбудителями корневых гнилей [10]. Микопаразитизм – один из наиболее эффективных способов снижения почвенной инфекционной нагрузки. Возникновение индуцированной системной резистентности растений после колонизации корней грибами *Trichoderma* spp. впервые было выявлено и описано в 1997 г. С тех пор данные грибы широко используются в качестве эффективных агентов биологического контроля против почвенных фитопатогенов [11]. Грибы рода *Trichoderma* продуцируют вторичные метаболиты (хитиназы, β -глюканызы, протеазы), которые не только выполняют функции антагонизма (антибиоз и микопаразитизм), но и взаимодействуют с растениями как индукторы болезнеустойчивости.

Высокая способность контроля почвенных патогенных грибов с помощью таких механизмов, как конкуренция за питательные вещества и ниши, ингибирование

прорастания спор и роста мицелия, выработка ингибирующих метаболитов, выявлена при применении препаратов на основе бактерий рода *Pseudomonas*. При взаимодействии с грибами происходит нарушение целостности клеточной мембраны (приводит к утечке клеточного содержимого патогена), ингибирование биосинтеза эргостерола, увеличение содержания малонового диальдегида, а также ингибирование активности АТФазы, малатдегидрогеназы и сукцинатдегидрогеназы, что влияет на энергетический метаболизм и вызывает накопление активных форм кислорода [12]. Также бактерии рода *Pseudomonas* способны растворять фосфор, высвобождать сидерофоры и производить индолилуксусную кислоту, которая является регулятором роста растений [13].

Оздоровление почв агроценозов, повышение и стабилизация супрессивности путем увеличения биоразнообразия являются одними из основных факторов элиминирования почвенных фитопатогенов, вызывающих возникновение корневых гнилей [10]. Применение биопрепаратов на основе наиболее распространенных агентов биологического происхождения и их метаболитов позволит снизить токсикологическую нагрузку на производственные посевы и предотвратит появление резистентности штаммов фитопатогенных грибов.

Цель исследований: изучить эффективность биологических фунгицидов против возбудителей корневых гнилей озимого ячменя для дальнейшего их практического применения в экологизированных технологиях защиты Краснодарского края.

Методика исследований

Research method

Исследования проводили на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) в условиях полевого стационара на естественном инфекционном фоне. В исследованиях использована материально-техническая база Уникальной научной установки (УНУ) «Технологическая линия для получения микробиологических средств защиты растений нового поколения» (<https://fncbzh.ru/brk-i-unu/unique-installation-2/>).

Климат региона исследований – умеренно-континентальный, при длинном вегетационном периоде – достаточное количество влаги и света. Почва – чернозем выщелоченный. Глубина гумусового горизонта составляет 80–150 мм. Содержание гумуса в пахотном 0–20 мм слое почвы составляет 3,39%, подвижного фосфора – 18,2 мг/100 мг почвы, подвижных соединений калия – 30,6 мг/100 мг, реакция почвы слабокислая (рН = 5,5...6,5). Обменная кислотность отсутствует, гидролитическая кислотность варьирует от 2 до 4 мг/100 мг почвы. Степень насыщения почвы основаниями составляет 85–95%.

Для исследований отобраны 4 российских коммерческих сорта озимого ячменя: Виват, Маруся (оригинатор ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»), Рубеж, Юрий (оригинатор ФГБНУ «Национальный центр зерна имени П.П. Лукьяненко») схожих фенотипов (срок созревания – среднеспелый; тип растения – многорядный) и направления использования (фураж) [14]. Согласно данным оригинаторов, отобранные сорта различаются по устойчивости к ржавчинным заболеваниям и пятнистостям листьев; информация об устойчивости сортов к корневым гнилям не выявлена.

В опыте использованы наиболее распространенные препараты, содержащие различные агенты биологического происхождения и продукты их метаболизма: Геостим Фит, А, Ж, 2 л/т (*Chaetomium globosum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium leguminosarum*, *Mesorhizobium ciceri*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus subtilis* и их метаболиты); Алирин Б, Ж, 2 л/га (*Bacillus subtilis*); Псевдобактерин-2, Ж, 1 л/га (*Pseudomonas aureofaciens*); Стернифаг, СП, 80 г/т (*Trichoderma*

harzianum); Трихоцин, СП, 20 г/т (*Trichoderma harzianum*); опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Bacillus velezensis* BZR336 g, Ж, 3 л/т; опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж, 3 л/т; Оргамика Ф, Ж, 0,7 л/т (*Trichoderma asperellum*); Скарлет, МЭ, 0,4 л/т (имазалил 100 г/л + тебуконазол 60 г/л, химический эталон) при норме рабочего раствора 10 л на 1 т. Также были высеяны контрольные варианты (обработка семян водой).

Сорта высевали на делянках площадью по 6 м² в трехкратной повторности. Предшественник – чистый пар. Фунгицидные обработки на опытных участках не проводились. Фитозэкспертизу семенного материала осуществляли согласно ГОСТ 12044–93, полевую всхожесть, густоту стояния, развитие корневых и прикорневых гнилей и биологическую эффективность препаратов определяли согласно общепринятым методам [15]. Показавшие наибольшую эффективность и разрешенные к применению на территории Российской Федерации препараты Геостим Фит, А, Ж, Алирин-Б, Ж, Трихоцин, СП, Скарлет, МЭ (эталон) были заложены в полевом опыте вегетационного сезона 2024–2025 гг.

Статистическое различие выборок оценивали с помощью критерия Фишера (при уровне значимости $\alpha = 0,05$). Степень корреляции определяли с помощью нелинейной регрессии по шкале Чеддока. Расчет производили с использованием программного обеспечения StatSoft Statistica v.13.3.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Фитозэкспертиза семян показала максимальную эффективность биопрепаратов на основе грибов рода *Trichoderma*, бактерий *Bacillus* spp., а также группы бактерий и их метаболитов (*Chaetomium globosum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium leguminosarum*, *Mesorhizobium ciceri*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus subtilis*) против заражения семян фузариозной инфекцией, так как наиболее высокие показатели выявлены при обработке семян препаратами Трихоцин, СП (94,5%), Геостим Фит, А, Ж (92,4%), Алирин-Б, Ж (92,3%) и Оргамика Ф, Ж (91,1%) (химический эталон Скарлет, МЭ полностью ингибировал развитие патогена) (рис. 2).

Подавление развития грибов рода *Fusarium* на семенах происходит не только прямым действием агентов биопрепаратов на гриб-паразит (антибиоз, паразитизм), но и индуцированно – синтезом вторичных метаболитов, которые подавляют развитие патогена, что подтверждается данными литературы [9, 11]. Аналогичная эффективность биологических агентов выявлена в подавлении развития на семенах патогенной микрофлоры различной этиологии (*Alternaria* spp., *Bipolaris sorokiniana* и др.). Наибольшие показатели эффективности выявлены при применении препаратов Геостим Фит, А, Ж (47,9%) и Алирин-Б, Ж (39,5%) при значении в эталонном варианте с химическим препаратом Скарлет, МЭ 54,6%. При проведении корреляционного анализа эффективности препаратов по сортам выявлена высокая и весьма высокая корреляция (в 2023 г. – $r = 0,92–0,95$; в 2024 г. – $r = 0,80–0,94$), из чего можно заключить, что основным фактором влияния на опытные варианты является действующее вещество в составе препаратов.

Выявлена максимальная лабораторная всхожесть при обработке семян препаратами на основе наиболее распространенных биологических агентов – таких, как *Trichoderma asperellum* – 96% (Оргамика Ф, Ж), *Bacillus velezensis* – 95% (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Bacillus velezensis* BZR336 g, Ж), *Pseudomonas chlororaphis* – 95% (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж) (рис. 3). Также высокие показатели (по 93%) были выявлены при обработке препаратами Геостим Фит, А, Ж, Алирин-Б, Ж, Стернифаг, СП при лабораторной

всхожести семян в эталонном варианте с применением препарата на химической основе Скарлет, МЭ 88%. Выявлена весьма высокая корреляция ($r = 0,99$) между лабораторной и полевой всхожестью семян, обработанных препаратами.

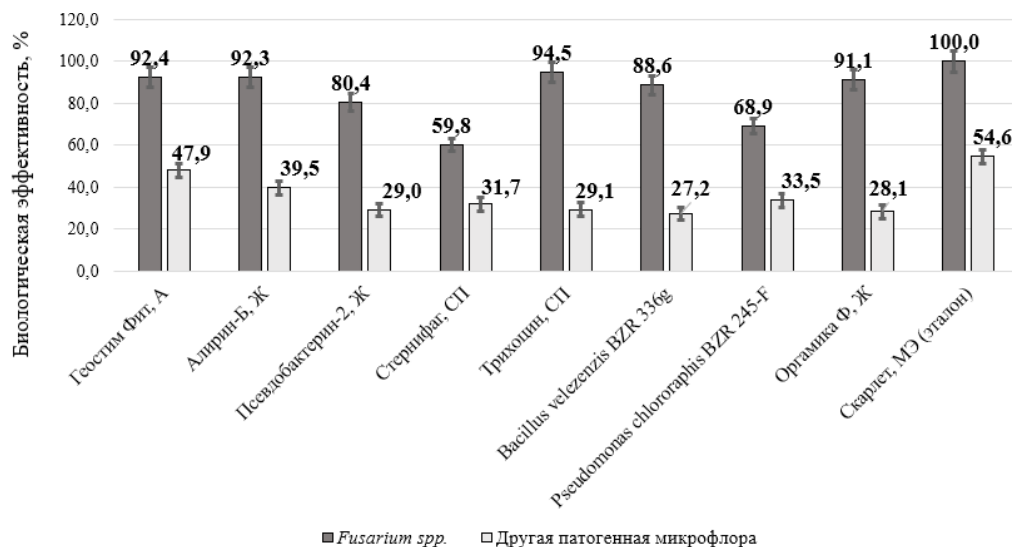


Рис. 2. Биологическая эффективность биологических препаратов против патогенной микрофлоры на семенах сортов Виват, Маруся, Рубеж, Юрий (*Fusarium spp.*, *Alternaria spp.*, *Bipolaris sorokiniana* и др.), ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023–2024 гг.

Figure 2. Biological efficacy of biological preparations against pathogenic microflora on seeds of cultivars Vivat, Marusya, Rubezh, Yuri (*Fusarium spp.*, *Alternaria spp.*, *Bipolaris sorokiniana*, etc.), FRCBPP, 2023–2024

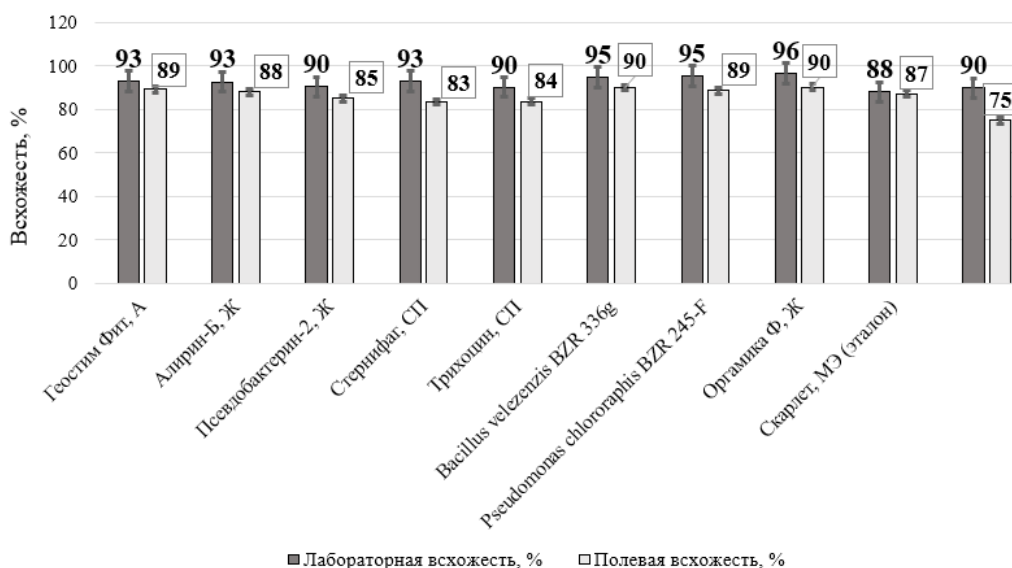


Рис. 3. Лабораторная и полевая всхожесть семян ячменя озимого, сортов Виват, Маруся, Рубеж, Юрий, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2023–2024 гг.

Figure 3. Laboratory and field germination of winter barley seeds, cultivars Vivat, Marusya, Rubezh, Yuri, FRCBPP, 2023–2024

Однофакторный дисперсионный анализ выявил достоверные различия между всеми опытными вариантами (при $\alpha = 0,05$): против грибов рода *Fusarium* $F_t 6,0 < F_f 26,8-93,4$; против других плесневых грибов $F_t 6,0 < F_f 16,3-153,6$ в 2023 г.; против грибов рода *Fusarium* $F_t 6,0 < F_f 39,3-112,0$; против других плесневых грибов $F_t 6,0 < F_f 16,3-153,6$ в 2024 г.

Наибольшие показатели густоты стояния были выявлены на опытных деланках с препаратами Алирин-Б, Ж, Геостим Фит, А, Ж (по 488 раст/м²), Стернифаг, СП (по 485 раст/м²), Псевдобактерин-2, Ж и эталоном Скарлет, МЭ (по 484 раст/м²). Все опытные варианты были статистически достоверно выше контроля ($F_t 4,6 < F_f 14,5-144,7$ в 2023–2024 гг.); в среднем густота стояния растений после обработок семян биопрепаратами выше контрольного варианта на 4,0% (при превышении контроля в эталоне на 4,3%).

Учет прикорневых и корневых гнилей различной этиологии (грибы рода *Fusarium*, *B. sorokiniana* и т.д.) выявил максимальную биологическую эффективность против болезни после применения химического эталона Скарлет, МЭ (табл. 1). Согласно данным литературы именно обширное и многократное применение химических фунгицидов со временем увеличивает долю токсиногенных видов в почвенных микоценозах, что опасно не только для растений ввиду подавления их роста и развития, но и для полезной микробиоты [2]. Применение препаратов на основе биологических агентов является потенциальным индуктором повышения супрессивности почв, что косвенно влияет на уменьшение развития корневых гнилей сельскохозяйственных культур.

Достаточно высокие показатели эффективности выявлены после применения препаратов на основе *Bacillus subtilis* (Алирин-Б, Ж) (68,3%), *Pseudomonas chlororaphis* (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж) (65,2%), *Trichoderma harzianum* (Стернифаг, СП) (60,3%).

Стоит отметить, что при сравнительно невысоких показателях биологической эффективности при подавлении патогенной микрофлоры на семенах, при обработке препаратами на основе бактерий рода *Pseudomonas* выявлена достаточно высокая эффективность на растениях. Бактерии способны растворять фосфор, высвобождать сидерофоры, производить индолилуксусную кислоту, что напрямую влияет на повышение стрессоустойчивости растений к абиотическим (погодные условия, солевые стрессы, загрязненные почвы и т.д.) и биотическим (фитопатогены, вредители) факторам, стимулируя рост и индуцируя системную устойчивость.

Однофакторный дисперсионный анализ выявил достоверные различия между всеми опытными вариантами (при $\alpha = 0,05$): $F_t 6,0 < F_f 50,6$ (Геостим Фит, А, Ж), $F_t 6,0 < F_f 66,0$ (Алирин-Б, Ж), $F_t 6,0 < F_f 20,0$ (Псевдобактерин-2, Ж); $F_t 6,0 < F_f 25,7$ (Стернифаг, СП), $F_t 6,0 < F_f 16,9$ (Трихоцин, СП), $F_t 6,0 < F_f 36,5$ (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Bacillus velezensis* BZR336 g, Ж), $F_t 6,0 < F_f 81,2$ (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж), $F_t 6,0 < F_f 22,9$ (Оргамика Ф, Ж), $F_t 6,0 < F_f 72,0$ (Скарлет, МЭ).

По итогам первого года исследований были отобраны препараты, показавшие наибольшую эффективность при применении на изучаемых сортах (Виват, Маруся, Рубеж, Юрий) и допущенные к использованию на ячмене озимом (табл. 2). Как наиболее эффективный против корневых и прикорневых гнилей различной этиологии в исследованиях, также был выявлен химический эталон Скарлет, МЭ (73,4%). Достаточно высокие показатели определены при применении биопрепарата Геостим Фит, А, Ж на основе группы биологически активных агентов (*Chaetomium globosum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium leguminosarum*, *Mesorhizobium ciceri*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus subtilis*) – 68,1%. Применение препаратов на основе *Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП) и *Bacillus subtilis* (Алирин-Б, Ж) выявило биологическую эффективность в среднем по всем вариантам: 60,3 и 52,6% соответственно.

Таблица 1

Биологическая эффективность применения биопрепаратов против корневых и прикорневых гнилей различной этиологии ячменя озимого, сортов Виват, Маруся, Рубеж, Юрий, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2024 г.

Table 1

Biological efficacy of biologics against root and radical rot of various etiologies in winter barley, cultivars Vivat, Marusya, Rubezh, Yuri, FRCBPP, 2024

Варианты опыта	Сорта							
	Виват		Маруся		Рубеж		Юрий	
	R., %	БЭ**	R., %	БЭ	R., %	БЭ	R., %	БЭ
Геостим Фит, А, Ж	13 ±3,1	48,0	12 ±2,0	40,0	10 ±1,0	63,0	13 ±2,6	43,5
Алирин-Б, Ж	4 ±1,6	84,0	9 ±2,5	55,0	6 ±1,5	77,8	10 ±1,6	56,5
Псевдобактерин-2, Ж	14 ±3,6	44,0	12 ±2,0	40,0	16 ±2,0	40,7	6 ±0,2	73,9
Стернифаг, СП	14 ±3,6	44,0	4 ±1,7	80,0	13 ±1,5	51,9	8 ±1,0	65,2
Трихоцин, СП	17 ±2,5	32,0	16 ±2,0	20,0	16 ±1,2	40,7	10 ±2,0	56,5
Опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР <i>B. subtilis</i> BZR336g, Ж	12 ±2,0	52,0	9 ±1,2	55,0	14 ±2,3	48,1	14 ±2,1	39,1
Опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР <i>P. chlororaphis</i> BZR245-F, Ж	9 ±1,7	64,0	8 ±1,0	60,0	10 ±1,0	63,0	6 ±1,0	73,9
Органика Ф, Ж	6 ±3,6	76,0	15 ±1,7	25,0	14 ±2,3	48,1	12 ±2,3	47,8
Скарлет, МЭ (химический эталон)	10 ±2,6	60,0	4 ±0,5	80,0	8 ±1,0	70,4	6 ±2,0	73,9
Контроль (без обработки)	25 ±2,5	–	20 ±1,7	–	27 ±2,0	–	23 ±3,6	–

*R – развитие корневых и прикорневых гнилей.

** БЭ – биологическая эффективность.

Однофакторный дисперсионный анализ выявил достоверные различия между всеми опытными вариантами (при $\alpha = 0,05$): $F_t 6,0 < F_f 166,6$ (Геостим Фит, А, Ж), $F_t 6,0 < F_f 81,39$ (Алирин-Б, Ж), $F_t 6,0 < F_f 121,3$ (Трихоцин, СП), $F_t 6,0 < F_f 165,4$ (Скарлет, МЭ).

В 2024 г. среднее развитие корневых и прикорневых гнилей определено как минимальное на сорте Юрий (10,8%) и сорте Маруся (10,9%). На сортах Виват и Рубеж развитие болезни составило 12,4 и 13,4% соответственно. В 2025 г. развитие болезней на сортах составило: Рубеж – 13,2%; Маруся – 14,0%; Виват – 14,8%; Юрий – 15,6%. Однофакторный дисперсионный анализ не выявил различия между средними показателями устойчивости сортов (2024 г. – $F_t 8,7 < F_f 0,36$ Виват/Маруся, $F_t 4,4 < F_f 1,1$ Рубеж/Юрий; 2025 г. – $F_t 8,8 < F_f 0,02$ Виват/Маруся; $F_t 8,8 < F_f 0,22$ Рубеж/Юрий), а также между показателями развития болезни только в опытных вариантах

с обработками биопрепаратами (2024 г. – $F_t 8,7 < F_f 0,05$ Виват/Маруся, $F_t 4,6 < F_f 2,3$ Рубеж/Юрий; 2025 г. – $F_t 9,1 < F_f 0,08$ Виват/Маруся; $F_t 9,1 < F_f 0,62$ Рубеж/Юрий). Полученные на данном этапе исследований результаты могут свидетельствовать о минимальном влиянии сортовых особенностей на развитие корневых гнилей в вегетационный период 2024–2025 гг. на отобранных для изучения сортах (Виват, Маруся, Рубеж, Юрий).

Таблица 2

Биологическая эффективность применения биопрепаратов против корневых и прикорневых гнилей ячменя озимого, сортов Виват, Маруся, Рубеж, Юрий, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2025 г.

Table 2

Biological efficacy of biologics against root and radical rot in winter barley, cultivars Vivat, Marusya, Rubezh, Yuri, FRCBPP, 2025

Варианты опыта	Сорта							
	Виват		Маруся		Рубеж		Юрий	
	R., %	БЭ**	R., %	БЭ	R., %	БЭ	R., %	БЭ
Геостим Фит, А, Ж	8,0±2,0	73,3	10,0±1,7	72,0	11,0±1,6	56,0	9,0±1,0	71,0
Алирин-Б, Ж	15,0±1,5	50,0	13,0±2,1	60,0	12,0±2,0	52,0	16,0±2,0	48,4
Трихоцин, СП	11,0±3,0	63,3	13,0±1,5	60,0	10,0±1,0	60,0	13,0±2,0	58,1
Скарлет, МЭ (химический эталон)	10,0±2,0	66,7	6,0±1,1	88,0	8,0±1,2	68,0	9,0±1,3	71,0
Контроль (без обработки)	30±2,5		28	–	25±3,6	–	31±1,5	–

* R – развитие корневых и прикорневых гнилей.

** БЭ – биологическая эффективность.

Выводы
Conclusions

Выявлена максимальная эффективность применения биопрепаратов на основе грибов рода *Trichoderma*, бактерий *Bacillus* spp., а также группы бактерий и их метаболитов (*Chaetomium globosum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium leguminosarum*, *Mesorhizobium ciceri*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus subtilis*) против заражения семян фузариозной инфекцией после обработки препаратами Трихоцин, СП (94,5%), Геостим Фит, А, Ж (92,4%), Алирин-Б, Ж (92,3%) и Оргамика Ф, Ж (91,1%).

Максимальная лабораторная и полевая всхожесть выявлена после обработки семян препаратами на основе *Trichoderma asperellum* – 96% (Оргамика Ф, Ж), *Bacillus velezensis* – 95% (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Bacillus velezensis* BZR336 г, Ж), *Pseudomonas chlororaphis* – 95% (опытный образец ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж).

Наибольшие показатели густоты стояния определены на опытных деланках с препаратами Алирин-Б, Ж, Геостим Фит, А, Ж (по 488 раст/м²), Стернифаг, СП (по 485 раст/м²), Псевдобактерин-2, Ж и эталоном Скарлет, МЭ (по 484 раст/м²).

Выявлены высокие показатели эффективности против корневых и прикорневых гнилей различной этиологии после применения препаратов на основе *Bacillus subtilis* Алирин-Б, Ж (68,3%), *Pseudomonas chlororaphis* ФГБНУ ФНЦБЗР на основе *Pseudomonas chlororaphis* BZR245-F, Ж (65,2%) и *Trichoderma harzianum* Стернифаг, СП (60,3%).

Влияние сортовых особенностей (Виват, Маруся, Рубеж, Юрий) на развитие корневых гнилей в вегетационный период 2024–2025 гг. не выявлено.

Применение эффективных фунгицидов на нехимической основе против семенной и почвенной инфекции озимого ячменя на юге России позволит не только получить экологически безопасную сельскохозяйственную продукцию, но и предотвратить появление резистентных к наиболее широко применяемым фунгицидам штаммов фитопатогенных грибов, а также снизит токсикологическую нагрузку на агроценозы.

Список источников

1. Овсянкина А.В. Корневые гнили зерновых // *Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями*. 2012. № 13. С. 300–303. EDN: ZNHSSN
2. Zhukova L.V., Stankevych S.V., Turenko V.P., et al. Root Rots of Spring Barley, Their Harmfulness and the Basic Effective Protection Measures. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019;9(2): 232-238
3. Жуковский А.Г., Крупенько Н.А., Буга С.Ф. и др. Корневая гниль зерновых культур и роль инфицированности семян в ее развитии // *Защита растений*. 2022. № 42. С. 84–95. EDN: YYEFNN
4. Ганнибал Ф.Б., Полуэктова Е.В., Лукьянец Я.В. и др. Ассоциированные с ячменем микромицеты и их значимость как возбудителей болезней в России // *Вестник защиты растений*. 2023. № 4. С. 172–186. <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2023-106-4-16116>
5. Saad A., Macdonald B., Martin A. et al. Winter cereal reactions to common root rot and crown rot pathogens in the field. *Agronomy*. 2022;12(10):2571. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102571>
6. Yin Y., Miao J., Shao W. et al. Fungicide resistance: Progress in understanding mechanism, monitoring and management. *Phytopathology*. 2023;113(4):707-718. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD>
7. Dutilloy E., Oni F.E., Esmaeel Q. et al. Plant beneficial bacteria as bioprotectants against wheat and barley diseases. *Journal of Fungi*. 2022;8(6):632. <https://doi.org/10.3390/jof8060632>
8. Kiesewalter H.T., Lozano-Andrade C.N., Wibowo M. et al. Genomic and chemical diversity of *Bacillus subtilis* secondary metabolites against plant pathogenic fungi. *Msystems*. 2021;6(1): e00770-20. <https://doi.org/10.1128/msystems.00770-20>
9. Romero D., Traxler M.F., Lopez D. et al. Antibiotics as signal molecules. *Chemical Reviews*. 2011;111(9):5492-5505. <https://doi.org/10.1021/cr2000509>
10. Торопова Е.Ю., Селюк М.П., Казакова О.А. и др. Факторы индукции супрессивности почвы агроценозов // *Агрохимия*. 2017. № 4. С. 51–64. EDN: YRCQIR
11. Asad S.A. Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against fungal plant diseases-A review. *Ecological Complexity*. 2022;49:100978. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2021.100978>

12. Yue Y., Wang Z., Zhong T. et al. Antifungal mechanisms of volatile organic compounds produced by *Pseudomonas fluorescens* ZX as biological fumigants against *Botrytis cinerea*. *Microbiological Research*. 2023;267:127253. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127253>
13. Wei D., Zhu D., Zhang Y. et al. Characterization of rhizosphere *Pseudomonas chlororaphis* IRHB3 in the reduction of Fusarium root rot and promotion of soybean growth. *Biological Control*. 2023;186:105349. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105349>
14. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений. [Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru/registry/> (дата обращения: 10.04.2025)
15. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / Под ред. В.И. Долженко. Санкт-Петербург: Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений РАСХН, 2009. 378 с. EDN: WERHOZ

References

1. Ovsyankina A.V. Root rot of cereals. *Teoriya i praktika borby s parazitarnymi boleznyami*. 2012;(13):300-303. (In Russ.)
2. Zhukova L.V., Stankevych S.V., Turenko V.P. et al. Root rots of spring barley, their harmfulness and the basic effective protection measures. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019;(9):232-238.
3. Zhukovsky A.G., Krupenko N.A., Buga S.F. et al. Root rot of grain crops and seed affection role in its severity. *Zashchita rasteniy*. 2022;(42):84-95. (In Russ.)
4. Hannibal F.B., Poluektova E.V., Lukyanets Y.V. et al. Micromycetes associated with barley and their significance as pathogens in Russia. *Plant Protection News*. 2023;106(4):172-186. (In Russ.) <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2023-106-4-16116>
5. Saad A., Macdonald B., Martin A. et al. Winter cereal reactions to common root rot and crown rot pathogens in the field. *Agronomy*. 2022;12(10):2571. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102571>
6. Yin Y., Miao J., Shao W. et al. Fungicide resistance: Progress in understanding mechanism, monitoring and management. *Phytopathology*. 2023;113(4):707-718. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD>
7. Dutilloy E., Oni F.E., Esmaeel Q. et al. Plant beneficial bacteria as bioprotectants against wheat and barley diseases. *Journal of Fungi*. 2022;8(6):632. <https://doi.org/10.3390/jof8060632>
8. Kiesewalter H.T., Lozano-Andrade C.N., Wibowo M. et al. Genomic and chemical diversity of *Bacillus subtilis* secondary metabolites against plant pathogenic fungi. *Msystems*. 2021;6(1): e00770-20. <https://doi.org/10.1128/msystems.00770-20>
9. Romero D., Traxler M.F., Lopez D. et al. Antibiotics as signal molecules. *Chemical Reviews*. 2011;111(9):5492-5505. <https://doi.org/10.1021/cr2000509>
10. Toropova E.Y., Selyuk M.P., Kazakova O.A. et al. Suppressive induction factors in agroecosystem soil. *Agrohimia*. 2017;(4):51-64. (In Russ.)
11. Asad S.A. Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against fungal plant diseases-A review. *Ecological Complexity*. 2022;49:100978. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2021.100978>
12. Yue Y., Wang Z., Zhong T. et al. Antifungal mechanisms of volatile organic compounds produced by *Pseudomonas fluorescens* ZX as biological fumigants against *Botrytis cinerea*. *Microbiological Research*. 2023;267:127253. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127253>

13. Wei D., Zhu D., Zhang Y. et al. Characterization of rhizosphere *Pseudomonas chlororaphis* IRHB3 in the reduction of Fusarium root rot and promotion of soybean growth. *Biological Control*. 2023;186:105349. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105349>

14. State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties." (In Russ.) URL: <https://gossortrf.ru/registry/> (accessed: April 10, 2025).

15. *Methodological guidelines for registration tests of fungicides in agriculture*. V.I. Dolzhenko (Ed). St. Petersburg, Russia: All-Russian Research Institute of Plant Protection, 2009:378. (In Russ.)

Сведения об авторах

Галина Владимировна Волкова, д-р биол. наук, член-корр. РАН, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории иммунитета растений к болезням, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологической защиты растений»; 350039, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. имени Калинина, 62; e-mail: galvol.bpp@yandex.ru

Яна Викторовна Яхник, научный сотрудник лаборатории иммунитета растений к болезням, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологической защиты растений»; 350039, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. имени Калинина, 62; e-mail: yahnik1@mail.ru

Александр Дмитриевич Кустадинчев, младший научный сотрудник лаборатории иммунитета растений к болезням, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологической защиты растений»; 350039, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. имени Калинина, 62; e-mail: skustadinchev@mail.ru

Information about the authors

Galina V. Volkova, DSc (Bio), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Plant Immunity to Diseases, Federal Scientific Center for Biological Plant Protection; 62 Kalinina St., Krasnodar, 350039, Russian Federation; e-mail: galvol.bpp@yandex.ru

Yana V. Yakhnik, Research Associate at the Laboratory of Plant Immunity to Diseases, Federal Scientific Center for Biological Plant Protection; 62 Kalinina St., Krasnodar, 350039, Russian Federation; e-mail: yahnik1@mail.ru

Aleksandr D. Kustadinchev, Junior Research Associate at the Laboratory of Plant Immunity to Diseases, Federal Scientific Center for Biological Plant Protection; 62 Kalinina St., Krasnodar, 350039, Russian Federation; e-mail: skustadinchev@mail.ru

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Основные инфекционные болезни злаковых трав, используемых для создания спортивных газонов, и методы борьбы с ними (обзор)

**Алена Павловна Демидова[✉], Ольга Олеговна Белошапкина,
Ольга Вячеславовна Корякина**

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: a.demidova@rgau-msha.ru

Аннотация

В статье первоначально приведены сведения о значении и классификации газонных травостоев, мировых лидерах по уровню культуры, селекции и семеноводству злаковых газонных трав. Оценены в целом состояние спортивных газонов, в том числе футбольных и гольф-полей, с экономической и эколого-географической точек зрения и их местоположение на территории Российской Федерации. Подробно описаны систематика, инфекционные циклы и особенности патогенеза возбудителей заболеваний натуральных спортивных покрытий, классифицированных по поражаемым органам, как болезни, поражающие корневую систему, и болезни, поражающие листовой аппарат (листья, травостой). Как возбудители корневых гнилей, отмечены грибы родов *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Gaeumannomyces graminis*, оомицеты рода *Pythium*. Среди важных инфекционных болезней листового аппарата спортивного травостоя описаны ржавчинные заболевания, различные пятнистости и мучнистая роса. Показано, что среди доминирующих патогенов многие способны в равной степени инфицировать как подземные, так и надземные органы растений-хозяев, среди них указаны грибы родов *Bipolaris* и *Drechslera*, вызывающие корневые гнили, пятнистости листьев, некротизацию семян. Среди опасных зимних заболеваний травостоя игровых полей описаны снежные плесени, вызываемые криофильными грибами. Наряду с распространенными заболеваниями спортивных газонов уделено внимание относительно новым, включая антракнозы, пирикулярриоз, «ведьмины кольца» разной этиологии, получившим эпифитотийное распространение на газонах гольф-полей ряда стран в последние десятилетия. Есть сведения о единственном зарегистрированном бактериальном заболевании, встречающемся на участках для спортивных игр – бактериальном увядании листьев (*Xanthomonas translucens*); приведены названия вирусов, способных поражать газонный травостой. В работе систематизированы данные о методах контроля заболеваний спортивных газонов. Данный обзор представляет теоретический и практический интерес как для ученых и обучающихся специалистов по газоноведению, так и для агрономов в области спортивного газоноводства.

Ключевые слова

Травостой, злаки, спортивные газоны, инфекционные болезни, меры борьбы

Для цитирования

Демидова А.П., Белошапкина О.О., Корякина О.В. Основные инфекционные болезни злаковых трав, используемых для создания спортивных газонов, и методы борьбы с ними (обзор) // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2025. № 6. С. 92–113.

Main infectious diseases of grasses used in sports turf and their control: a review

Alena P. Demidova[✉], Olga O. Beloshapkina, Olga V. Koryakina

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

[✉]**Corresponding author:** a.demidova@rgau-msha.ru

Abstract

This review commences by detailing the significance and classification of turfgrass stands, along with an overview of global leaders in turfgrass culture, breeding, and seed production. An overall assessment is provided for the state of sports turfs, including football pitches and golf courses, from economic and eco-geographical perspectives, covering their distribution within the Russian Federation. The article thoroughly describes the taxonomy infection cycles, and specific pathogenesis of pathogens causing diseases of natural sports surfaces. These diseases are classified by affected plant organs into those impacting the root system and those affecting the foliar apparatus (leaves, grass). As causal agents of root rots, fungi from the genera *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Gaeumannomyces graminis*, and oomycetes from the genus *Pythium* are noted. Among the significant infectious diseases affecting the foliar apparatus of sports turf, rust diseases, various leaf spots, and powdery mildew are described. It is demonstrated that many dominant pathogens can equally infect both underground and aboveground parts of host plants; these include fungi from the genera *Bipolaris* and *Drechslera*, known to cause root rots, leaf spots, and seed necrosis. Dangerous winter diseases of playing fields described include snow molds, caused by cryophilic fungi. Alongside common diseases of sports turfs, attention is paid to relatively new ones, including anthracnose, blast, and ‘fairy rings’ of various etiologies, which have reached epiphytotic levels on golf courses in several countries in recent decades. Information is provided on the only recorded bacterial disease found on sports grounds – bacterial leaf wilt (*Xanthomonas translucens*); the names of viruses capable of affecting turf grass are also listed. The review systematically organizes data on methods for controlling sports turf diseases. It is of both theoretical and practical interest for researchers and students specializing in turfgrass science, as well as for agronomists in the field of sports turf management.

Keywords

Grass, cereals, sports lawns, infectious diseases, control measures

For citation

Demidova A.P., Beloshapkina O.O., Koryakina O.V. Main infectious diseases of grasses used in sports turf and their control: a review. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 92–113.

Введение Introduction

Газон – это травянистый фитоценоз, то есть сообщество из травянистых мезофитных видов, произрастающих на однородном участке и образующих дерновое покрытие из специально подобранных трав, которое создается путем посева (посадки) для различных целей [1]. Газоны являются неотъемлемой частью урбанизированной среды, которая оказывает множество положительных воздействий на экологию, в том числе улучшает санитарно-гигиенические условия местности, задерживая большое

количество пыли, регулируя температуру и влажность воздуха; сокращает потребление энергии, может использоваться для фиторемедиации, а также для борьбы с эрозией. Давно доказано, что зеленые насаждения – такие, как газон, могут снижать уровень стресса и повышать когнитивные способности человека [2].

Существует множество критериев классификации газона. Однако в зависимости от функционального назначения чаще всего их подразделяют на декоративные, специальные и спортивные. К декоративным газонам относят садово-парковые, партерные, луговые и мавританские. Газоны специального назначения используются для рекультивации нарушенных земель или разрушенных ландшафтов, закрепления железнодорожных и шоссейных дорог, терриконов и откосов. Спортивные газоны служат важным элементом стадионов, ипподромов и других спортивных объектов [3].

На современном этапе развития спорта в России и в мире наблюдается повышенный спрос на поля с высококачественным травостоем. К спортивному дерновому покрытию предъявляются высокие требования по устойчивости к механическим повреждениям и воздействию окружающей среды, что необходимо для обеспечения оптимальных условий игры и минимизации рисков для здоровья спортсменов [4].

Около 40 видов злаков используются в качестве газонных трав по всему миру. Большинство газонных трав являются многолетними и приспособились к существованию в широком диапазоне климатических условий с различными эдафическими и биотическими элементами [5]. Самые перспективные виды газонных трав для спортивных полей в условиях Нечерноземной Центральной России – мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), овсяница красная (*Festuca rubra* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.) и полевица побегообразующая (*Agrostis stolonifera* L.) [1]. При эксплуатации спортивных объектов травостой характеризуется высокой подверженностью болезням двух основных групп: вызванные патогенами (инфекционные) и вызванные абиотическими факторами (неинфекционные) [6, 7].

В связи с тем, что на спортивных полях болезни газонных трав могут быстро привести к значительным экономическим потерям ввиду необходимости восстановления поврежденных участков или даже всего поля, ключевую роль в борьбе с ними играют правильная агротехника, адаптированная к местным условиям, и своевременные защитные мероприятия [8]. В фитопатологии при проведении учетов и наблюдений приоритет отдается мониторингу и оценке наиболее распространенных и экономически значимых болезней для каждой конкретной культуры. Такие сведения позволяют оценить масштабы распространения заболеваний и возможности борьбы с ними в разных природно-климатических условиях.

Цель исследований: аналитический обзор инфекционных болезней многолетних злаков, используемых на спортивных объектах, и существующих методов и средств их контроля в России и мире.

Методика исследований

Research method

Для достижения поставленной цели, с использованием более 80 отечественных и зарубежных научных источников, был проведен аналитический обзор основных болезней спортивных газонных трав и способов борьбы с ними.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

По результатам анализа информации выявлено, что лидерами по уровню культуры злаковых газонных трав в 2024 г. стала Северная Америка, доминировавшая

на рынке спортивных газонов с 35% доли, за которой следуют Европа (30%), а затем – Азиатско-Тихоокеанский регион (25%). Латинская Америка, Ближний Восток и Африка внесли 5 и 5% соответственно. Азиатско-Тихоокеанский регион является самым быстрорастущим в связи с увеличением инвестиций в спортивную инфраструктуру [9].

По данным Ассоциации гольфа России (АГР) [10], на 2025 г. действующими остаются 39 гольф-полей с натуральным газонным покрытием, расположенные в следующих регионах: Санкт-Петербург и Ленинградская область – гольф-клубы «GORKI Golf & Resort», «Strawberry Fields Golf Resort», «Петергоф», «MillCreek»; Тверская область – Национальный гольф-клуб «Завидово»; Калужская область – «Вырка»; Москва и Московская область: «Пестово», «Сколково», «Пирогово», «Agalarov Golf & Country Club», «Целеево», «Forest Hills», «Raevo» и др. (всего 18 полей); Белгородская область – «Старый Оскол»; Ярославская область – «Коприно»; Краснодарский край: «Геленджик Гольф Резорт» и «Раевский»; Ростовская область – «Дон»; Владимирская область – «Crystal Lakes Golf & Country Club»; Республика Осетия – «Осетинский гольф-клуб»; Республика Татарстан – «Свияжские холмы» и «Ак Барс»; Свердловская область – «Pine Creek Resort»; Челябинск – «Южно-Уральский гольф-клуб»; Тюмень – «Перелада»; Красноярский край – «Орлиные холмы» и «Юдинская Долина»; Иркутская область – «Алха».

Также, согласно сведениям Российского футбольного союза (РФС), в стране также имеются более 20000 футбольных полей из натурального и искусственного покрытия [11]. Ниже представлена составленная нами карта местоположения российских гольф-полей, существующих на 2025 г. (рис. 1).

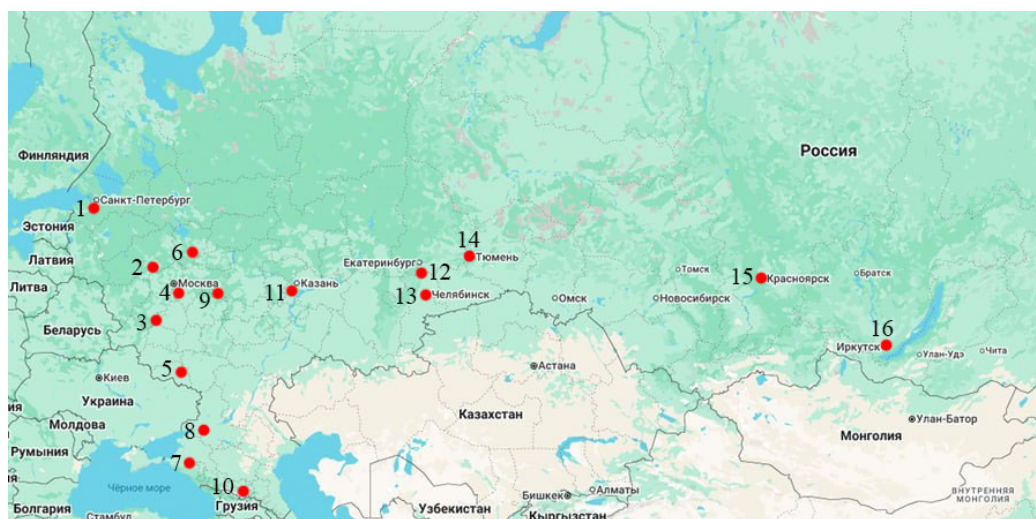


Рис. 1. Региональная карта гольф-инфраструктуры России:

- 1 – Санкт-Петербург и Ленинградская область; 2 – Тверская область; 3 – Калужская область;
- 4 – Москва и Московская область; 5 – Белгородская область; 6 – Ярославская область;
- 7 – Краснодарский край; 8 – Ростовская область; 9 – Владимирская область;
- 10 – Республика Осетия; 11 – Республика Татарстан; 12 – Свердловская область;
- 13 – Челябинск; 14 – Тюмень; 15 – Красноярский край; 16 – Иркутская область

Figure. 1. Regional map of Russia's golf infrastructure:

- 1 – St. Petersburg and Leningrad Region; 2 – Tver Region; 3 – Kaluga Region;
- 4 – Moscow and Moscow Region; 5 – Belgorod Region; 6 – Yaroslavl Region;
- 7 – Krasnodar Territory; 8 – Rostov Region; 9 – Vladimir Region;
- 10 – Republic of Ossetia; 11 – Republic of Tatarstan; 12 – Sverdlovsk Region;
- 13 – Chelyabinsk; 14 – Tyumen; 15 – Krasnoyarsk Territory; 16 – Irkutsk Region

По селекции и семеноводству газонных трав ведущие позиции занимают Дания, Нидерланды, США, Германия [8]. Отсутствие в России селекции газонных трав вплоть до 1990-х гг. XX в. привело к тому, что в настоящее время ощущается острая нехватка исходного генетического материала. Как следствие, подавляющее большинство семян, используемых на спортивных полях Российской Федерации, имеют зарубежное происхождение. Однако климатические условия нашей страны заметно отличаются от климата Западной и Центральной Европы, Америки: более суровыми зимами и коротким безморозным периодом, высотой снежного покрова, высокими положительными температурами и низкой влажностью воздуха в летний период, а также частыми засухами [12].

Указанные факторы обуславливают значительную разницу в спектре наиболее распространенных заболеваний газонных покрытий. Согласно исследованиям ученых Корнелльского университета (Нью-Йорк, США), на американском континенте чаще всего встречаются пятнистости листьев и корневые гнили [13]. В работе Т.В. Кулаковской и др. [14] отмечается, что в европейских странах наиболее распространены различные ржавчины и эндофитные заболевания, а в России – листовые пятнистости. Это связано с тем, что селекция в каждой стране нацелена на выведение сортов, устойчивых к локальным патогенам.

Исследования инфекционных заболеваний спортивных газонов и возбудителей этих заболеваний ведутся во многих странах [15–19]. В мировой практике известно несколько сотен видов грибов, поражающих газонные злаки [13], однако в России диагностированных и описанных фитопатогенов именно на спортивных покрытиях всего несколько десятков.

Болезни натуральных спортивных покрытий можно классифицировать по поражаемым органам: 1) болезни, поражающие корневую систему; 2) болезни, поражающие листовую аппарат (листья, травостой).

Особо значимыми и вредоносными болезнями спортивных газонов являются болезни, поражающие корневую систему, поскольку они наносят наибольший совокупный ущерб: требуют быстрого реагирования во избежание потери всего поля, и на их устранение необходимо больше затрат [18, 19]. При этом корневые патогены блокируют транспорт воды и питательных веществ и отравляют токсинами проводящую систему растений в целом, что приводит к системному ухудшению состояния травостоя, которое проявляется в изменении цвета (хлороз, побурение), резком угнетении роста, и в итоге – потерей густоты и прочности дернины [20]. Газонные злаки часто бывают поражены такими грибами и псевдогрибами, как представители родов *Fusarium*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, которые поражают основание листовых влагалищ, корневую шейку и корни растений [21], вызывая развитие разнообразных корневых и прикорневых гнилей. Наиболее часто доминирующими заболеваниями грибной этиологии являются: фузариозная гниль (возбудители виды рода *Fusarium*) [22, 23]; ризоктониозная гниль (виды рода *Rhizoctonia*) [20]; питиозная гниль (виды рода *Pythium*) [24]. Эти патогены обладают высокой репродуктивной способностью и легко распространяются с водой (с брызгами дождя, поливной водой и косилочным оборудованием) [21].

Также корни газонных злаков часто поражает офиоболезная гниль (основной возбудитель – *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) Arx & D.L. Olivier), ранее – *Ophiobolus graminis* (Sacc.), которая относится к одному из опасных заболеваний во многих странах Европы, Америки, а также Австралии [25]. В России данный патоген локализуется почти во всех областях ЦНР, кроме Костромской и Калужской, чаще встречается в районах с достаточным увлажнением [26]. По данным российских исследований, возбудитель поражает все колосовые зерновые культуры, но как и церкоспореллезная гниль (возбудитель – *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton), в большей

мере проявляется на озимой пшенице [27]. Заболевание было отмечено на полевице *Agrostis tenuis* Sibth. и *A. stolonifera*, мятлике *Poa annua* L. и *P. pratensis*, кострце *Bromus inermis* (Leyss.) Holub, райграсе *Arrhenatherum elatius* (L.) J. Presl & C. Presl, еже *Dactylis glomerata* L., лисохвосте *Alopecurus pratensis* L. [22].

В исследованиях в Турции из 14 видов *Gaeumannomyces* наиболее вирулентными на гольф-полях, состоящих из трав видов рода *Agrostis*, являлись *G. graminis* var. *graminis* и *G. californicus* [28] (о первом сообщается и в исследованиях, проводимых в Бразилии [29] и Америке [30]). Учеными США (штаты Северная Каролина [31], Флорида [32] и Техас [33]) и Австралии [34] зафиксировано, что данное заболевание является основной причиной вырождения спортивных покрытий, состоящих из свинороя пальчатого (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) – распространенный злак теплого сезона, в иностранной литературе известный под названием «бермудская трава», используемый на гольф-полях в регионах с жарким климатом [34], в том числе на юге Европейской части России. Патогенез сопровождается развитием системного поражения: надземные части подвергаются депигментации (обесцвечиванию), в то время как в области корневой шейки и базальной части корня отмечается некротическое почернение тканей, часто покрывающихся массой точечных плодовых тел. Процесс завершается деструкцией и мацерацией эпидермиса, приводящей к потере тургора и ломкости узла кушения, стеблей.

Одной из распространенных болезней на спортивных полях восточной части Средиземноморья является гельминтоспориозная (обыкновенная) корневая гниль, вызываемая фитопатогенным грибом *Bipolaris sorokiniana* Shoemaker [35]. Возбудитель, известный в отечественной литературе также под синонимичным названием *Helminthosporium sativum* [36] (вследствие реклассификации рода *Helminthosporium* на несколько родов включая *Bipolaris*, *Curvularia*, *Drechslera*, *Exserohilum*, *Johnalcornia* и *Porocercospora* [37, 38]), характеризуется отсутствием строгой органотропной специализации и способен в равной степени инфицировать как подземные, так и надземные органы растений-хозяев.

Гельминтоспориозы, или темно-бурая пятнистость листьев, а также желтая пятнистость, вызываемые грибами родов *Bipolaris* и *Drechslera*, характерны для южных регионов США, Бразилии [39], Китая [40], Дании [41] и России [42]. Патогены продуцируют фитотоксины, что обуславливает широкий спектр форм проявления болезни: корневая гниль, темно-бурая/желтая пятнистость листьев и потемнение зародыша зерна [43]. Заболевание имеет глобальное распространение и может представлять значительную угрозу для злаковых культур, в том числе для *Lolium perenne* – одного из главных дернообразующих злаков спортивных газонов [44].

Важными инфекционными болезнями листового аппарата спортивного травостоя являются ржавчина, различные пятнистости и мучнистая роса. В последние десятилетия на гольф-полях США зафиксировано активное поражение некоторых сортов *Poa pratensis* и *Lolium perenne* ржавчинными грибами (возбудитель – *Puccinia* sp.). В ходе филогенетического анализа было выявлено три основных вида: *P. coronata*, *P. graminis* и *P. striiformis* [45, 46]. Эти выводы полностью соответствуют исследованиям, проводимым в Турции [47]. В Пакистане *P. coronata* повреждает виды *Agrostis* и *Festuca* [48]. Наиболее распространенные виды, поражающие спортивные газоны России, – *P. poae-nemoralis* (листовая ржавчина мятлики лугового), *P. graminis* (черная стеблевая ржавчина), *P. coronata* (корончатая ржавчина), *P. festucae* (ржавчина овсяницы), *P. striiformis* (желтая ржавчина), *P. loliina* (бурая ржавчина) [49].

Ржавчинные заболевания широко распространены по всему миру: например, в Италии [50], Германии [51], Иране [52], Китае [53] и Корее [54]. Они являются важной группой патогенов, за которыми необходимо следить ввиду их способности

создавать новые расы (известно более 4000 видов [53]) и их передачи воздушно-капельным путем. Их вредоносность для спортивных газонов заключается в комплексном негативном воздействии на физиологию растений, что приводит к снижению ряда важных характеристик дернового покрытия – таких, как устойчивость к вытаптыванию, скорость отрастания, засухоустойчивость, зимостойкость, декоративность и др. [49].

Помимо ржавчины, на газонных травах распространены пятнистости листьев – долларовая пятнистость (возбудитель – *Sclerotinia homoeocarpa* F.T. Benn. (син. *Clavireedia homoeocarpa* (F.T. Benn.) L.A. Beirn, B.B. Clarke, C. Salgado & J.A. Crouch), красная нитчатость (возбудитель – *Laetisaria fuciformis* (Berk.) Burds.) и антракнозы (виды рода *Colletotrichum*) [55]. Несмотря на то, что последние были хорошо изучены с начала XX в., современные фитопатологи ревизуют таксономию и экологию возбудителей данного рода, выявляя более сложную и обширную группу патогенов, чем считалось ранее [56]. Эпифитотийное распространение антракноза на газонах гольф-полей в Северной Америке, Канаде и Западной Европе достигло эпидемических масштабов, что привело к значительному числу новых исследований, выявляющих, что основным возбудителем антракноза на спортивных полях является *C. graminicola* (Ces.) G.W. Wilson [57, 58]. Однако в 2023 г. турецкие ученые с помощью анализа последовательности рДНК-ITS идентифицировали патоген как *C. cereale* Manns, подчеркивая, «ранее называвшимся *C. graminicola*» [59]. Основным симптомом болезни является образование пятен неправильной формы от желтого до бронзового цвета, которые часто сопровождаются потерей плотности дерна. Распространение происходит от старых листьев к молодым, при этом кончики листьев становятся хлоротичными и в итоге полностью некротизируются [60].

Во всем мире на гольф-полях листья злаков, как и многих других культур, поражаются мучнистой росой (возбудитель – *Blumeria graminis* (DC.) Speer (ранее – *Erysiphe graminis* DC.). В России [15], Польше [61], Германии [62], Китае [63], Израиле [64], США [65], в Швейцарии и Японии [66] наиболее восприимчивым видом является *Poa pratensis* (возбудитель – *B. graminis* f. sp. *poae*), но поскольку гибридизация *B. graminis* ff. spp. позволяет патогену адаптироваться к новым хозяевам, Мятлик луговой может служить первичным резервуаром патогена, представляющим угрозу и для других видов газонных трав [67].

Среди самых опасных зимних заболеваний, ассоциирующихся с повреждением травостоя (инфекционное выпревание) игровых полей, считаются снежные плесени, вызываемые криофильными грибами-факультативными паразитами [68]. Патогены наиболее распространены в Северном полушарии (Северная Америка, Северная и Восточная Европа и Азия), где имеется продолжительный снежный покров, и вредоносны, когда устойчивость растений к болезням снижается по причине истощения запасов углеводов [69]. Лишь некоторые снежные плесени – такие, как *Microdochium nivale* (Fr.) Samuels & Hallett (син. *Fusarium nivale* (Fr.) Ces.), могут быть относительно независимыми от наличия снега и устойчивыми к низким температурам, поэтому летом при высокой влажности грибок также может сохранять свою активность. В зависимости от погодных условий поражение *M. nivale* (розовая снежная плесень) протекает по типам «Корневая гниль – снежная плесень» (с формированием только анаморфы) или «Корневая гниль – фузариозный ожог листьев – фузариоз колоса и зерна» (при наличии телеоморфы и анаморфной стадий) и развивается даже в Краснодарском крае [70].

Для злаков спортивных объектов вредоносными являются также: серая снежная плесень, вызываемая *Typhula incarnata* Lasch. ex Fr.; серая, или крапчатая, снежная плесень, вызываемая *T. ishikariensis* S. Imai; склероциальная снежная

плесень, вызываемая *Sclerotinia borealis* Bubak & Vleugel (син. *Myriosclerotinia borealis* (Bubak & Vleugel) Kohn, *S. graminearum* Elenov et Solkina). Сразу после снеготаяния, в конце зимы или в начале весны, проявляются первые симптомы заболеваний. Для тифулеза характерны: образование пятен в виде серой войлочной грибницы, побурение, увядание и потеря окраски листьев, разрушение узла кущения, формирование склероциев на отмерших тканях растений и почве. Симптомы фузариоза в этот же период внешне схожи: также появляются водянистые пятна с белым или розовым паутинистым налетом, но без образования склероциев. Склеротиниоз весной проявляется на листьях и стеблях в виде беловато-серого налета с ватообразными и хлопьевидными скоплениями, но склероции гораздо крупнее, чем при тифулезе, и в массе имеют черный, а не коричневый цвет. В результате болезни листовые пластинки, а также нижняя часть стебля загнивают, буреют и подсыхают, посевы изреживаются [68] (рис. 2).

С 1992 г. и по настоящее время в гольф-индустрии разных регионов США среди серьезных болезней листьев *Lolium perenne* упоминается пирикулярриоз, или серая пятнистость листьев, вызываемая *Pyricularia grisea* Cooke ex Sacc. В 1998 г. в Пенсильвании вспышка данного заболевания привела к потере более 90% газонного покрытия [71]. В том же году этот патоген был впервые зарегистрирован на *Festuca arundinacea* L. в Грузии [72].

На юго-востоке США [73] на видах рода *Agrostis* и на Кубе [74] на *Cynodon dactylon* в жаркие и сухие летние месяцы отмечается распространение *Chrysorhiza zae* (Voorhees) T.F. Andersen & Stalpers (ранее – *Rhizoctonia zae* Voorhees). Этот патоген является менее опасным и реже встречаемым, чем другие листовые пятнистости, однако в благоприятных условиях может приводить к выпадению травы и плохому весеннему отрастанию. В отличие от типичного возбудителя ризоктониозной гнили (*Rhizoctonia solani* J.G. Kühn), который поражает травы при высокой влажности и средних температур, вызывая образование больших пятен на покрытиях, *C. zae* вызывает «мини-кольца», или пятна, размером от 10 до 40 см в диаметре с внешним кольцом от бронзового до оранжевого цвета и зеленым центром.

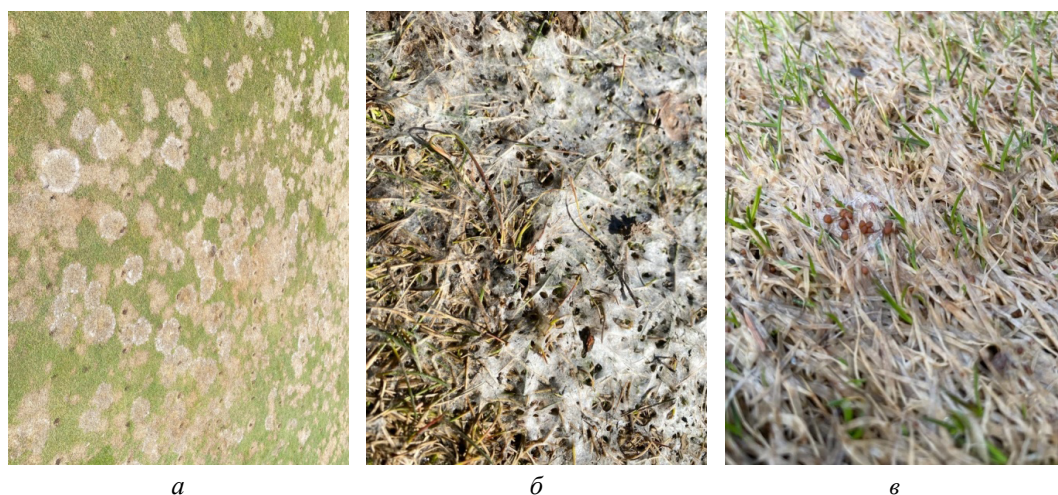


Рис. 2. Симптомы снежных плесеней на гольф-полях:
а – розовая снежная плесень; б – крапчатая снежная плесень; в-серая снежная плесень

Figure 2. Symptoms of snow mold on golf courses:
a – pink snow mold; b – speckled snow mold; c – gray snow mold

С середины XX в. в России, как и в странах Центральной Европы, а также в Англии, Канаде, Новой Зеландии и США, появились первые научные труды с описанием своеобразных повреждений в виде кольцеобразных выпадов травостоя – «ведьминых колец», как их называют в литературе» [1, 75]. Возбудителями заболевания выступают свыше 50 видов базидиомицетов [13], формирующих базидиокарпии (плодовые тела), широко известные как шампиньоны, поганки и дождевики. Наибольший ущерб причиняет гриб *Marasmius oreades* (Bolton) Fr., развитие которого приводит к серьезным повреждениям ввиду быстрого роста и токсичного уровня выделяемого им цианистого водорода [75].

Патоген образует три типа грибных кругов, размер которых может достигать от нескольких сантиметров до нескольких метров: «ведьмины кольца» типа 1 сильно повреждают или уничтожают траву. Видны два круга, состоящие из травы темно-зеленого цвета, между которыми расположено кольцо мертвого дерна. Кольца типа 2 заметнее, они стимулируют ускоренный рост и потемнение окраски травы. Иногда по периметру видны плодовые тела. К типу 3 относятся кольца, характеризующиеся участками высокой темно-зеленой травы и беспорядочно растущими грибами. Общим для всех типов является наличие под кольцом плотного сплетения белого мицелия с выраженным запахом плесени [76].

Помимо перечисленных болезней, есть сведения о единственном зарегистрированном бактериальном заболевании газонной травы, преимущественно встречающемся на участках для спортивных игр и гольф-полях Европы, Японии и США: бактериальное увядание листьев, возбудителем которого является грамотрицательная бактерия *Xanthomonas translucens* (син. *X. campestris*) [77]. Системный характер заболевания представляет повышенную угрозу, поскольку патоген поражает не отдельные части, а растение целиком, и встречается повсеместно. Исследователи из Мичиганского университета, США, отмечают, что бактерии проникают в растение-хозяин через раны после низкого скашивания газонного покрытия и нарушают поступление воды и питательных веществ, ввиду чего оно выглядит засушливым и приобретает синевато-фиолетовый оттенок. После этой непродолжительной стадии листья быстро буреют и сморщиваются; растения погибают в течение нескольких дней. Восприимчивыми видами являются *Agrostis stolonifera*, *Lolium perenne*, *Poa pratensis* и *P. annua*, реже – виды рода *Festuca* [78].

Известно, что вирусные инфекции не наносят серьезного ущерба спортивным газонам и являются малоизученным аспектом. Однако в зарубежной литературе описаны вирус желтой карликовости ячменя (*Barley yellow dwarf virus* (BYDV)) и вирус мозаики райграса (*Ryegrass mosaic virus* (RMV)) [79], которые могут приводить к ослаблению растений в газонном травостое и снижению их жизнеспособности.

Практика защиты спортивного газона от инфекционных болезней. Систематизированных данных по методам контроля заболеваний спортивных газонов в литературе нет, а в опубликованных работах они носят фрагментарный характер. Важными составляющими в борьбе с фитопатогенами на игровом травостое являются постоянный уход, регулярные осмотры в процессе фитосанитарного мониторинга и профилактические меры. Из агротехнических методов в борьбе со многими грибными инфекциями ключевую роль играют: выбор травосмесей, состоящих из устойчивых сортов; уборка растительных остатков; сбалансированное внесение удобрений; регулярное орошение и качественный дренаж; обязательная аэрация, которая особенно снижает вредоносность «ведьминых колец» [75]; увеличение высоты стрижки на низко скашиваемых участках полей.

Среди биологических пестицидов определенную эффективность в отношении питиозной, ризоктониозной и фузариозной гнилей, а также гельминоспориозной

пятнистости листьев, антракнозов и ржавчинных заболеваний демонстрируют некоторые полезные микроорганизмы-антагонисты, оказывая сдерживающее воздействие на патогены. Это, например, грибные и бактериальные препараты на основе отселектированных по агрессивности видов и штаммов *Trichoderma* spp.: Триходерма Вериде, СП, Трихоцин, СП, Глиокладин, СП [80, 81]; *Pseudomonas* spp.: Псевдобактерин-3, Ж, Биокомпозит-Про, Ж. Кроме того, в последние годы в России для подавления болезней газонных трав предложено использование биопрепарата Алирин Б, СП на основе штаммов *Bacillus subtilis* [82].

В мировой практике защиты газонов против комплекса грибных болезней рекомендуются фунгициды на основе пропиконазола, беномила, хлороталонила, карбендазима, триадимефона, пираклостробина вместе с эпоксиконазолом [83]. Также на спортивных газонах активно используются препараты на основе азоксистробина (например, Амистар Экстра, СК), который обеспечивает превентивный контроль, поэтому его лучше всего применять на ранней стадии цикла заболевания или до появления симптомов. Применяют фунгициды с действующим веществом тioenат-метила (например, Топсин-М, СК), который является действенным в качестве лечебного средства и часто используется, когда болезнь уже проявилась симптомами [84]. На гольф-полях и футбольных стадионах чаще всего используют готовые смеси пестицидов, содержащие два активных компонента и более, которые обеспечивают определенную защиту против резистентности к фунгицидам и, как правило, обладают более широким спектром действия против болезней газонов. Кроме того, при использовании смесей фунгицидов чаще наблюдается улучшение эффективности борьбы с болезнями за счет синергизма компонентов [85].

Имеются сведения о том, что в качестве профилактических средств положительный результат дает применение регуляторов роста на основе тринексапак-этила (например, Костандо, КЭ). Они помогают подготовить газон к стрессовым периодам, перенаправив углеводы на улучшение общего метаболизма и защитных процессов, а не только на рост листьев. Следует учитывать, что для повышения стрессоустойчивости растений обычно требуется несколько обработок иммуномодуляторами с интервалом в 1–3 недели [85].

В ноябре 2020 г. в России была создана Ассоциация агрономов по спортивным газонам, главная цель которой заключается в формировании высоких стандартов качества и культуры ухода за гольф- и футбольными полями [86]. В Бюллетенях Ассоциации сообщаются все последние новости данной индустрии включая новые эффективные меры борьбы в отношении доминирующих патогенов.

К сожалению, в настоящее время в Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации, фунгицидов на газонах явно недостаточно [87], что затрудняет разработку эффективной системы защиты культур и требует расширения ассортимента как биологических, так и химических препаратов.

Выводы

Conclusions

Во многих странах мира, включая Россию, предъявляются высокие требования к качеству и декоративности дернового покрытия спортивных газонов. В качестве газонных трав используются около 40 видов злаков. Значительный ущерб жизнеспособности газонных трав и качеству травостоя наносят болезни различной этиологии. Исследования инфекционных заболеваний спортивных газонов и их возбудителей проводятся во многих странах. В результате анализа источников литературы выявлено,

что в мире насчитывается около 20 основных заболеваний спортивных газонных травостоев, которые вызываются не менее чем 50 видами фитопатогенных грибов, одной фитопатогенной бактерией и двумя вирусами. Все эти патогены могут поражать все органы растений: листовой аппарат и корневую систему. Происходит изменение патоконспекса травостоя газонных трав, и наряду с распространенными заболеваниями спортивных газонов появляются относительно новые, включая антракнозы, пирикулярриоз, «ведьмины кольца» разной этиологии, получающие эпифитотийное распространение на газонах гольф-полей ряда стран в последние десятилетия. Большинство этих патогенов обладают высокой репродуктивной способностью и легко распространяются с водой и косилочным оборудованием, а некоторые передаются с зараженным семенным материалом.

В настоящее время российская практика защиты спортивных газонов от болезней недостаточно развита. Однако правильное использование фунгицидов в сочетании с применением передовых методов агротехники, способствующих повышению качества газона, может стать важной частью общей программы борьбы с болезнями. В связи с популяризацией здорового образа жизни, заинтересованностью населения спортом, положительной динамикой создания новых и усовершенствования старых игровых полей, и как следствие – потребностью в высококачественном травостое, остается актуальной разработка мер эффективного всестороннего контроля популяций фитопатогенов на газонных культурах.

Список источников

1. Сигалов Б.Я. *Долголетние газоны. Биологические основы культуры*. Москва: Наука, 1971. 311 с.
2. Келина А.В., Клемешова К.В. Наиболее распространенные проблемы газонных покрытий в зоне влажных субтропиков России и пути их решения // *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2014. № 51. С. 314–320. EDN: SXLH1H
3. Лаптев А.А. *Газоны*. Киев: Наукова думка, 1983. 176 с.
4. Катушова М.С., Генина Д.Д., Белошапкина О.О. Обзор фитопатогенных грибов травостоя спортивных газонов // *Международная научная конференция «Становление и развитие науки по защите и карантину растений в Республике Казахстан», посвященная 60-летию основания института и 100-летию научных исследований по защите растений в Казахстане*. 2018. С. 368-372
5. Miller Jr G. (Lee). Chapter 41 Turfgrass diseases. In: *Agrios' Plant Pathology*. Oliver R.P. (Ed). 6th ed. USA: Academic Press, 2024:823-828. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822429-8.00041-8>
6. Лазарев Н.Н., Уразбахтин З.М., Соколова В.В., Гусев М.А. *Газоны: устойчивость, долголетие, декоративность*. Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2016. 162 с. EDN: XWDJOD
7. Гречушкина-Сухорукова Л.А. Ассортимент газонных трав и состояние газонов в объектах озеленения г. Ставрополя // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2022. № 1. С. 12–25. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-1-12-26>
8. Катушова М.С., Белошапкина О.О., Калашников Д.В. Влияние фунгицидов и регуляторов роста на зараженность и качество спортивных газонов // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2020. № 2. С. 39–43. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/2/39-43>
9. Рынок спортивного газона // *Обеспечение глобальной рыночной аналитики*. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/global-sports-turf-market-report-2019-competitive-landscape-trends-and-opportunities/> (дата обращения: 10.03.2025)

10. Ассоциация гольфа России: Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://rusgolf.ru/ru> (дата обращения: 10.03.2025)
11. Российский футбольный союз: Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://rfs.ru/> (дата обращения: 10.03.2025)
12. Костенко С.И., Кулешов Г.Ф., Костенко Н.Ю. Перспективы и направления селекции газонных трав семейства Poaceae в Российской Федерации // *Доклады ТСХА*. 2005. Вып. 277. С. 391–395. EDN: VTCRGJ
13. Smiley R.W., Dernoeden P.H., Clarke B.C. *Compendium of Turfgrass Diseases*. 3rd ed. St. Paul, Minn., USA: APS Press, 2005:109.
14. Кулаковская Т.В., Костенко Е.С., Костенко С.И., Костенко Н.В. Исследования различных сортов отечественной и зарубежной селекции для создания газонов различного назначения // *Мелиорация*. 2006. № 1. С. 140–143. EDN: VIEIFX
15. Шутко А.П., Тутуржанс Л.В., Михно Л.А. *Болезни и вредители декоративных культур*: Учебное пособие. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2019. 120 с.
16. Белошапкина О.О., Катушова М.С. Доминирующий состав фитопатогенных грибов, ассоциирующихся с микозами спортивных газонов // *Аграрная наука*. 2019. № 2. С. 99–102. 17. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-99-102>
18. Stackhouse T., Martinez-Espinoza A.D., Ali M.E. Turfgrass Disease Diagnosis: Past, Present, and Future. *Plants*. 2020;9(11):1544. 19. <https://doi.org/10.3390/plants9111544>
20. Vargas J.M. *Management of Turfgrass Diseases*. (2nd ed.). Florida, USA: CRC Press, 1994:320. <https://doi.org/10.1201/9780203748374>
21. Peter H. *Dernoeden Creeping Bentgrass Management*. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 2012:378.
22. Blazier S.R., Conway K.E. Characterization of *Rhizoctonia solani* Isolates Associated with Patch Diseases on Turfgrass. *Proc. Okla. Acad. Sci.* 2004;84:41-51
23. Beloshapkina O.O., Katushova M.S., Kalashnikov D.V. Improving methods for preventing diseases of pasture grasses and securing the quality of feedstuff. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021;624:012150. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012150>
24. Лепкович И.П. *Газоны*: Учебное пособие. Москва; Санкт-Петербург: Диля, 2003. 237 с.
25. Gordon W.L. The occurrence of *Fusarium* species in Canada. VI. Taxonomy and geographic distribution of *Fusarium* species on plants, insects and fungi. *Can. J. of Bot.* 1959;37:257-290
26. Nelson E.B., Craft C.M. Identification and comparative pathogenicity of *Pythium* spp. from roots and crowns of turfgrasses exhibiting symptoms of root rot. *Phytopathology*. 1991;81:1529-1536
27. Freeman J., Ward E. *Gaeumannomyces graminis*, the take-all fungus and its relatives. *Molecular Plant Pathology*. 2004;5(4):235-252. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00226.x>
28. Григорьев М.Ф. Типы корневых гнилей зерновых культур и патогенные комплексы их возбудителей в Центральном Нечерноземье России // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2012. № 6. С. 87–100. EDN: PZFQHL
29. Palma-Guerrero J., Chancellor T., Spong J., Canning G. et al. Take-all disease: New insights into an important wheat root pathogen. *Trends Plant Sci.* 2021;26:836-848. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.009>
30. Ünal F., Kurbetli İ., Cavusoglu A., Sarpkaya K. Identification of *Gaeumannomyces* species in turfgrass areas and controlling the diseases by some

- endophytes as biological agents. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2023;21(4):3507-3520. http://doi.org/10.15666/aer/2104_35073520
31. Peixoto C., Ottoni G., Filippi M., Lobo V. et al. Biology of *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis* isolates from rice and grasses and epidemiological aspects of crown sheath rot of rice. *Tropical Plant Pathology*. 2013;38:495-504. <http://doi.org/10.1590/S1982-56762013000600005>
 32. Datnoff L.E., Elliott M.L., Krausz J.P. Cross Pathogenicity of *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis* from Bermudagrass St. Augustinegrass, and Rice in Florida and Texas. *Plant Dis*. 1997;81(10):1127-1131. <http://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.10.1127>
 33. Stephens C.M., Kerns Ja.P. First Report of *Gaeumannomyces graminicola* Causing Bermudagrass Decline of Ultradwarf Bermudagrass Putting Greens in North Carolina. *Plant Disease*. 2020;104(5):1552. <http://doi.org/10.1094/pdis-10-19-2147-pdn>
 34. Zidek M.J., Yu L., Jochum M., Jo Y.-K. Complexity of *Gaeumannomyces* species causing take-all root rot of St. Augustinegrass in Texas. *Mycologia*. 2021;113(3):599-611. <http://doi.org/10.1080/00275514.2021.1881735>
 35. Zidek M.J., Jo Y.-K. Fungicide Sensitivity of *Gaeumannomyces* Species Associated with Take-All Root Rot of St. Augustinegrass in Texas. *Plant Health Progress*. 2022;23(4):432-439. <https://doi.org/10.1094/PHP-12-21-0146-RS>
 36. Harvey P.R., Langridge P., Marshall D.R. Genetic drift and host-mediated selection cause genetic differentiation among *Gaeumannomyces graminis* populations infecting cereals in southern Australia. *Mycological Research*. 2001;105(8):927-935. <http://doi.org/10.1017/S0953756201004415>
 37. Ünal F., Kurbetli İ., Eğerci Y., Cavusoglu A. Effects of chemical fungicides combined with plant resistance inducers against *Bipolaris sorokiniana* in turfgrass. *Peer J*. 2025;13: e18943. <https://doi.org/10.7717/peerj.18943>
 38. Connally A., Smith D., Marek S., Wu Y. et al. Phylogenetic evaluation of *Bipolaris* and *Curvularia* species collected from turfgrasses. *Int Turfgrass Soc Res J*. 2022;14:916-930. <https://doi.org/10.1002/its2.16>
 39. Song X., Geng Y., Xu C. et al. The complete mitochondrial genomes of five critical phytopathogenic *Bipolaris* species: features, evolution, and phylogeny. *IMA Fungus*. 2024;15:15. <https://doi.org/10.1186/s43008-024-00149-6>
 40. Sivanesan A. *Graminicolous species of Bipolaris, Curvularia, Drechslera, Exserohilum and their teleomorphs (Mycological Papers)*. UK: C.A.B. International Mycological Institute, 1987:261
 41. Macedo D.M., Barreto R.W. First report of leaf blight of *Brachiaria brizantha* in Brazil caused by *Bipolaris cynodontis*. *Plant Pathology*. 2007;56:1041. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01632.x>
 42. Fang K.F., Huang J.B., Hsiang T. First report of brown leaf spot caused by *Bipolaris australiensis* on *Cynodon* spp. in China. *Plant Pathology*. 2007;56:349. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01538.x>
 43. Jørgensen L., Olsen L.V. Control of tan spot (*Drechslera tritici-repentis*) using cultivar resistance, tillage methods and fungicides. *Crop Protection*. 2007;26:1606-1616. <http://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.01.009>
 44. Katushova M.S., Beloshapkina O.O., Tarakanov R.I., Shipulin A.V. et al. Fungi of the genus *Curvularia* sp. – new pathogens of turfgrass in Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;663:012007. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/663/1/012007>
 45. Чулкина В.А., Торопова Е.Ю., Стецов Г.Я. *Экологические основы интегрированной защиты растений: Учебник*. Москва: Колос, 2007. 568 с.

46. Li F., Guo Y., Christensen M.J. et al. An arbuscular mycorrhizal fungus and *Epichloë festucae* var. *lolii* reduce *Bipolaris sorokiniana* disease incidence and improve perennial ryegrass growth. *Mycorrhiza*. 2018;28:159-169. <http://doi.org/10.1007/s00572-017-0813-9>
47. Beirn L.A., Moy M., Meyer W.A., Clarke B.B. et al. Molecular Analysis of Turfgrass Rusts Reveals the Widespread Distribution of *Puccinia coronata* as a Pathogen of Kentucky Bluegrass in the United States. *Plant Disease*. 2011;95:12:1547-1557. <http://doi.org/10.1094/PDIS-01-11-0073>
48. Heineck G.C., Ehlke N.J., Watkins E. Predictive ability of perennial ryegrass spaced-plant nurseries for turfgrass and seed production swards in Minnesota. *Crop Science*. 2021;61(5):2997-3010. <http://doi.org/10.1002/csc.2.20278>
49. Ünal F., Tülek S. Türkiye'deki çim alanlarında *Puccinia* spp.nin qPCR analizi. *Bitki Koruma Bülteni*. 2023;63(4):66-70. <http://doi.org/10.16955/bitkorb.1365353>
50. Afshan N.U.S., Khalid A.N., Niazi A. New records of graminicolous rust fungi from Pakistan. *Mycotaxon North-East*. 2008;104:123-130
51. Куратова И.О., Буроличев И.В., Демидова А.П., Ташина С.В. Вредоносность ржавчинных заболеваний городских газонов // *Вестник ландшафтной архитектуры*. 2024. № 37. С. 61–64. EDN: SUQULF
52. Romani M., Piano E., Pecetti L. Collection and preliminary evaluation of native turfgrass accessions in Italy. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2002;49:341-349. <https://doi.org/10.1023/A:1020655815121>
53. *Plant Relationships: Fungal-Plant Interactions*. Scott B., Mesarich C. (Eds). 3rd ed. Berlin, Germany: Springer, 2009:484.
54. Abbasi M., Hedjaroude G., Ershad D. A study of the species of *Puccinia* parasitizing *Arundineae* (*Poaceae*) in Iran. *15th Plant Protection Congress of Iran. September 7-11, 2002*. Kermanshah, Iran, 2002:175. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.14682.47040>
55. Chen X. Research Progress on Disease Prevention and Treatment of Poa Common Community Greening Turfgrass. *Advances in Engineering Technology Research*. 2024;12(1):927. <http://doi.org/10.56028/aetr.12.1.927.2024>
56. Sung C., Lee J., Koo J., Hong J. et al. Different Responses of Zoysiagrass (*Zoysia* spp.) Ecotypes against *Puccinia zoysiae* Causing Rust Disease in Field. *Weed & Turfgrass Science*. 2016;5:256-259. <http://doi.org/10.5660/WTS.2016.5.4.256>
57. Tsuchida T., Yamaga A., Mitsuho T., Shingu Y. et al. Development of PCR primer kits for seasonal diagnosis of turfgrass diseases. *Bull. School Agric*. 2006;55:81-97
58. Crouch J.A., Beirn L.A. Anthracnose of cereals and grasses. *Fungal Diversity*. 2009;39(19):19-44
59. Khan A., Hsiang T. The infection process of *Colletotrichum graminicola* and relative aggressiveness on four turfgrass species. *Canadian Journal of Microbiology*. 2003;49(7):433-442. <https://doi.org/10.1139/w03-059>
60. Back P.A., Landschoot P.J., Huff D.R. Variation in Pathogenicity, Morphology, and RAPD Marker Profiles in *Colletotrichum graminicola* from Turfgrasses. *Crop Science*. 1999;39:1129-1135. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900040030x>
61. Ünal F. First detection of colletotrichum cereale caused anthracnose in turfgrass areas in Türkiye. *International Biological & Life Sciences Congress. October 30 – November 1, 2024*. Antalya, Turkey, 2024:151-158.
62. Young J.R., Tomaso-Peterson M., Crouch J.A. First Report of *Colletotrichum cereale* Causing Anthracnose Foliar Blight of Creeping Bentgrass in Mississippi and Alabama. *Plant Dis*. 2008;92(10):1475. <http://doi.org/10.1094/PDIS-92-10-1475A>
63. Czembor E., Feuerstein U., Zurek G. Powdery mildew resistance in Kentucky bluegrass ecotypes from Poland. *Plant Breed. Seed Sci*. 2001;45:21-32

64. Teuteberg A. Ein Beitrag Zum Auftreten von Blattfleckenerregern an Der Wiesenrispe (*Poa pratensis* L.) [A Contribution to the Occurrence of Leaf Spot Fungi on Kentucky Bluegrass (*Poa pratensis* L.)]. *Zeitschrift Für Pflanzenkrankheiten Und Pflanzenschutz [Journal of Plant Diseases and Protection]*. 1974;81(11):690-701. (In Germ.) <http://www.jstor.org/stable/43213841>
65. Zhu M., Ji J., Shi W., Li Y.-F. Occurrence of powdery mildew caused by *Blumeria graminis* f. sp. *poae* on *Poa pratensis* in China. *Plant Dis.* 2020;105:1212. <http://doi.org/10.1094/PDIS-09-20-2051-PDN>
66. Voytyuk S.O., Heluta V.P., Wasser S.P., Nevo E. *Biodiversity of the Powdery Mildew Fungi (Erysiphales, Ascomycetes) of Israel*. A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2009:290
67. Bao G.S., Wei X.X., Liu W.H. First Report of Powdery Mildew Caused by *Blumeria graminis* on *Poa pratensis* var. *anceps* 'Qinghai' in China. *Plant Disease*. 2022;106(4):1294. <http://doi.org/10.1094/PDIS-03-21-0608-PDN>
68. Inuma T., Khodaparast S.A., Takamatsu S. Multilocus phylogenetic analyses within *Blumeria graminis*, a powdery mildew fungus of cereals. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2007;44:741-751. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2007.01.007>
69. Menardo F., Praz C.R., Wyder S., Ben-David R. et al. Hybridization of powdery mildew strains gives rise to pathogens on novel agricultural crop species. *Nat. Genet.* 2016;48:201-205. <https://doi.org/10.1038/ng.3485>
70. Ткаченко О.Б. *Снежные плесени: история изучения, возбудители, их биологические особенности*: Монография. Москва: Российская академия наук, 2017. 72 с.
71. Hsiang T., Matsumoto N., Millett S.M. Biology and Management of Typhula Snow Molds of Turfgrass. *Plant Dis.* 1999;83(9):788-798. <http://doi.org/10.1094/PDIS.1999.83.9.788>
72. Горьковенко В.С., Оберюхтина Л.А., Куркина Е.А. Вредоносность гриба *Microdochium nivale* в агроценозе озимой пшеницы // *Защита и карантин растений*. 2009. № 1. С. 34–35. EDN: KXUXCV
73. Sitther V., Wu B., Kang S., Uddin W. et al. *Pyricularia grisea* Causing Gray Leaf Spot of Perennial Ryegrass Turf: Population Structure and Host Specificity. *Plant Disease*. 2001;85:817-826. <http://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.8.817>
74. Uddin W., Burpee L.L., Stevenson K.L. Influence of temperature and leaf wetness duration on development of gray leaf spot (blast) of tall fescue. *Phytopathology*. 1998;88: S90
75. Dant L.A. *Etiology and Epidemiology of Mini-ring in Ultradwarf Bermudagrass Putting Greens*: PhD Thesis. Clemson, South Carolina, USA, 2022: XIV;130
76. González García M., Ramos Ramos E., Ramírez Ochoa R. First report of *Chrysorhiza zae* (Voorhes) Andersen and stalpers causing necrotic lesions on *Cynodon dactylon* (L.) Pers. in Cuba. *Fitosanidad*. 2008;12(3):143-146
77. Fidanza M.F. New insight on fairy ring. *Golf Course Management*. 2007;75(3):107-110
78. Fidanza M.F., Wong F.P., Martin B., McDonald S. Treating fairy ring with fungicides, new soil surfactant. *Golf Course Management*. 2007;75(5):121-125
79. Dernoeden P.H., Jackson N., Mitkowski N., Kaminski J.E. Bacterial wilt: An enigmatic annual bluegrass disease of putting greens. *Golf Course Manage*. 2002:177-180
80. Channon A.G., Hissett R. The incidence of bacterial wilt caused by *Xanthomonas campestris* pv. *graminis* in pasture grasses in the West of Scotland. *Plant Pathology*. 1984;33:113-121. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1984.tb00594.x>

81. Farquhar M., Winefield C., Eady C. Dry matter yield and the prevalence of barley yellow dwarf and ryegrass mosaic viruses in old and young perennial ryegrass. *Journal of New Zealand Grasslands*. 2017;79:165-171. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2017.79.571>
82. Shahoveisi F. *Turfgrass Diseases: Pythium Blight* (FS-2024-0707). University of Maryland Extension. 22.10.2024. URL: <https://extension.umd.edu/resource/turfgrass-diseases-pythium-blight-fs-2024-0707>
83. Yao X., Guo H., Zhang K., Zhao M. et al. Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*. 2023;14:1160551. <http://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>
84. Усова О.Н., Штерншис М.В., Леляк А.А. Влияние биопрепарата фитоп 8.67 на возбудителя корневой гнили газонной травы // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 10. С. 10–12. EDN: OIYBEX
85. Правила по уходу за газоном футбольного поля // ООО «Гринпитч»: Официальный сайт. 37 с. URL: <https://greenpitch.ru/pdf/book/pravila-po-uhodu-za-naturalnim-gazonom.pdf>
86. Benedetto D., Hsiang. T. Effects of Azoxystrobin on Microbial Population of Turf Grass Phyllosphere. *University of Guelph*. 2006:43. URL: <https://atrium.lib.uoguelph.ca/items/ad02d7d1-6e4b-42f4-92ad-7d5e7dccc06> (дата обращения: 10.03.2025)
87. Clarke B.B., Vincelli P., Koch P., Chou M.-Y. Chemical Control of Turfgrass Diseases 2024. *Agriculture and Natural Resources Publications*. 2024;185. <https://publications.ca.uky.edu/files/PPA1.pdf> (дата обращения: 10.03.2025)
88. Ассоциация агрономов по спортивным газонам: Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://russiangureenkeeping.ru/> (дата обращения: 10.03.2025)
89. Белошапкина О.О., Катушова М.С. Скрининг пестицидов для повышения всхожести и снижения зараженности семян газонных трав // Кормопроизводство. 2019. № 10. С. 37–42. EDN: RAPLVA

References

1. Sigalov B.Ya. *Long-lasting lawns. Biological foundations of culture*. Moscow, USSR: Nauka, 1971:311. (In Russ.)
2. Kelina A.V., Klemeshova K.V. common problems with lawns in Russian humid subtropics and solutions. *Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo*. 2014;(51):314-320. (In Russ.)
3. Laptev A.A. *Lawns*. Kyiv, Ukrainian SSR: Nauk. Dumka, 1983:176. (In Russ.)
4. Katushova M.S., Genina D.D., Beloshapkina O.O. Review of phytopathogenic fungi of sports lawn grass. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya 'Stanovlenie i razvitie nauki po zashchite i karantinu rasteniy v Respublike Kazakhstan.'* December 06, 2018. Almaty, Kazakhstan: Kazakhskiy nauchno-issledovatel'skiy institut zashchity i karantina rasteniy imeni Zhazkena Zhiembraeva, 2018:368-372. (In Russ.)
5. Miller Jr G. (Lee). Chapter 41 Turfgrass diseases. In: *Agrios' Plant Pathology*. Oliver R.P. (Ed). 6th ed. USA: Academic Press, 2024:823-828. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822429-8.00041-8>
6. Lazarev N.N., Urazbakhtin Z.M., Sokolova V.V., Gusev M.A. *Lawns: stability, longevity, decorativeness*. Moscow, Russia: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2016:162. (In Russ.)

7. Grechushkina-Sukhorukova L.A. Range of lawn grasses and the state of lawns in the landscaping facilities of Stavropol. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2022;(1):12-26. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-1-12-26>
8. Katushova M.S., Beloshapkina O.O., Kalashnikov D.V. Fungicides, biopreparations and growth regulators impact on sport lawns contamination and quality. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2020;(2):39-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/2/39-43>
9. Sports turf market. Providing global market analytics. (In Russ.) URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/global-sports-turf-market-report-2019-competitive-landscape-trends-and-opportunities/> (accessed: March 10, 2025).
10. Russian Golf Association: Official website. (In Russ.) URL: <https://rusgolf.ru/ru> (accessed: March 10, 2025).
11. Russian Football Union: Official website. (In Russ.) URL: <https://rfs.ru/> (accessed: March 10, 2025).
12. Kostenko S.I., Kuleshov G.F., Kostenko N.Yu. Prospects and directions of selection of lawn grasses of the Poaceae family in the Russian Federation. *Doklady TSKhA*. 2005;(277):391-395. (In Russ.)
13. Smiley R.W., Dernoeden P.H., Clarke B.C. *Compendium of Turfgrass Diseases*. 3rd ed. St. Paul, Minn., USA: APS Press, 2005:109.
14. Kulakovskaya T.V., Kostenko E.S., Kostenko S.I., Kostenko N.V. Investigations of different varieties of domestic and foreign selections for building lawns having different purposes. *Melioratsia*. 2006;(1):140-143. (In Russ.)
15. Shutko A.P., Tuturzhans L.V., Mikhno L.A. *Diseases and pests of ornamental crops: a textbook*. Stavropol, Russia: Stavropol State Agrarian University, 2019:120. (In Russ.)
16. Beloshapkina O.O., Katushova M.S. The dominant composition of phytopathogenic fungi associated with fungal infections of the sports turf. *Agrarian Science*. 2019;(2):99-102. (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-99-102>
17. Stackhouse T., Martinez-Espinoza A.D., Ali M.E. Turfgrass Disease Diagnosis: Past, Present, and Future. *Plants*. 2020;9(11):1544. <https://doi.org/10.3390/plants9111544>
18. Vargas J.M. *Management of Turfgrass Diseases*. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 1994:320. <https://doi.org/10.1201/9780203748374>
19. Peter H. *Dernoeden Creeping Bentgrass Management*. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 2012:378.
20. Blazier S.R., Conway K.E. Characterization of *Rhizoctonia solani* Isolates Associated with Patch Diseases on Turfgrass. *Proc. Okla. Acad. Sci.* 2004;84:41-51.
21. Beloshapkina O.O., Katushova M.S., Kalashnikov D.V. Improving methods for preventing diseases of pasture grasses and securing the quality of feedstuff. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021;624:012150. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012150>
22. Lepkovich I.P. *Lawns: a textbook*. Moscow, Saint Petersburg, Russia: Dilya, 2003:237. (In Russ.)
23. Gordon W.L. The occurrence of *Fusarium* species in Canada. VI. Taxonomy and geographic distribution of *Fusarium* species on plants, insects and fungi. *Can. J. of Bot.* 1959;37:257-290.
24. Nelson E.B., Craft C.M. Identification and comparative pathogenicity of *Pythium* spp. from roots and crowns of turfgrasses exhibiting symptoms of root rot. *Phytopathology*. 1991;81:1529-1536.
25. Freeman J., Ward E. *Gaeumannomyces graminis*, the take-all fungus and its relatives. *Molecular Plant Pathology*. 2004;5(4):235-252. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00226.x>

26. Grigoriev M.F. Types of root rots affecting grain crops and pathogenic complexes of their causative agents in Central Non-Black Soil Zone of Russia. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2012;(6):87-100. (In Russ.)
27. Palma-Guerrero J., Chancellor T., Spong J., Canning G. et al. Take-all disease: New insights into an important wheat root pathogen. *Trends Plant Sci.* 2021;26:836-848. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.009>
28. Ünal F., Kurbetli İ., Cavusoglu A., Sarpkaya K. Identification of *Gaeumannomyces* species in turfgrass areas and controlling the diseases by some endophytes as biological agents. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2023;21(4):3507-3520. http://doi.org/10.15666/aeer/2104_35073520
29. Peixoto C., Ottoni G., Filippi M., Lobo V. et al. Biology of *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis* isolates from rice and grasses and epidemiological aspects of crown sheath rot of rice. *Tropical Plant Pathology*. 2013;38:495-504. <http://doi.org/10.1590/S1982-56762013000600005>
30. Datnoff L.E., Elliott M.L., Krausz J.P. Cross Pathogenicity of *Gaeumannomyces graminis* var. *graminis* from Bermudagrass St. Augustinegrass, and Rice in Florida and Texas. *Plant Dis.* 1997;81(10):1127-1131. <http://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.10.1127>
31. Stephens C.M., Kerns J.A.P. First Report of *Gaeumannomyces graminicola* Causing Bermudagrass Decline of Ultradwarf Bermudagrass Putting Greens in North Carolina. *Plant Disease*. 2020;104(5):1552. <http://doi.org/10.1094/pdis-10-19-2147-pdn>
32. Zidek M.J., Yu L., Jochum M., Jo Y.-K. Complexity of *Gaeumannomyces* species causing take-all root rot of St. Augustinegrass in Texas. *Mycologia*. 2021;113(3):599-611. <http://doi.org/10.1080/00275514.2021.1881735>
33. Zidek M.J., Jo Y.-K. Fungicide Sensitivity of *Gaeumannomyces* Species Associated with Take-All Root Rot of St. Augustinegrass in Texas. *Plant Health Progress*. 2022;23(4):432-439. <https://doi.org/10.1094/PHP-12-21-0146-RS>
34. Harvey P.R., Langridge P., Marshall D.R. Genetic drift and host-mediated selection cause genetic differentiation among *Gaeumannomyces graminis* populations infecting cereals in southern Australia. *Mycological Research*. 2001;105(8):927-935. <http://doi.org/10.1017/S0953756201004415>
35. Ünal F., Kurbetli İ., Eğerci Y., Cavusoglu A. Effects of chemical fungicides combined with plant resistance inducers against *Bipolaris sorokiniana* in turfgrass. *Peer J*. 2025;13: e18943. <https://doi.org/10.7717/peerj.18943>
36. Connally A., Smith D., Marek S., Wu Y. et al. Phylogenetic evaluation of *Bipolaris* and *Curvularia* species collected from turfgrasses. *Int Turfgrass Soc Res J*. 2022;14:916-930. <https://doi.org/10.1002/its2.16>
37. Song X., Geng Y., Xu C. et al. The complete mitochondrial genomes of five critical phytopathogenic *Bipolaris* species: features, evolution, and phylogeny. *IMA Fungus*. 2024;15:15. <https://doi.org/10.1186/s43008-024-00149-6>
38. Sivanesan A. *Graminicolous species of Bipolaris, Curvularia, Drechslera, Exserohilum and their teleomorphs* (Mycological Papers). UK: C.A.B. International Mycological Institute, 1987:261.
39. Macedo D.M., Barreto R.W. First report of leaf blight of *Brachiaria brizantha* in Brazil caused by *Bipolaris cynodontis*. *Plant Pathology*. 2007;56:1041. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01632.x>
40. Fang K.F., Huang J.B., Hsiang T. First report of brown leaf spot caused by *Bipolaris australiensis* on *Cynodon* spp. in China. *Plant Pathology*. 2007;56:349. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01538.x>

41. Jørgensen L., Olsen L.V. Control of tan spot (*Drechslera tritici-repentis*) using cultivar resistance, tillage methods and fungicides. *Crop Protection*. 2007;26:1606-1616. <http://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.01.009>
42. Katushova M.S., Beloshapkina O.O., Tarakanov R.I., Shipulin A.V. et al. Fungi of the genus *Curvularia* sp. – new pathogens of turfgrass in Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;663:012007. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/663/1/012007>
43. Chulkina V.A., Toropova E.Yu., Stetsov G.Ya. *Ecological foundations of integrated plant protection*: a textbook. Moscow, Russia: Kolos, 2007:568. (In Russ.)
44. Li F., Guo Y., Christensen M.J. et al. An arbuscular mycorrhizal fungus and *Epichloë festucae* var. *lolii* reduce *Bipolaris sorokiniana* disease incidence and improve perennial ryegrass growth. *Mycorrhiza*. 2018;28:159-169. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0813-9>
45. Beirn L.A., Moy M., Meyer W.A., Clarke B.B. et al. Molecular Analysis of Turfgrass Rusts Reveals the Widespread Distribution of *Puccinia coronata* as a Pathogen of Kentucky Bluegrass in the United States. *Plant Disease*. 2011;95:12:1547-1557. <http://doi.org/10.1094/PDIS-01-11-0073>
46. Heineck G.C., Ehlke N.J., Watkins E. Predictive ability of perennial ryegrass spaced-plant nurseries for turfgrass and seed production swards in Minnesota. *Crop Science*. 2021;61(5):2997-3010. <http://doi.org/10.1002/csc2.20278>
47. Ünal F., Tülek S. Türkiye'deki çim alanlarında *Puccinia* spp.nin qPCR analizi [qPCR analysis of *Puccinia* spp. in turfgrass areas in Türkiye]. *Bitki Koruma Bülteni [Plant Protection Bulletin]*. 2023;63(4):66-70. <http://doi.org/10.16955/bitkorb.1365353>
48. Afshan N.U.S., Khalid A.N., Niazi A. New records of graminicolous rust fungi from Pakistan. *Mycotaxon North-East*. 2008;104:123-130.
49. Kuratova I.O., Burolichev I.V., Demidova A.P., Tazina S.V. The harmfulness of rust diseases of urban lawns. *Vestnik landshaftnoy arkhitektury*. 2024;(37):61-64. (In Russ.)
50. Romani M., Piano E., Pecetti L. Collection and preliminary evaluation of native turfgrass accessions in Italy. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2002;49:341-349. <https://doi.org/10.1023/A:1020655815121>
51. *Plant Relationships: Fungal-Plant Interactions*. Scott B., Mesarich C. (Eds). 3rd ed. Berlin, Germany: Springer, 2009:484.
52. Abbasi M., Hedjaroude G., Ershad D. A study of the species of *Puccinia* parasitizing *Arundineae* (*Poaceae*) in Iran. *15th Plant Protection Congress of Iran. September 7-11, 2002*. Kermanshah, Iran, 2002:175. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.14682.47040>
53. Chen X. Research Progress on Disease Prevention and Treatment of Poa Common Community Greening Turfgrass. *Advances in Engineering Technology Research*. 2024;12(1):927. <http://doi.org/10.56028/aetr.12.1.927.2024>
54. Sung C., Lee J., Koo J., Hong J. et al. Different Responses of Zoysiagrass (*Zoysia* spp.) Ecotypes against *Puccinia zoysiae* Causing Rust Disease in Field. *Weed & Turfgrass Science*. 2016;5:256-259. <http://doi.org/10.5660/WTS.2016.5.4.256>
55. Tsuchida T., Yamaga A., Mitsuohori T., Shingu Y. et al. Development of PCR primer kits for seasonal diagnosis of turfgrass diseases. *Bull. School Agric*. 2006;55:81-97.
56. Crouch J.A., Beirn L.A. Anthracnose of cereals and grasses. *Fungal Diversity*. 2009;39(19):19-44.
57. Khan A., Hsiang T. The infection process of *Colletotrichum graminicola* and relative aggressiveness on four turfgrass species. *Canadian Journal of Microbiology*. 2003;49(7):433-442. <https://doi.org/10.1139/w03-059>
58. Back P.A., Landschoot P.J., Huff D.R. Variation in Pathogenicity, Morphology, and RAPD Marker Profiles in *Colletotrichum graminicola* from Turfgrasses. *Crop Science*. 1999;39:1129-1135. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900040030x>

59. Ünal F. First detection of colletotrichum cereale caused anthracnose in turfgrass areas in Türkiye. *International Biological & Life Sciences Congress. October 30 – November 1, 2024*. Antalya, Turkey, 2024:151-158.
60. Young J.R., Tomaso-Peterson M., Crouch J.A. First Report of Colletotrichum cereale Causing Anthracnose Foliar Blight of Creeping Bentgrass in Mississippi and Alabama. *Plant Dis.* 2008;92(10):1475. <http://doi.org/10.1094/PDIS-92-10-1475A>
61. Czembor E., Feuerstein U., Zurek G. Powdery mildew resistance in Kentucky bluegrass ecotypes from Poland. *Plant Breed. Seed Sci.* 2001;45:21-32.
62. Teuteberg A. Ein Beitrag Zum Auftreten von Blattfleckenenerregern an Der Wiesenrispe (*Poa pratensis* L.) [A Contribution to the Occurrence of Leaf Spot Fungi on Kentucky Bluegrass (*Poa pratensis* L.)]. *Zeitschrift Für Pflanzenkrankheiten Und Pflanzenschutz [Journal of Plant Diseases and Protection]*. 1974;81(11):690-701. (In Germ.) <http://www.jstor.org/stable/43213841>
63. Zhu M., Ji J., Shi W., Li Y.-F. Occurrence of powdery mildew caused by *Blumeria graminis* f. sp. *poae* on *Poa pratensis* in China. *Plant Dis.* 2020;105:1212. <http://doi.org/10.1094/PDIS-09-20-2051-PDN>
64. Voytyuk S.O., Heluta V.P., Wasser S.P., Nevo E. *Biodiversity of the Powdery Mildew Fungi (Erysiphales, Ascomycetes) of Israel*. A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2009:290.
65. Bao G.S., Wei X.X., Liu W.H. First Report of Powdery Mildew Caused by *Blumeria graminis* on *Poa pratensis* var. *anceps* 'Qinghai' in China. *Plant Disease*. 2022;106(4):1294. <http://doi.org/10.1094/PDIS-03-21-0608-PDN>
66. Inuma T., Khodaparast S.A., Takamatsu S. Multilocus phylogenetic analyses within *Blumeria graminis*, a powdery mildew fungus of cereals. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2007;44:741-751. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2007.01.007>
67. Menardo F., Praz C.R., Wyder S., Ben-David R. et al. Hybridization of powdery mildew strains gives rise to pathogens on novel agricultural crop species. *Nat. Genet.* 2016;48:201-205. <https://doi.org/10.1038/ng.3485>
68. Tkachenko O.B. *Snow molds: history of study, pathogens, their biological characteristics: a monograph*. Moscow, Russia: Russian Academy of Sciences, 2017:72. (In Russ.)
69. Hsiang T., Matsumoto N., Millett S.M. Biology and Management of Typhula Snow Molds of Turfgrass. *Plant Dis.* 1999;83(9):788-798. <http://doi.org/10.1094/PDIS.1999.83.9.788>
70. Gorkovenko V.S., Oberyukhtina L.A., Kurkina E.A. Harmfulness of the fungus *Microdochium nivale* in the agrocenosis of winter wheat. *Plant Protection and Quarantine*. 2009;(1):34-35. (In Russ.)
71. Sitther V., Wu B., Kang S., Uddin W. et al. *Pyricularia grisea* Causing Gray Leaf Spot of Perennial Ryegrass Turf: Population Structure and Host Specificity. *Plant Disease*. 2001;85:817-826. <http://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.8.817>
72. Uddin W., Burpee L.L., Stevenson K.L. Influence of temperature and leaf wetness duration on development of gray leaf spot (blast) of tall fescue. *Phytopathology*. 1998;88: S90.
73. Dant L.A. *Etiology and Epidemiology of Mini-ring in Ultradwarf Bermudagrass Putting Greens*: PhD Thesis. Clemson, South Carolina, USA, 2022: XIV,130.
74. González García M., Ramos Ramos E., Ramírez Ochoa R. First report of *Chrysorhiza zae* (Voorhes) Andersen and stalpers causing necrotic lesions on *Cynodon dactylon* (L.) Pers. in Cuba. *Fitosanidad*. 2008;12(3):143-146.
75. Fidanza M.F. New insight on fairy ring. *Golf Course Management*. 2007;75(3):107-110.

76. Fidanza M.F., Wong F.P., Martin B., McDonald S. Treating fairy ring with fungicides, new soil surfactant. *Golf Course Management*. 2007;75(5):121-125.
77. Dernoeden P.H., Jackson N., Mitkowski N., Kaminski J.E. Bacterial wilt: An enigmatic annual bluegrass disease of putting greens. *Golf Course Manage.* 2002:177-180.
78. Channon A.G., Hissett R. The incidence of bacterial wilt caused by *Xanthomonas campestris* pv. *graminis* in pasture grasses in the West of Scotland. *Plant Pathology*. 1984;33:113-121. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1984.tb00594.x>
79. Farquhar M., Winefield C., Eady C. Dry matter yield and the prevalence of barley yellow dwarf and ryegrass mosaic viruses in old and young perennial ryegrass. *Journal of New Zealand Grasslands*. 2017;79:165-171. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2017.79.571>
80. Shahoveisi F. *Turfgrass Diseases: Pythium Blight* (FS-2024-0707). University of Maryland Extension. 22.10.2024. URL: <https://extension.umd.edu/resource/turfgrass-diseases-pythium-blight-fs-2024-0707>
81. Yao X., Guo H., Zhang K., Zhao M. et al. Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*. 2023;14:1160551. <http://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>
82. Usova O.N., Shternshis M.V., Lelyak A.A. The influence of biopreparation Phytop 8.67 on causing agent of turfgrass root rot. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2011;(10):10-12. (In Russ.)
83. *Rules for the care of the lawn of a football field*. Greenpitch LLC: Official website. (In Russ.) URL: <https://greenpitch.ru/pdf/book/pravila-po-uhodu-za-naturalnim-gazonom.pdf>
84. Benedetto D., Hsiang. T. Effects of Azoxystrobin on Microbial Population of Turf Grass Phyllosphere. *University of Guelph*. 2006:43. URL: <https://atrium.lib.uoguelph.ca/items/ad02d7d1-6e4b-42f4-92ad-7d5e7dcca06> (accessed: October 03, 2025).
85. Clarke B.B., Vincelli P., Koch P., Chou M.-Y. Chemical Control of Turfgrass Diseases 2024. *Agriculture and Natural Resources Publications*. 2024;185. <https://publications.ca.uky.edu/files/PPA1.pdf> (accessed: March 10, 2025).
86. Association of sports turf Agronomists: Official website. (In Russ.) URL: <https://russiangureenkeeping.ru/> (accessed: March 10, 2025).
87. Beloshapkina O.O., Katushova M.S. Germination ability and disease resistance of turfgrasses as affected by different pesticides. *Kormoproizvodstvo*. 2019;(10):37-42. (In Russ.)

Сведения об авторах

Алена Павловна Демидова, аспирант, ассистент кафедры ландшафтной архитектуры, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: a.demidova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2522-2470>

Ольга Олеговна Белошапкина, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры защиты растений, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская

Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: beloshapkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8564-8142>

Ольга Вячеславовна Корякина, канд. биол. наук, старший преподаватель кафедры ландшафтной архитектуры, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: okoryakina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6890-4562>

Information about the authors

Alena P. Demidova, postgraduate student, Assistant at the Department of Landscape Architecture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: a.demidova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2522-2470>

Olga O. Beloshapkina, DSc (Ag), Professor, Professor at the Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: beloshapkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8564-8142>

Olga V. Koryakina, CSc (Bio), Assistant at the Department of Landscape Architecture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: okoryakina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6890-4562>

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Сохранность возбудителей болезней томата и сопутствующих микроорганизмов на шпалерах после трехлетней перезимовки

Сергей Яковлевич Попов[✉], Алексей Николаевич Смирнов

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: sergei_ya_popov@mail.ru

Аннотация

Определяли сохранность возбудителей болезней томата (*Solanum lycopersicum* L.) на древесных шпалерах и подвязочных средствах к ним после 3-летней перезимовки и хранения под открытым небом с последующим 9-месячным хранением при положительной температуре в помещении. Первично шпалеры использовались на участке с растениями томата 9 сортов и гибридов во время эпифитотии патогенов в 2021 г. в Кимрском районе Тверской области. Шпалеры представляли собой стебли мискантуса и деревянные рейки с подвязочным материалом (шпагатом). Микроорганизмы выявляли путем смыва со шпалер и подвязочных средств с последующим анализом под микроскопом Ломо Микмед с цифровой камерой. Сохранность микроорганизмов оценивали через показатель заселенность, %, шпалер и подвязочных средств живыми патогенами и сопутствующими микроорганизмами. После обозначенного периода хранения были обнаружены патогены *Cladosporium fulvum*, *Alternaria alternata*, *Phytophthora infestans*, *Phoma* spp., *Epicoccum* spp., а также микроорганизмы *Trimmatostroma* spp., протококковые водоросли (*Protococophyceae*), сине-зеленые водоросли (*Cyanobacteria*). За 3-летний период хранения шпалер выпало около 2030 мм осадков, минимальная температура достигала –31,9°C. После 3 лет перезимовки под открытым небом на шпалерах сохранились по меньшей мере 4 основных возбудителя заболеваний томата. Экспериментальные данные по столь длительному сохранению инфекции томата на шпалерах получены впервые и нацеливают на введение в рекомендации по выращиванию томата на шпалерах мер по уничтожению использованных шпалер и подвязочных средств или тотальному их обеззараживанию после уборки урожая.

Ключевые слова

Томат, сорта, гибриды, болезни томата, *Cladosporium fulvum*, *Alternaria alternata*, *Phytophthora infestans*, *Phoma*, *Epicoccum*, перезимовка, шпалеры

Для цитирования

Попов С.Я., Смирнов А.Н. Сохранность возбудителей болезней томата и сопутствующих микроорганизмов на шпалерах после трехлетней перезимовки // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 114–126.

Persistence of tomato pathogens and associated microorganisms on trellises after three years of overwintering

Sergei Ya. Popov, Aleksey N. Smirnov

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉ **Corresponding author:** sergei_ya_popov@mail.ru

Abstract

This study determined the persistence of tomato pathogens (*Solanum lycopersicum* L.) on wooden trellises and their garters after three years of outdoor overwintering, followed by nine months of indoor storage at positive temperatures. The trellises were initially used in a plot with nine tomato varieties and hybrids during a pathogen epiphytotic in 2021 in the Kimry District, Tver Region. The trellises consisted of miscanthus stalks and wooden laths with garter materials (twine). Microorganisms were identified by rinsing the trellises and garters, followed by microscopic analysis using a Lomo Mikmed microscope equipped with a digital camera. The persistence of microorganisms was assessed based on the colonization rate (%) of trellises and garters by viable pathogens and associated microorganisms. Following the designated storage period, the following pathogens were detected: *Cladosporium fulvum*, *Alternaria alternata*, *Phytophthora infestans*, *Phoma* spp., and *Epicoccum* spp. Additionally, associated microorganisms such as *Trimmatostroma* spp., protococcoid algae (*Protococcophyceae*), and cyanobacteria were found. During the three-year storage period, approximately 2030 mm of precipitation occurred, and the minimum temperature reached -31.9°C . After three years of outdoor overwintering, at least four major tomato disease agents persisted on the trellises. These experimental data on such long-term survival of tomato infection on trellises have been obtained for the first time and highlight the necessity of incorporating measures for the destruction or thorough disinfection of used trellises and garters after harvest into tomato cultivation guidelines.

Keywords

Tomato, varieties, hybrids, tomato diseases, *Cladosporium fulvum*, *Alternaria alternata*, *Phytophthora infestans*, *Phoma*, *Epicoccum*, overwintering, trellises

For citation

Popov S.Ya., Smirnov A.N. Persistence of tomato pathogens and associated microorganisms on trellises after three years of overwintering. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 114–126.

Введение Introduction

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) является одной из самых востребованных овощных культур в мире. По данным ФАО, его производство в России в 2023 г. составило 2,72 млн т, в Европе – 21,49 млн т, в Азии – 120,5 млн т [1]. Однако в мире отмечается около 200 болезней, которые существенно уменьшают урожайность томата [2–4]. В России наиболее часто из известных патогенов на нем выявляют грибоподобный организм фитофтору (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary), грибные патогены – бурую пятнистость (*Cladosporium fulvum* Cooke, которая обозначается также

как *Passalora fulva* (Cooke) U. Braun & Crous или *Mycovellosiella fulva* (Pers.) (Link)), альтернариоз (*Alternaria alternata*), нередко обозначаемый как макроспориоз, септориоз, или белую пятнистость (*Septoria lycopersici* Speg.), сухую гниль рода *Fusarium* Link и др. На старых плантациях томата источником инфекции служит в основном почва, наполненная остатками инфицированных растений с propagулами. Отмечается, например, что склеротии могут быть жизнеспособными в почве до 40 лет [5], тогда как конидии, пикноспоры, зооспоры, аскоспоры, базидиоспоры, уредоспоры – значительно меньше, но могут успешно перезимовывать в период мягкой зимы [6].

Информация по перезимовке и длительности сохранности инфекционного материала является весьма бедной. Найдено, что в природных условиях Нидерландов в вегетационном опыте ооспоры *P. infestans*, находившиеся в горшечных контейнерах, заполненных песчаными и глинистыми почвами, при затоплении последних водой оставались жизнеспособными в течение 48 и 34 месяцев соответственно. Они также выживали при высыхании почвы и ее повторном затоплении, однако при этом выдерживали не более двух затоплений [7]. Отмечено также, что ооспоры *P. infestans* сохранялись жизнеспособными в природных условиях Нидерландов в течение зимы 1992–1993 гг. [8]. В условиях Московской области, в отличие от более южных регионов России, среди всех стадий развития фитофторы именно ооспоры после перезимовки заражают томат и картофель [9]. Установлено, что ооспоры, образующиеся после скрещивания штаммов разных типов спаривания (A1 и A2), сохраняли инфекционную способность после перезимовки в почве [9].

Конидии *A. alternata*, имеющие толстые стенки оболочек, также могли успешно перезимовывать в почве с тканями растения или без них при температуре почвы и воздуха в пределах от –3,3 до +21,1°C и от –31,1 до +27,7°C соответственно в течение 7 месяцев и более; при этом они оказывались вирулентными для новых растений [10].

Отмечается, что заражение растений патогенами может происходить через укрывной материал; инфекционные начала также могут переноситься обрабатывающей техникой и человеком [11]. Тем не менее до сих пор открытым является вопрос о том, сколько времени необходимо, чтобы почва самоочищалась от той или иной инфекции. Практически ничего не было известно до наших исследований [12] о том, какую роль в сохранении инфекции играют второстепенные носители – шпалеры и подвязочные средства на них: могут ли инфекционные начала (propagулы) выживать на них после перезимовки на открытом воздухе и как долго могут сохраняться. В предыдущем опубликованном материале на эту тему [12] нами экспериментально впервые доказана сохранность возбудителей болезней томата на шпалерах и подвязочных средствах, используемых для культивирования томата в личных подсобных хозяйствах, после одного и двух лет перезимовки. В частности, после первого года хранения шпалер и подвязочного материала под открытым небом на них были обнаружены жизнеспособные формы возбудителей *C. fulvum*, *A. alternata*, ооспоры *P. infestans*, *S. lycopersici*, плесневых грибов рода *Aspergillus* Micheli ex Haller, а также представители родов *Fusarium*, *Phoma* (Saccardo) и *Helminthosporium* Link [12]. Значимость этих болезней весьма высока. Достаточно отметить, что, например, фузариоз томата в полевых условиях США на отдельных участках может полностью повреждать томат [13].

После двухгодичной перезимовки шпалер на них также впервые нами были выявлены возбудители бурой пятнистости (*C. fulvum*) и фитофторы (*P. infestans*) (ооспоры) [12]. Поскольку мелкие по площади ЛПХ, использующие, как правило, шпалерный метод выращивания томата, дают в нашей стране до 1/3 урожая томата, а также

нередко не используют фунгициды против возбудителей болезней, то эти исследования трудно переоценить.

Цель исследований: выявить способность патогенов томата к сохранности на шпалерах после 3 лет перезимовки.

Методика исследований

Research method

Полевые наблюдения проводили на участке в СХТ «Агроном», организованном от Тимирязевской сельскохозяйственной академии в начале 1980-х гг., находящемся на территории Тверской области Кимрского района, у границы с Московской областью вблизи р. Дубны. Интерес к обозначенной теме возник после эпифитотии возбудителей томата 2021 г. В тот год на участке в открытом грунте на шпалерах-подпорах выращивались сорта и гибриды томата Сибирский скороспелый, Де Барао, Джепот F1, Пламя F1, Малиновое пламя F1, Демидов, Клуша, Тасманский шоколад, Для внучат F1 – всего более 50 растений. Неповрежденные плоды убрали к середине августа.

Использовавшиеся в 2021 г. шпалеры, представлявшие собой сухие стебли мискантуса (*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Franch.), и деревянные рейки с подвязанными к подпорам отрезками шпагата держали все годы на штабеле досок высотой 1 м под открытым небом. Заселенность шпалер патогенами и другими микроорганизмами, а также сохранность патогенов исследовали путем лабораторного анализа отбираемой из общего количества части шпалер после одной, двух и трех перезимовок. С них делали соскобы и смывы, часть которых помещали на предметные стекла в соотношении с водой 1:1. Микроскопирование и фотографирование проводили на микроскопе марки Микмед 6 (ООО «ЛМО-Микросистемы», Россия) с цифровой камерой Digital Camera for Microscop DCM 900 USB2.0. Таксономический анализ объекта исследований осуществляли по морфологическим признакам. Обилие спор микроорганизмов оценивали по следующей шкале: единичные экземпляры – высокая плотность (численность) (> 10 спор/мм²); умеренная – 3–10 спор/мм²; низкая – 1–2 споры/мм²; единичная – меньше 1 споры/мм².

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

После первой перезимовки шпалер и подвязочного материала под открытым небом были выявлены возбудители бурой пятнистости *Cladosporium fulvum* Cooke, обозначаемой также как *Passalora fulva* (Cooke) U. Braun & Crous [14] или *Mycovellosiella fulva* (Pers.) (Link) (Capnodiales), фитофтороза *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary (Peronosporales), альтернариоза (*Alternaria alternata* Sorauer) (Pleosporales), белой пятнистости *Septoria lycopersici* Speg. (Capnodiales), плесневых конидиальных грибов рода *Aspergillus* Micheli ex Haller (Eurotiales) и *Chaetomium globosum* Kunze (Sordariales), грибов рода *Fusarium* Link (Hypocreales), грибов рода *Phoma* (Saccardo) (Pleosporales), а также грибов рода *Helminthosporium* Link (Pleosporales). В шпагате-подвязке была обнаружена нематода-бактериофаг (отряд Rhabditida) [12].

Как отмечалось в статье на эту тему [12], среди выявленных возбудителей болезней большинство входило в группу митоспоровых грибов, характеризующихся отсутствием полового процесса; функции размножения у них выполняют конидии. Конидии *S. lycopersici* и *Phoma* spp. помещались в пикнидах сферической формы, конидии *C. fulvum*, *Fusarium* spp., *A. alternata* располагались на разветвленных конидиеносцах,

конидии *Aspergillus* spp. концентрировались в головчатых скоплениях, конидии *Trimmatostroma* spp. находились в цепочках на поверхности древесных тканей и под поверхностью. На поверхности тканей располагался плесневой гриб *C. globosum*. Конидии *Helminthosporium* spp., как и *Epicoccum* spp., располагались отдельно друг от друга. Наибольшее скопления конидий наблюдалось у гриба *C. fulvum*.

На рисунке 1 представлена картина заселенности шпалер и подвязочного материала к томату живыми патогенами и другими микроорганизмами за 3 года местонахождения шпалер под открытым небом. Через год после перезимовки заселенность шпалер живыми патогенами и другими микроорганизмами составила: *C. fulvum* – 78,6%; *A. alternata* – 42,9%; *P. infestans* (ооспоры) – 28,6%; *Aspergillus* spp. – 28,6%; по 7,1% – *S. lycopersici*, *C. globosum*, *Fusarium* spp., *Phoma* spp. и *Helminthosporium* spp. Как уже отмечалось, в шпагате-подвязке нашла место перезимовки нематода-бактериофаг (отряд Rhabditida).

После 2-го года перезимовки на взятых для анализа шпалерах были выявлены живые конидии *C. fulvum* и ооспоры *P. infestans*. Заселенность ими шпалер оказалась равной 100 и 14,3% соответственно.

После 3-го года перезимовки с последующим хранением в течение 9 месяцев при положительной температуре в помещении заселенность оставшейся части шпалер живыми патогенами и микроорганизмами показала небольшое увеличение: во-первых, впервые на шпалерах были выявлены грибы рода *Epicoccum* Link и рода *Trimmatostroma* Corda; во-вторых, вновь были найдены живые конидии возбудителей *C. fulvum*, *A. alternata* и *Phoma* spp.; в-третьих, к отмеченным ранее прибавились протококковые водоросли (Protococcophyceae) и сине-зеленые водоросли (Cyanobacteria). Заселенность шпалер патогенами и микроорганизмами соответствовала следующим значениям: *C. fulvum* – 100%; гриб-сапротроф рода *Trimmatostroma* – 55,6%; *P. infestans* – 33,3%; *A. alternata* – 33,3%; *Phoma* spp. – 22,2%; *Epicoccum* spp. – 11,1%; остатки таллома протококковых и сине-зеленых водорослей (цианобактерий) – 44,4 и 11,1% соответственно. Так же, как в 1-й год, был отмечен экземпляр нематоды-бактериофага (отряд Rhabditida) (заселенность – 11,1%), однако в отличие от первого случая выявления он был найден на собственно шпалере.

На рисунке 2 приведены изображения выявленных после 3-летней перезимовки пропагул микроорганизмов.



Рис. 1. Заселенность шпалер возбудителями заболеваний томата и другими микроорганизмами, по годам

Figure 1. Colonization of trellises with tomato pathogens and other microorganisms by year

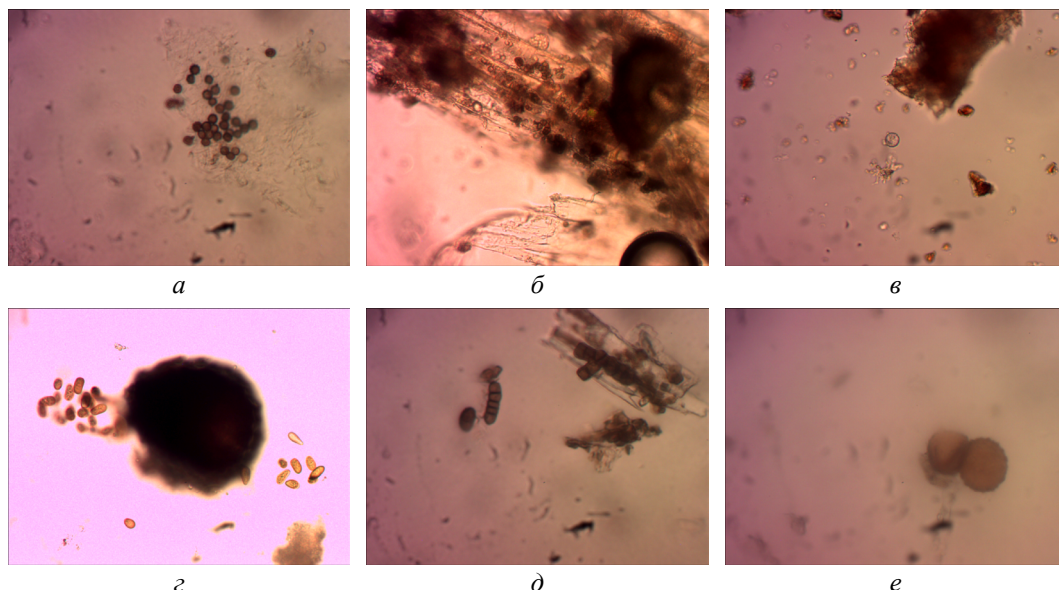


Рис. 2. Возбудители болезней томата на шпалерах после 3-годовой перезимовки на открытом воздухе и дополнительного 9-месячного хранения в помещении при комнатной температуре:

а – конидии *C. fulvum*; б – конидии *C. fulvum* в тканях; в-нетипичная ооспора *P. infestans*; г – пикниды *Phoma* spp.; д – конидии *Trimmatostroma* spp.; е – конидии *Epicoccum* spp.

Figure 2. Tomato pathogens on trellises after three years of outdoor overwintering followed by nine months of indoor storage at room temperature:

а – *C. fulvum* conidia; б – *C. fulvum* conidia in tissues; в – atypical *P. infestans* oospore; д – *Phoma* spp. pycnidia; е – *Trimmatostroma* spp. conidia; ф – *Epicoccum* spp. conidia

В таблице отражены видовой состав, стадии развития и плотность (численность) структур патогенов и других микроорганизмов на шпалерах после трех лет их перезимовки под открытым небом и дополнительного 9-месячного хранения в помещении с комнатной температурой. Данные приведены на примере одной из партий, отобранных из открытого грунта 16 июля 2024 г., с последующим хранением в помещении с окончательным отбором 7 апреля 2025 г.

Согласно данным таблицы *C. fulvum* был представлен на шпалерах гифами, конидиями и пикнидами, *P. infestans* – только единичными ооспорами нетипичного строения, *Trimmatostroma* spp. – спорами либо мицелием и его остатками, *A. alternata* – спорами или их остатками, *Phoma* spp. – пикнидами, *Epicoccum* spp. – конидиями, водоросли (Protococcophyceae и Cyanobacteria) – остатками таллома.

Смывы микроорганизмов со шпалер показали высокое доминирование пропагул *C. fulvum*. По сравнению с первым годом перезимовки этого возбудителя [12] процент случаев умеренной и частой плотности (численности) (по числу пропагул на 1 мм²) резко снизился, в то время как доля редкой плотности достигла 66,7%. Достаточно высокую плотность пропагул на шпалерах показал сапротрофный гриб *Trimmatostroma* spp. (75%, умеренная). Половина из двух смывов гриба *Epicoccum* spp. пришлась на редкую плотность, вторая половина – на единичную. Остальные микроорганизмы за редким исключением, касающимся остатков водорослей, были представлены единичными экземплярами.

Таблица

Видовой состав и присутствие патогенов томата и других микроорганизмов на шпалерах и подвязочных средствах, используемых для поддержки стебля томата (*Solanum lycopersicum* L.) после трех лет хранения в открытом грунте на участке в условиях Кимрского района Тверской области и 9 месяцев последующего хранения в темном помещении при температуре воздуха $21\pm 1^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $55\pm 5\%$

Table

Species composition and presence of tomato pathogens and other microorganisms on trellises and garters used for tomato stem support (*Solanum lycopersicum* L.) after three years of outdoor storage in a plot in the Kimry District, Tver Region, Russia, followed by nine months of storage in a dark room at an air temperature of $21\pm 1^{\circ}\text{C}$ and a relative air humidity of $55\pm 5\%$

Анализируемый предмет	Номер соскоба или смыва	Микроорганизм	Стадии развития микроорганизма	Плотность структур микроорганизмов
Шпалера № 1	1	—	—	—
	2	<i>C. fulvum</i> +	Конидии	Умеренно
		<i>Trimmatostroma</i> sp.	Споры, мицелий	Умеренно
Шпалера № 2	1	<i>C. fulvum</i> +	Гифы	Редко
		Protococcophyceae	Остатки таллома	Единично
	2	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко, местами часто
Шпалера № 3	1	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко
	2	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко, местами умеренно
		<i>A. alternata</i>	Конидии	Единично
		<i>Trimmatostroma</i> sp.	Споры, мицелий	Умеренно
Шпалера № 4	1	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Единично
	2	<i>P. infestans</i>	Ооспора нетипичного строения*	Единично
		<i>Phoma</i> sp.	Пикнида	Единично
Шпалера № 5	1	<i>P. infestans</i>	Ооспоры нетипичного строения	Единично
		Сyanobacteria	Остатки таллома	Редко
	2	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко
			Пикниды	Редко

Анализируе- мый предмет	Номер соскоба или смыва	Микроорганизм	Стадии развития микроорганизма	Плотность структур микроорга-низмов
Шпалера № 6	1	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко
	2	–	–	–
		<i>Phoma sp.</i>	Пикнида	Единично
Шпалера № 7	1	<i>A. alternata</i>	Конидии	Единично
		<i>C. fulvum</i>	Конидии	Умеренно
		<i>Trimmatostroma sp.</i>	Споры, остатки мицелия	Умеренно
		<i>P. infestans</i>	Ооспора нетипичного строения*	Единичная
		Protococcophyceae	Остатки таллома	Единично
	2	<i>Trimmatostroma sp.</i>	Споры, остатки мицелия	Умеренно
Шпалера № 8	1	<i>Epicoccum sp.</i>	Конидии	Единично, редко
		<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко
		<i>A. alternata</i>	Остатки спор	Единично
		<i>Trimmatostroma sp.</i>	Споры, остатки мицелия	Редко
		Nematode (Rhabditida)	Нематода-бакте- риофаг, отряд Rhabditida (увеличение 1/300)	Единично
	2	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко
		Protococcophyceae	Остатки таллома	Единично
Шпалера № 9	1	<i>Trimmatostroma sp.</i>	Споры, остатки мицелия	Умеренно
		<i>C. fulvum</i>	Конидии	Редко
	2	<i>C. fulvum</i>	Конидии	Умеренно
		<i>Trimmatostroma sp.</i>	Споры, остатки мицелия	Часто
		Protococcophyceae	Остатки таллома	Редко

*Ооспора с тонкой стенкой.

Как уже отмечалось, ооспоры *P. infestans*, хотя и выглядели жизнеспособными, отличались от ооспор первого года перезимовки более тонкими стенками оболочек; вероятно, в их происхождении был задействован апомиксис (без участия антеридия). Подобные случаи сообщаются в других исследованиях [15].

Среди грибных и грибоподобных патогенов по заселенности шпалер и подвязочного материала устойчиво доминировал возбудитель бурой пятнистости (*C. fulvum*). Поскольку конидии этого возбудителя могут «выстреливаться» в воздух и оседать на незараженные части растений и предметов, находящиеся в непосредственной близости, он показал высокую заселенность шпалер. Его оболочки конидий выглядят заметно утолщенными. Выражено мнение о том, что не имея полового процесса, он может в большей степени сохранять энергию для выживания [12]. С другой стороны, на его распространение в северные пределы нынешнего ареала возможно влияние глобального потепления [16, 17].

В отношении *C. fulvum* на протяжении нескольких десятков последних лет как к патогену томата высказывалось неоднозначное мнение. Нередко его обозначали в качестве потенциально опасного патогена для томата открытого грунта. Однако после того, как в Великобритании в начале 2000-х гг. на ряде сортов томата разразились вспышки заболевания, мнение изменилось в сторону сильного патогена и упрочилось после того, как в 2020-е гг. в Японии были найдены новые вирулентные расы возбудителя, которые наносили растениям томата открытого грунта существенный вред [18]. Для пленочных тоннелей при выращивании в них томата возбудитель бурой пятнистости считается опасным патогеном, заметно снижающим урожайность культуры [19, 20].

На втором месте по заселенности шпалер в пробах, взятых после трехлетней перезимовки, оказался гриб рода *Trimmatostroma*. Это сапротроф, который встречается на древесном материале.

Что касается фитофтороза, то эта болезнь остается наиболее существенной по вредоносности [21, 22]. При этом в умеренном климате первичная инфекция передается посредством ооспор, являющихся весьма устойчивыми при неблагоприятных условиях [23]; они, как показано в представляемой статье, имеются и на шпалерах.

В том же количестве, как и *P. infestans*, выявлен на шпалерах возбудитель *A. alternata*. Это заболевание считается весьма распространенным и серьезным [24].

Идентифицированный нами *Phoma* spp. упоминается в Бразилии как весьма вредоносный патоген [25]. Также имеются сведения о том, что *Epicoccum* spp. может образовывать пятна на листьях пасленовых культур включая томат [26].

Таким образом, впервые найдено, что такие возбудители заболеваний томата, как *Cladosporium fulvum*, *Alternaria alternata*, *Phytophthora infestans*, *Epicoccum* spp. и *Phoma* spp., заселявшие шпалеры томата, достоверно способны перезимовывать на них в условиях Тверской области в течение 3 лет, а выглядеть жизнеспособными на шпалерах после их хранения всего не менее 3 лет на открытом воздухе и последующих 9 месяцев хранения в закрытом помещении при комнатной температуре.

Выводы

Conclusions

Экспериментальные данные по сохранению инфекции томата на шпалерах и подвязочном материале после 3 лет перезимовки шпалер под открытым небом на фоне более 2000 мм выпавших осадков и температуры около -32°C и последующего их хранения в течение 9 месяцев в темном помещении при температуре $21\pm 1^{\circ}\text{C}$, относительной влажности $55\pm 5\%$, полученные впервые, показывают высокую степень

сохранности основных возбудителей заболевания культуры: *Cladosporium fulvum*, *Alternaria alternata*, *Phytophthora infestans*, *Epicoccum* spp. и *Phoma* spp. Полученные материалы свидетельствуют о необходимости кардинального исправления старого метода ежегодного использования одних и тех же шпалер и подвязочного материала при выращивании томата. После уборки урожая томата шпалеры вместе с подвязочным материалом должны быть уничтожены или тщательно продезинфицированы. В противном случае, если их после уборки урожая томата даже выдерживать не менее трех лет под открытым небом, они окажутся источниками инфекции для новых растений.

Список источников

1. FAO (Data Page: Tomato production). In: Ritchie H., Rosado P., Roser M. *Agricultural Production*. 2023. URL: <https://archive.ourworldindata.org/20250731-180103/grapher/tomato-production.html> (дата обращения: 31.07.2025)
2. Moine L.M., Labbé C., Louis-Seize G., Seifert K.A. et al. Identification and detection of *Fusarium striatum* as a new record of pathogen to greenhouse tomato in Northeastern America. *Plant Disease*. 2014;98:292-298. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-13-0844-RE>
3. Ma M., Taylor P.W.J., Chen D., Vaghefi N. et al. Major Soilborne pathogens of field processing tomatoes and management strategies. *Microorganisms*. 2023;11(2):263. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020263>
4. Simões D., de Andrade Silva E. *Fusarium* species responsible for tomato diseases and mycotoxin contamination and biocontrol opportunities. In: *Fusarium – Recent Studies*. Abdurakhmonov I.Y. (Ed). London, UK: IntechOpen, 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1003643>
5. *Защита растений в устойчивых системах землепользования: Учебно-практическое пособие: В 4 кн. Кн. 1 / Под ред. Д. Шпаара. Торжок: Вариант, 2003. 392 с.*
6. Тарр С. Основы патологии растений / Пер. с англ. Л.М. Дунина, Н.Л. Клячко; Под ред., предисл. М.С. Дунина. Москва: Мир, 1975. 587 с.
7. Turkensteen L.J., Flier W.G., Wanningen R., Mulder A. Production, survival and infectivity of oospores of *Phytophthora infestans*. *Plant Pathology*. 2000;49(6):688-696. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2000.00515.x>
8. Drenth A., Janssen E.M., Govers F. Formation and survival of oospores of *Phytophthora* in festans under natural conditions. *Plant Pathology*. 1995;44(1):86-94. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb02719.x>
9. Kuznetsova M.A., Ulanova T.I., Rogozhin A.N., Smetanina T.I. et al. Role of oospores in the overwintering and year-on-year development of the late blight pathogen on tomato and potato. *PPO-Special Report*. 2010;14:223-230.
10. Basu P.K. Existence of chlamydospores of *Alternaria porri* f. sp. *solani* as overwintering propagules in soil. *Phytopathology*. 1971;61:1347-1350. <https://doi.org/10.1094/Phyto-61-1347>
11. *Экологизированная защита растений в овощеводстве, садоводстве и виноградарстве: Учебно-практическое пособие: В 2 кн. Кн. 1 / Под ред. Д. Шпаара. Санкт-Петербург; Пушкин: Инновационный центр защиты растений, 2005. 336 с. EDN: QKXVYP*
12. Попов С.Я., Смирнов А.Н. Новые данные по сохранности возбудителей болезней томата после перезимовки // *Сельскохозяйственная биология*. 2024. Т. 59, № 3. С. 561–570. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.3.561rus>
13. McCovern R.J. Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection*. 2015;73:78-92. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.021>

14. Satou M., Shizonaki T., Nishi K., Kubota M. Leaf mold tomato caused by races 4 and 4.11 of *Passalora fulva* in Japan. *Journal of General Plant Pathology*. 2005;71:436-437. <https://doi.org/10.1007/s10327-005-0223-2>
15. Смирнов А.Н., Кузнецов С.А. Фитофтороз томата // *Защита и карантин растений*. 2006. № 3. С. 20-23
16. Игнатов А.Н., Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г. и др. Влияние глобальных изменений климата на фитопатогены и развитие болезней растений // *Агрохимия*. 2020. № 12. С. 81–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188120120042>
17. Попов С.Я., Дмитриева С.В. Фенология яблонного цветоеда, *Anthonomus pomorum* (L.) (Coleoptera, Curculionidae), на яблоне в Москве на фоне глобального потепления // *Энтомологическое обозрение*. 2022. Т. 101, № 4. С. 675–690. <https://doi.org/10.31857/S0367144522040013>
18. Iida Y., van 't Hof P., Beenen H., Mesarich C. et al. Novel mutations detected in avirulence genes overcoming tomato Cf resistance genes in isolates of a Japanese population of *Cladosporium fulvum*. *PLoS ONE*. 2015;10(4): e0123271. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123271>
19. Sudermann M.A., McGilp L., Vogel G., Regnier M. et al. The diversity of *Passalora fulva* isolates collected from tomato plants in U.S. high tunnels. *Phytopathology*. 2022;112(6):1350-1360. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-21-0244-R>
20. Novak A., Cosić J., Vrandečić K., Jurković D. et al. Characterization of tomato leaf mould pathogen, *Passalora fulva*, in Croatia. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2021;128:1041-1049. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00419-6>
21. Fry W.E., Birch P.R.J., Judelson H.S., Grünwald N.J. et al. Five reasons to consider *Phytophthora infestans* a reemerging pathogen. *Phytopathology*. 2015;105(7):966-981. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-15-0005-FI>
22. Saville A.C., Martin M.D., Ristaino J.B. Historic late blight outbreaks caused by a widespread dominant lineage of *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. *PloS ONE*. 2016;11(12): e0168381. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168381>
23. Золфагари А., Антоненко В.В., Зайцев Д.В., Игнатенкова А.А. и др. Фитофтороз и альтернариоз картофеля и томата при аномальных погодных условиях в Московской области // *Защита и карантин растений*. 2011. № 12. С. 40–42.
24. Chaerani R., Voorrips R.E. Tomato early blight (*Alternaria solani*): the pathogen, genetics, and breeding for resistance. *Journal of General Plant Pathology*. 2006;72:335-347. <https://doi.org/10.1007/s10327-006-0299-3>
25. Colmán A.A., Janaina L. Alves J.L., da Silva M. et al. *Phoma destructiva* causing blight of tomato plants: a new fungal threat for tomato plantations in Brazil? *Tropical Plant Pathology*. 2018;43:257-262 <https://doi.org/10.1007/s40858-017-0200-2>
26. Aumentado H.D.R., Balendres M.A.O. Identification of *Epicoccum poaceicola* causing eggplant leaf spot and its cross-infection potential to other solanaceous vegetable crops. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 2023;56(11):872-888. <https://doi.org/10.1080/03235408.2023.2227328>

References

1. FAO (Data Page: Tomato production). In: Ritchie H., Rosado P., Roser M. *Agricultural Production*. 2023. URL: <https://archive.ourworldindata.org/20250731-180103/grapher/tomato-production.html> (accessed: July 31, 2025).
2. Moine L.M., Labbé C., Louis-Seize G., Seifert K.A. et al. Identification and detection of *Fusarium striatum* as a new record of pathogen to greenhouse tomato in Northeastern America. *Plant Disease*. 2014;98:292-298. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-13-0844-RE>

3. Ma M., Taylor P.W.J., Chen D., Vaghefi N. et al. Major Soilborne pathogens of field processing tomatoes and management strategies. *Microorganisms*. 2023;11(2):263. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020263>
4. Simões D., de Andrade Silva E. Fusarium species responsible for tomato diseases and mycotoxin contamination and biocontrol opportunities. In: *Fusarium – Recent Studies*. Abdurakhmonov I.Y. (Ed). London, UK: IntechOpen, 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1003643>
5. *Plant protection in sustainable land use systems. Book 1: a textbook and practical handbook*. Shpaar D. (Ed). Torzhok, Russia: Variant, 2003:392. (In Russ.)
6. *Fundamentals of plant pathology*. Tarr S.; Dunin L.M., Klyachko N.L. (Transl); Dunin M.S. (Ed). Moscow, USSR: Mir, 1975:587. (In Russ.)
7. Turkensteen L.J., Flier W.G., Wanningen R., Mulder A. Production, survival and infectivity of oospores of *Phytophthora infestans*. *Plant Pathology*. 2000;49(6):688-696. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2000.00515.x>
8. Drenth A., Janssen E.M., Govers F. Formation and survival of oospores of *Phytophthora infestans* under natural conditions. *Plant Pathology*. 1995;44(1):86-94. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb02719.x>
9. Kuznetsova M.A., Ulanova T.I., Rogozhin A.N., Smetanina T.I. et al. Role of oospores in the overwintering and year-on-year development of the late blight pathogen on tomato and potato. *PPO-Special Report*. 2010;14:223-230.
10. Basu P.K. Existence of chlamydospores of *Alternaria porri* f. sp. *solani* as overwintering propagules in soil. *Phytopathology*. 1971;61:1347-1350. <https://doi.org/10.1094/Phyto-61-1347>
11. *Ecologized plant protection in vegetable growing, horticulture, and viticulture. Book 1: a textbook and practical handbook*. Shpaar D. (Ed). St. Petersburg, Pushkin, Russia: Innovation Center for Plant Protection, 2005:336. (In Russ.)
12. Popov S.Ya., Smirnov A.N. New data on the survival of tomato pathogens after overwintering. *Agricultural Biology*. 2024;59(3):561-570. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.3.561rus>
13. McCovern R.J. Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection*. 2015;73:78-92. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.021>
14. Satou M., Shizonaki T., Nishi K., Kubota M. Leaf mold tomato caused by races 4 and 4.11 of *Passalora fulva* in Japan. *Journal of General Plant Pathology*. 2005;71:436-437. <https://doi.org/10.1007/s10327-005-0223-2>
15. Smirnov A.N., Kuznetsov S.A. Tomato late blight. *Plant Protection and Quarantine*. 2006;(3):20-23. (In Russ.)
16. Ignatov A.N., Koshkin E.I., Andreeva I.V., Guseinov G.G. et al. Impact of global climate change on plant pathogens occurrence. *Agrohimia*. 2020;(12):81-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002188120120042>
17. Popov S.Ya., Dmitrieva S.V. Phenology of the apple blossom weevil, *Anthonomus pomorum* (L.) (Coleoptera, Curculionidae), on apple trees in Moscow on the background of global warming. *Entomologicheskoe Obozrenie*. 2022;101(4):675-690. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0367144522040013>
18. Iida Y., van 't Hof P., Beenen H., Mesarich C. et al. Novel mutations detected in avirulence genes overcoming tomato Cf resistance genes in isolates of a Japanese population of *Cladosporium fulvum*. *PLoS ONE*. 2015;10(4): e0123271. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123271>
19. Sudermann M.A., McGilp L., Vogel G., Regnier M. et al. The diversity of *Passalora fulva* isolates collected from tomato plants in U.S. high tunnels. *Phytopathology*. 2022;112(6):1350-1360. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-21-0244-R>

20. Novak A., Čosić J., Vrandečić K., Jurković D. et al. Characterization of tomato leaf mould pathogen, *Passalora fulva*, in Croatia. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2021;128:1041-1049. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00419-6>
21. Fry W.E., Birch P.R.J., Judelson H.S., Grünwald N.J. et al. Five reasons to consider *Phytophthora infestans* a reemerging pathogen. *Phytopathology*. 2015;105(7):966-981. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-15-0005-FI>
22. Saville A.C., Martin M.D., Ristaino J.B. Historic late blight outbreaks caused by a widespread dominant lineage of *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. *PloS ONE*. 2016;11(12): e0168381. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168381>
23. Zolfaghari A., Antonenko V.V., Zaitsev D.V., Ignatenkova A.A. et al. Late and early blight of potato and tomato under the abnormal weather conditions of Moscow Region. Late blight and alternaria of potatoes and tomatoes under abnormal weather conditions in the Moscow Region. *Plant Protection and Quarantine*. 2011;(12):40-42. (In Russ.)
24. Chaerani R., Voorrips R.E. Tomato early blight (*Alternaria solani*): the pathogen, genetics, and breeding for resistance. *Journal of General Plant Pathology*. 2006;72:335-347. <https://doi.org/10.1007/s10327-006-0299-3>
25. Colmán A.A., Janaina L. Alves J.L., da Silva M. et al. *Phoma destructiva* causing blight of tomato plants: a new fungal threat for tomato plantations in Brazil? *Tropical Plant Pathology*. 2018;43:257-262 <https://doi.org/10.1007/s40858-017-0200-2>
26. Aumentado H.D.R., Balendres M.A.O. Identification of *Epicoccum poaeicola* causing eggplant leaf spot and its cross-infection potential to other solanaceous vegetable crops. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 2023;56(11):872-888. <https://doi.org/10.1080/03235408.2023.2227328>

Сведения об авторах

Сергей Яковлевич Попов, д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры защиты растений, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: sergei_ya_popov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2887-4872>

Алексей Николаевич Смирнов, д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры защиты растений, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: smirnov@rgau-msha.ru

Information about the authors

Sergei Ya. Popov, DSc (Bio), Professor, Professor at Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: sergei_ya_popov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2887-4872>

Aleksey N. Smirnov, DSc (Bio), Professor, Professor at Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: smirnov@rgau-msha.ru

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

**Белая гниль сои: особенности патогенеза,
биологические свойства патогена и меры защиты**

**Рашит Ислямович Тараканов^{1✉}, Виктория Васильевна Медведева¹,
Петр Владимирович Евсеев², Ольга Алексеевна Савоськина¹,
Светлана Ивановна Чебаненко¹, Февзи Сеид-Умерович Джалилов¹**

¹Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

²Российский национальный исследовательский медицинский университет
им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

✉Автор, ответственный за переписку: r.tarakanov@rgau-msha.ru

Аннотация

Sclerotinia sclerotiorum – опасный широкоспециализированный некротрофный фитопатоген, поражающий около 400 видов растений включая такие экономически важные культуры, как подсолнечник, рапс, соя и др.). Этот гриб вызывает белую гниль (син. – склеротиниоз) – одну из самых вредоносных болезней, особенно в регионах с прохладным и влажным климатом. Возбудитель *S. sclerotiorum* имеет простой жизненный цикл, в котором заражение происходит либо мицелием из покоящихся склероциев в почве, либо аскоспорами из апотециев. Патоген может проникать через прикорневую часть стебля либо аэрогенно через цветки и отмершие ткани растений. Посевы сои в России постоянно расширяются, поэтому патоген представляет особую проблему, приводя к значительным потерям урожая. В данном обзоре обобщены современные данные о биологии *S. sclerotiorum*, механизмах патогенности и взаимодействия с растением-хозяином, путях его распространения и об оценке вредоносности. Рассмотрены методы мониторинга и диагностики белой гнили сои, существующие методы защиты (агротехнические, биологические и химические), а также достижения и проблемы в селекции сои на устойчивость к белой гнили. В заключение обсуждаются перспективные направления исследований, направленные на разработку более эффективных и экологически безопасных методов защиты сои от *S. sclerotiorum*.

Ключевые слова

Соя, белая гниль, *Sclerotinia sclerotiorum*, патогенез, фунгициды, устойчивые сорта, агротехника, биологические средства защиты растений, системы защиты растений, стробилурины, триазолы

Для цитирования:

Тараканов Р.И., Медведева В.В., Евсеев П.В., Савоськина О.А. и др. Белая гниль сои: особенности патогенеза, биологические свойства патогена и меры защиты // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 127–148.

Soybean white mold: pathogenesis features, biological properties of the pathogen, and control methods

Rashit I. Tarakanov^{1✉}, Victoria V. Medvedeva¹, Peter V. Evseev²,
Olga A. Savoskina¹, Svetlana I. Chebanenko¹, Fevzi S.-U. Dzhalilov¹

¹Russian State Agrarian University –

Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia;

²Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

✉Corresponding author: r.tarakanov@rgau-msha.ru

Abstract

Sclerotinia sclerotiorum is a dangerous, highly specialized necrotrophic phytopathogen that infects approximately 400 plant species, including economically important crops such as sunflower, rapeseed, soybean, and others. This fungus causes white mold (syn. sclerotiniosis), one of the most destructive diseases, especially in regions with cool and humid climates. The pathogen *S. sclerotiorum* has a simple life cycle, where infection occurs either via mycelium from dormant sclerotia in the soil or by ascospores from apothecia. The pathogen can penetrate through the stem base or aerially through flowers and dead plant tissues. Soybean cultivation in Russia is continuously expanding, and therefore the pathogen poses a particular problem, leading to significant yield losses. This review summarizes current data on the biology of *S. sclerotiorum*, its mechanisms of pathogenicity and interaction with the host plant, dissemination pathways, and impact assessment. It also covers methods for monitoring and diagnosing soybean white mold, existing control methods (agronomic, biological, and chemical), as well as achievements and challenges in soybean breeding for white mold resistance. In conclusion, promising research directions are discussed, aimed at developing more effective and environmentally safe methods for protecting soybeans from *S. sclerotiorum*.

Key words

Soybean, white mold, *Sclerotinia sclerotiorum*, pathogenesis, fungicides, resistant cultivars, agronomic practices, biological control agents, plant protection systems, strobilurins, triazoles

For citation

Tarakanov R.I., Medvedeva V.V., Evseev P.V., Savoskina O.A. et al. Soybean white mold: pathogenesis features, biological properties of the pathogen, and control methods. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 127–148.

Введение

Introduction

Белая гниль – заболевание, вызываемое грибами рода *Sclerotinia*. Наиболее вредоносным и часто встречающимся видом возбудителя является *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary (1884). Патоген способен инфицировать чрезвычайно широкий круг растений-хозяев: подсолнечник, сою, горох, фасоль, картофель, томат, морковь, салат и др., всего более 400 видов одно- и двудольных растений, что делает его одним из самых широкоспециализированных из известных фитопатогенов [7, 28]. Болезнь, вызываемая *Sclerotinia sclerotiorum* (далее – *Ss*), имеет много названий – таких, как белая гниль (англ. white mold), склеротиниоз, белая плесень, мокрая гниль стеблей (англ. *Sclerotinia* stem rot, SSR). Наиболее употребляемым является название «белая гниль»:

по белому цвету образуемого мицелия и характерным симптомам гнили на пораженных органах растений.

Актуальный поиск информации показал наличие 1990 работ с ключевым словом «*Sclerotinia sclerotiorum*» в базе данных Pubmed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), опубликованных с 1970 г. по апрель 2025 г. (рис. 1), из которых 48 являются обзорами, остальные – исследовательскими статьями. При этом за последние 10 лет опубликовано 1238 работ, что составляет 62,2% от опубликованных за все время.

Заметна динамика увеличения количества работ по данной тематике, что говорит о росте интереса исследователей к патогену. Таким образом, белая гниль сои представляет серьезную проблему и требует применения эффективных мер мониторинга и защиты.

Цель исследований: систематизация данных об особенностях биологии и стратегий защиты сои от белой гнили.

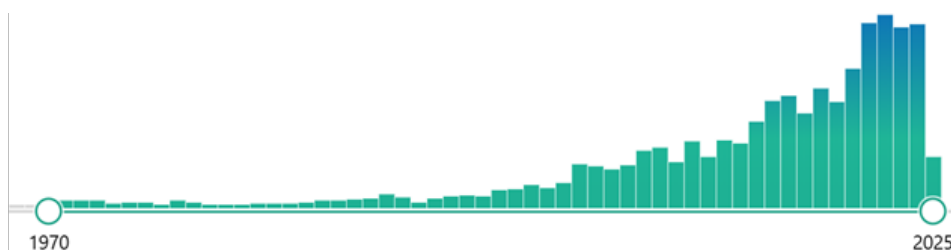


Рис. 1. Динамика увеличения количества статей с ключевым словом «*Sclerotinia sclerotiorum*» в базе данных Pubmed с 1970 г. по апрель 2025 г.

Figure 1. Dynamics of the increase in the number of articles with the keyword “*Sclerotinia sclerotiorum*” in the Pubmed database from 1970 to April 2025

Методика исследований

Research method

Поиск источников осуществляли в базах данных PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), eLIBRARY.RU (<https://www.elibrary.ru/>), ResearchGate (<https://www.researchgate.net/>) и Google Scholar (<https://scholar.google.com/>).

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Биология и жизненный цикл патогена. Гриб *Ss* относится к царству Fungi, отделу *Ascomycota*, классу *Leotiomycetes*, порядку *Helotiales*, семейству *Sclerotiniaceae*. В чистой культуре образует белый мицелий и характерные черные склероции – плотные сплетения гиф с меланизированной оболочкой. Склероции обычно имеют размер 2–20 мм, неправильную форму, формируются на зараженных тканях (внутри полостей стеблей, в бобах, на поверхности пораженных органов) и служат основным средством выживания гриба в неблагоприятных условиях. Наличие меланина в оболочке придает склероциям устойчивость к высыханию, ультрафиолету и микробиологическому разложению, позволяя им сохранять жизнеспособность в почве до 8–10 лет [7]. В строении склероция выделяют 3 слоя: внешнюю темноокрашенную меланизированную оболочку, средний слой и внутреннюю часть из рыхлых клеток с запасом питательных веществ [15].

Ss характеризуется моноциклическим жизненным циклом, то есть за один вегетационный сезон развивается только одно поколение инокулюма (склероции

и аскоспоры) (рис. 2). Склероции могут прорасти мицелием (мицелиогенно) или с образованием плодовых тел (карпогенно). При достаточной влажности почвы (~70% ПВ) преобладает мицелиогенное прорастание, когда из склероциев образуется мицелий, способный напрямую инфицировать растения, проникая через мелкие повреждения эпидермиса или естественные отверстия (устьица, чечевички), а также колонизируя отмирающие части растений с последующим внедрением в здоровые ткани. Карпогенное прорастание склероциев приводит к образованию апотециев – плодовых тел, продуцирующих аскоспоры, которые служат воздушным (аэрогенным) инокулюмом. Заражение растения может происходить как от мицелия склероциев через приземную часть растений, так и от аскоспор – через цветки или другие надземные органы [7].

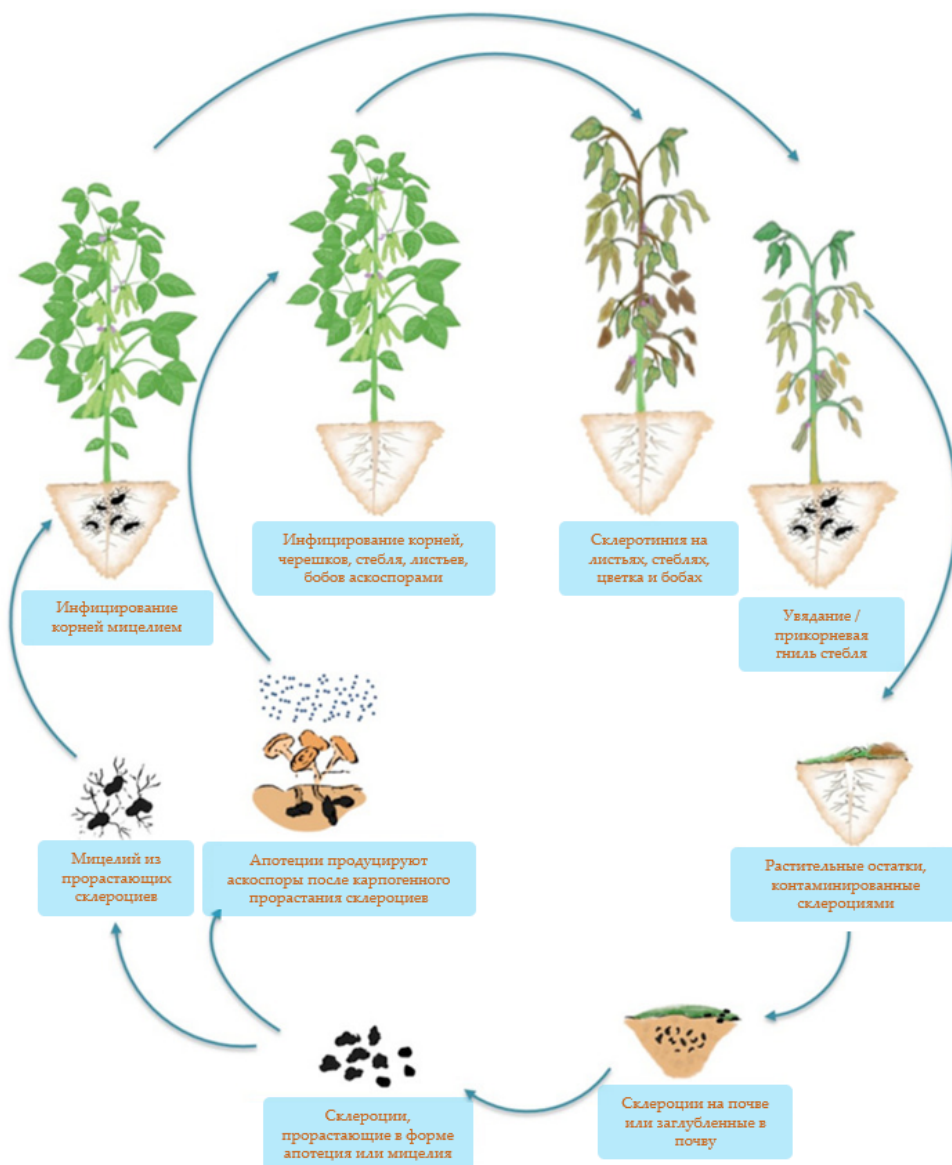


Рис. 2. Схема жизненного цикла *S. sclerotiorum* на примере сои

Figure 2. The scheme of the life cycle of *S. sclerotiorum* on the example of soybean

Механизмы патогенности S. sclerotiorum. Белая гниль является классическим некротрофным заболеванием, а возбудитель – факультативный паразит, который убивает клетки растения-хозяина и питается продуктами их распада. В процессе инфицирования и колонизации тканей *Ss* вырабатывает целый ряд факторов вирулентности, облегчающих проникновение через защитные барьеры растения и потребление впоследствии содержимого клеток. К основным факторам патогенности относят оксало-вую (щавелевую) кислоту, разнообразные гидролитические ферменты и эффектор-ные белки (малые секретируемые белки, модифицирующие метаболизм и иммунитет растения) [27]. Совместное действие этих факторов позволяет быстро перевести инфекцию из локальной начальной фазы в генерализованную, вызывая мацерацию тканей и гибель пораженных органов растения.

Оксаловая кислота является одним из ключевых метаболитов, определяющих патогенность *Ss*. Синтез оксалата начинается уже на ранних этапах патогенеза. Накопление этого соединения подкисляет окружающие ткани (снижая pH до 4 и ниже), что повышает активность гидролитических ферментов гриба, разрушающих клеточные стенки [9, 37]. Оксаловая кислота также подавляет защитные реакции растения – в частности, ингибирует «дыхательный всплеск», то есть образование активных форм кислорода (далее – АФК), и препятствует отложению каллозы в клеточных стенках, ослабляя их прочность и последующий иммунный ответ хозяина [9]. Кроме того, оксалат хелатирует ионы кальция пектата клеточных стенок, дестабилизируя пектиновый матрикс ткани. В совокупности эти эффекты приводят к разжижению (мацерации) клеточных стенок и гибели клеток. Показано, что мутантные штаммы *Ss*, утратившие способность синтезировать оксалат, практически не вызывают заболевания, что подчеркивает решающую роль этого фактора в патогенезе.

Патоген также продуцирует широкий спектр гидролитических ферментов, разрушающих клеточные структуры растения. В их числе – целлюлазы, гемицеллюлазы, пектиназы и протеазы, разлагающие полимеры клеточных стенок и межклеточного матрикса. Особенно важны пектиназы: эндо- и экзо-полигалактуроназы, пектинлиазы, расщепляющие пектиновые вещества, составляющие основу клеточной стенки. Эти ферменты наиболее активны в кислой среде, создаваемой оксаловой кислотой, поэтому совместное действие оксалата и пектиназ вызывает быстрое гниение (мацерацию) пораженных тканей [16]. На ранних этапах инфекции ферменты помогают патогену проникать вглубь ткани, разрушая клеточные стенки на пути роста гиф. На более поздних стадиях они способствуют расширению некротических очагов и полной гибели пораженных органов.

Кроме перечисленных «агрессивных» факторов, *Ss* вырабатывает ряд мелких сигнальных молекул, называемых эффекторными белками, воздействующих на иммунитет растения. В отличие от биотрофных грибов эффекторы некротрофов часто индуцируют запрограммированную гибель клеток (апоптоз) или подавляют иммунные сигнальные пути растения. У *Ss* выявлено несколько таких эффекторов, способных, например, вызывать некроз листьев и подавлять иммунитет растений при проникновении в клетки [15]. Механизмы действия этих эффекторов изучены неполностью, однако считается, что они помогают грибу ускорить отмирание тканей и преодолеть специфическую устойчивость отдельных хозяев. Наличие у *Ss* множества генов эффекторов широкого спектра действия объясняет способность этого патогена заражать филогенетически далекие виды растений.

Таким образом, патогенез *Ss* является результатом комплексного воздействия на растение. Оксалат создает благоприятную для гриба среду, ферменты разрушают структуры растения, а эффекторы подавляют иммунитет и убивают живые клетки (в том числе посредством индукции апоптоза). Совокупное действие этих факторов

вызывает быстрое увядание и гибель зараженных растений, что проявляется в поле как конечные симптомы белой гнили.

Помимо прямого разрушительного воздействия, *Ss* умеет «обманывать» защитные системы хозяина. Недавно было обнаружено, что гриб экспрессирует малые молекулы РНК, которые, проникая в клетки растения, подавляют экспрессию генов иммунитета (эффект РНК-интерференции в системе «Хозяин-патоген») [5]. В ответ растения выработали механизмы противодействия этому: например, у некоторых линий сои при заражении *Ss* активируется синтез жасмоновой кислоты (фитогормона, отвечающего за сопротивляемость некротрофам) и фенольных соединений с антигрибной активностью. К ним относятся, например, синапиновая и феруловая кислоты, продуцируемые соей, которые подавляют рост гриба, нарушая биосинтез эргостерола в его мембранах. Тем не менее полностью иммунных к патогену сортов сои пока не создано, поскольку у *Ss* всегда находятся средства преодоления защитных реакций растения.

Распространенность и вредоносность белой гнили сои. Возбудитель белой гнили демонстрирует космополитное распространение, поражая сельскохозяйственные культуры на всех обитаемых континентах в широком диапазоне климатических зон. Наибольший ущерб заболевание наносит в регионах умеренного климата с высокой влажностью в летнее время года. К таким зонам относятся север США и юг Канады, юг Бразилии и Аргентины, Европа (Франция, Германия, Европейская часть России, Украина, Беларусь и др.), Северный Китай, Новая Зеландия и Австралия. В засушливых регионах (Центральная Азия, Ближний Восток) белая гниль проявляется эпизодически, преимущественно на орошаемых полях. В тропиках (Юго-Восточная Азия, Африка) *Ss* также встречается, но обычно поражает овощные культуры в прохладный сезон в высокогорьях и защищенном грунте.

Исследования популяционной структуры показывают, что несмотря на глобальное распространение патогена, генетическая структура популяций *Ss* остается сравнительно однородной. Вероятно, это связано с частым переносом патогена в виде склероциев в партиях семян, с посадочным материалом и почвой. Штаммы гриба из тропиков и умеренной зоны в целом не сильно различаются агрессивностью, вирулентностью и генетической дифференциацией [33]. Однако на локальном уровне отдельные клоны *Ss* могут доминировать в популяциях при колонизации новых территорий. Наблюдаемое глобальное изменение климата способно привести к расширению ареала вредоносности белой гнили, что актуализирует задачи моделирования, мониторинга и поиска мер борьбы с ней в разных регионах.

По причине чрезвычайно широкой специализации патогена белая гниль наносит ущерб не только в поле, но и при хранении продукции, что особенно актуально для овощных. Например, при хранении корнеплодов (свекла, морковь) и капусты в овощехранилищах *Ss* и другие виды вызывает загнивание продукции, обуславливая огромные потери готовой продукции. В связи с этим фитосанитарные меры (очистка семян от склероциев, выявление и удаление зараженных растений) являются важной частью комплексной системы борьбы с *Ss* не только в пределах одной культуры, но и в целом в севообороте [30].

Ежегодные мировые потери урожая сои от белой гнили оцениваются в миллионы тонн. Например, в Северной Америке в отдельные сезоны недобор урожая из-за белой гнили достигал 1,67 млн т (более \$600 млн) [6]. Помимо снижения урожайности, болезнь ухудшает качество продукции: содержание масла и белка в семенах уменьшается на 15–20%, всхожесть снижается; зараженные склероциями партии семян нередко выбраковываются или понижаются в классе [14].

Методы фитосанитарного мониторинга и диагностики болезни. Эффективная защита посевов сои от белой гнили невозможна без регулярного фитосанитарного

мониторинга и быстрой диагностики болезни. Мониторинг включает в себя плановый осмотр посевов сои на наличие признаков белой гнили, оценку распространенности и развития болезни и прогноз риска эпифитотии для принятия своевременных мер защиты.

Стандартным подходом является полевой осмотр растений. Обычно обследование посевов сои проводят в период цветения и налива бобов, отмечая типичные признаки белой гнили: водянистые бурые пятна на стеблях и листьях, белый ватоподобный налет мицелия на пораженных участках, черные склероции снаружи или внутри тканей. Как правило, первые видимые симптомы появляются через 7–14 дней после заражения в виде появления светло-коричневых пятен на стебле (в средней части или у основания), которые быстро разрастаются и покрываются белым мицелием. Побеги выше места поражения увядают и отмирают, а внутри пораженного стебля часто заметны черные склероции. Степень развития болезни оценивают по проценту зараженных растений, индексу поражения, площади поражения и др. Простые визуальные показатели (например, доля увядших растений) используют для принятия решения о целесообразности фунгицидной обработки. Достоинствами визуального мониторинга являются простота и низкая стоимость, а недостатками – невозможность выявить раннюю скрытую инфекцию и риск перепутать начальные симптомы с другими болезнями – например, с пятнистостями или с пепельной гнилью. Часто склероции попадают в партии семян сои, подсолнечника и рапса при обмолоте и при отсутствии сортировки приводят к вспышкам болезни на свободных от инфекции полях (рис. 3).

Для точной идентификации применяют лабораторные методы – в частности, микологический анализ. Для этого части стеблей или бобов с подозрительными симптомами поверхностно дезинфицируют и помещают на питательную среду (агар Чапека, картофельно-декстрозный агар и др.). При инкубации в течение 2–5 дней при температуре 20–25°C из пораженных тканей вырастает характерный белый мицелий *Ss*, часто с мелкими склероциями (рис. 4). Чистую культуру затем исследуют микроскопически для подтверждения морфологии мицелия, склероциев и спороношения (рис. 4). Этот классический метод остается «золотым стандартом» диагностики, однако он трудоемок и требует от персонала специальных навыков по идентификации грибов.



Рис. 3. Склероции *Sclerotinia sclerotiorum* в партии неочищенных семян сои урожая 2024 г.

Figure 3. *Sclerotinia sclerotiorum* sclerotium in a batch of unpeeled soybean seeds harvested in 2024

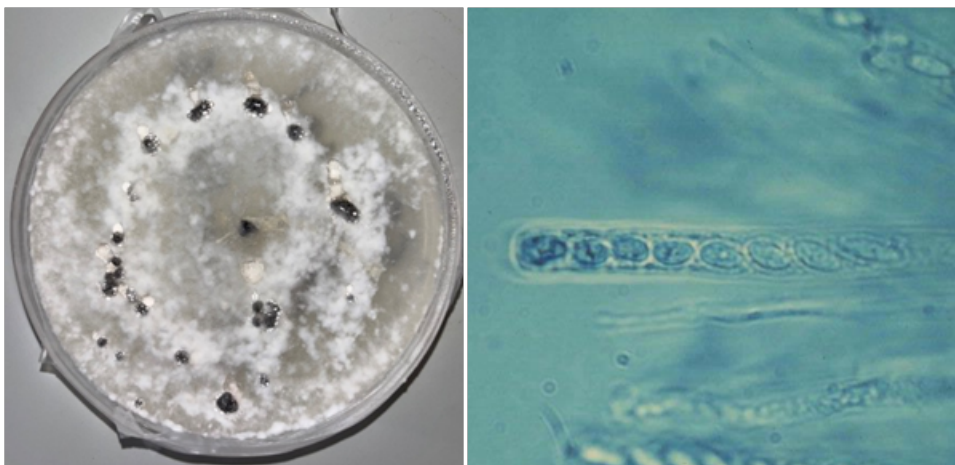


Рис. 4. Колония штамма *Sclerotinia sclerotiorum*, выделенная из партии семян сои на среде КГА (слева), и микрофотография аска и аскоспор (справа)

Figure 4. A colony of the *Sclerotinia sclerotiorum* strain isolated from a batch of soybean seeds on PDA medium (left) and a micrograph of ascus and ascospores (right)

Несмотря на то, что *Ss* обычно легко распознать по симптомам, при смешанных инфекциях или в запущенных случаях визуальная диагностика затруднена. Для таких ситуаций разработаны экспресс-методы генетической идентификации *Ss* в растительных и почвенных пробах. Они основаны на выявлении ДНК патогена с помощью ПЦР со специфичными праймерами. Например, опубликованы ПЦР-системы, амплифицирующие фрагменты ITS-регионов и гена эндополигалактуроназы *Ss*, не дающие продукта с ДНК других близкородственных грибов [1, 40]. Использование ПЦР в реальном времени (qPCR) позволяет количественно оценивать содержание ДНК патогена и степень зараженности семян или почвы. Также разработаны методики обнаружения *Ss* в почве и партиях семян с уровнем зараженности 0,5% путем предобогащения (инкубации проб для прорастания склероциев) с последующим ПЦР-анализом, что существенно повышает чувствительность [1]. Ограничением ПЦР-методов является необходимость наличия лаборатории, а также квалифицированных кадров.

Альтернативой ПЦР является изотермическая амплификация (LAMP, loop-mediated isothermal amplification). Для *Ss* разработаны LAMP-системы, позволяющие выявлять патоген непосредственно в поле без сложного оборудования. Например, набор *Ss*-cLAMP с кальций-ионным индикатором применяют для обнаружения ДНК *Ss* в пробах почвы и семян без выделения ДНК, по визуальному изменению окраски пробы. LAMP отличается высокой чувствительностью и специфичностью. Главными его преимуществами являются быстрота (весь анализ занимает около 1 ч) и возможность использования в портативном формате непосредственно в поле [40].

Разработан также ряд иммунологических тестов для диагностики возбудителя белой гнили. Созданы поликлональные и моноклональные антитела к антигенам *Ss*, на основе которых выпускают тест-системы для иммуноферментного анализа (ИФА), позволяющие обнаруживать мицелий гриба в растительных образцах. Также созданы проточные сенсоры, способные «улавливать» аскоспоры *Ss* в воздухе, что дает еще один инструмент мониторинга [32].

Поскольку первичное заражение растений часто осуществляется аскоспорами, передающимися воздушными потоками, для диагностики возбудителя белой гнили

перспективным является применение аэродиагностики и сенсорных технологий. Показано, что больные растения отличаются от здоровых температурой листьев по причине нарушенной транспирации, поэтому термовизоры (инфракрасная съемка) могут выявлять поражения белой гнилью на поле. На практике комбинация различных сенсоров (визуальных, спектральных, газовых) совместно с методами машинного обучения уже позволяет выявлять белую гниль в опытах на рапсе с точностью около 90%. В перспективе такие автоматизированные системы существенно облегчат мониторинг и локализацию очагов *Ss* на больших площадях.

Таким образом, в распоряжении агронома имеется широкий спектр методов диагностики белой гнили: от простого визуального осмотра до высокоточных молекулярных и сенсорных технологий. На практике наилучшим считается комбинированный подход, состоящий из регулярных осмотров посевов, дополняемых экспресс-диагностикой подозрительных случаев (ПЦР, ИФА) и использованием прогностических моделей в сезоны с высоким риском. Такой мониторинг позволяет своевременно применять защитные меры и предотвращать эпифитотийное развитие белой гнили [6].

Стратегии борьбы с S. sclerotiorum. Защита сои от белой гнили требует комплексного подхода, включающего в себя агротехнические, биологические и химические меры. Устойчивость склероциев к неблагоприятным условиям, широкий круг хозяев и способность патогена заражать растения на разных этапах развития усложняют борьбу с *Ss*. Ни один метод не обеспечивает полного предотвращения болезни при одиночном применении, поэтому практикуется интегрированная система, то есть сочетание нескольких приемов, направленных на снижение запаса инокулюма в почве, создание неблагоприятных условий для прорастания склероциев и защиту растений в критические фазы.

Агротехнические мероприятия. Правильная агротехника играет решающую роль в ограничении вредоносности белой гнили. Важно соблюдать севооборот, возвращать сою на поле не ранее чем через 3–4 года после чувствительных культур (рапса, подсолнечника, других бобовых). Длительный разрыв между восприимчивыми культурами способствует естественной гибели склероциев в почве и снижению запаса инокулюма. Хорошими предшественниками для профилактики белой гнили на сое служат нечувствительные культуры: зерновые злаки (кукуруза, пшеница, сорго), многолетние травы. Глубокая зяблевая вспашка с оборотом пласта заделывает склероции на глубину более 10–15 см, откуда они не способны прорасти и образовывать апотеции, и ускоряет их микробиологическое разложение. Однако при последующей вспашке склероции могут вновь оказаться на поверхности, поэтому глубокую обработку почвы сочетают с севооборотом. Пространственная изоляция посевов сои от прошлогодних очагов белой гнили (например, размещение новых посевов на расстоянии более 500 м от поля, где в прошлом году выращивали сою) существенно снижает вероятность заноса аскоспор из апотециев, поскольку распространение спор обычно ограничено несколькими сотнями метров. Если соя выращивается с орошением, режим полива регулируют так, чтобы в фазу цветения не создавать длительного переувлажнения, — например, избегать дождевания цветущих растений. После уборки урожая необходимо уничтожать (через измельчение и заделку дисками) растительные остатки, особенно сильно пораженные, что уменьшает количество склероциев на поверхности. Благодаря комплексу агротехнических мер исходная инфекционная загрузка почвы может быть снижена примерно на 50–80%, однако полностью предотвратить вспышки одними агротехническими методами не удастся [9].

Биологический контроль. Биологические методы защиты основаны на применении естественных антагонистов и гиперпаразитов *Ss*. Значительных результатов удалось добиться с помощью специализированного паразита склероциев — гриба

Coniothyrium minitans. Препараты на его основе (например, Contans® WG в США) вносятся в почву или по растительным остаткам методом опрыскивания [11]. Споры *C. minitans* прорастают и инфицируют склеротии, разрушая их, тем самым снижая запас инокулюма. Показано, что при регулярном применении *C. minitans* в течение 2–3 лет количество жизнеспособных склеротиев уменьшается на 70–90%, и это приводит к заметному снижению пораженности белой гнилью [34].

К другим антагонистам *Ss* относятся грибы рода *Trichoderma* (*T. harzianum*, *T. viride* и др.), а также некоторые почвенные бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces* [2, 36]. Препараты на основе грибов *Trichoderma* применяют путем внесения в почву или для обработки семян. Антагонист действует комплексно: конкурируя с *Ss* за субстрат, вырабатывая лизирующие ферменты и антибиотики и индуцируя системную устойчивость растений [4]. В полевых опытах внесение препаратов на основе *Trichoderma* sp. снижало пораженность сои белой гнилью на 30–50% по сравнению с контролем [34]. Бактериальные биопрепараты на основе *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Serratia plymuthica* также проявляют эффективность, уменьшая развитие болезни на 20–40%. Их действие связано с колонизацией корней и синтезом метаболитов, подавляющих рост патогена [8].

Интересным приемом является создание «ловушек» для аскоспор *Ss* опрыскиванием цветущих растений суспензией мицелия дрожжевых грибов (*Saccharomyces cerevisiae*). Попадая на обработанные дрожжами поверхности, аскоспоры конкурируют с ними и не прорастают, что снижает инфицирование [15]. Помимо этого, перспективным является применение различных элиситоров (например, ацибензолар-С-метила) и других агентов (включая кремниевые удобрения), повышающих общий иммунитет растений для профилактики белой гнили.

В целом биологические методы экологически безопасны, но, как правило, не обеспечивают полного контроля болезни при среднем и высоком инфекционном фоне. Их использование оправдано как профилактическое средство или в составе интегрированной защиты – например, в сочетании с относительно устойчивыми сортами и другими мерами борьбы [34].

Химический метод. Применение фунгицидов традиционно лежит в основе защиты восприимчивых культур от белой гнили. Критически важно профилактическое опрыскивание в фазу цветения, поскольку именно в этот период цветки и завязи наиболее уязвимы для инфицирования аскоспорами. По данным исследований, наибольший эффект для подавления прорастания спор и роста мицелия *Ss* дают действующие вещества из групп бензимидазолов (беномил, карбендазим), дикарбоксимидов (ипродион), медьсодержащих соединений (хлорокись меди), стробилуринов (азоксистробин), триазолов (тебуконазол, пропиконазол), карбоксаминов (ингибиторы сукцинатдегидрогеназы, SDHI: боскалид, флуопирам) и фенилпирролов (флудиоксонил).

В России в Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов по состоянию на апрель 2025 г. для борьбы с белой гнилью на сое методом опрыскивания в период вегетации зарегистрировано всего 2 смесевых фунгицида на основе азоксистробина и тебуконазола: Брандер, КС и Азоксит, КС. В целом для борьбы с белой гнилью в стране зарегистрировано 52 фунгицида, из них 7 – биологических, 10 – для обработки семян. Фунгициды зарегистрированы на 7 культурах: соя (опрыскивание в период вегетации), рапс (опрыскивание в период вегетации), подсолнечник (опрыскивание и обработка семян), салат-латук (внесение с поливом), томат защищенного грунта (опрыскивание и полив грунта), виноград (опрыскивание в период вегетации) и морковь (обработка корнеплодов перед закладкой на хранение). Представлено 19 однокомпонентных, 26 двухкомпонентных и 7 трехкомпонентных фунгицидов с 12 механизмами действия согласно классификации FRAC (Комитета

по предотвращению резистентности к фунгицидам), включая 1 механизм действия биологических фунгицидов.

В составе фунгицидов представлены действующие вещества с кодом механизма действия BM02 по классификации FRAC: *Bacillus mojavenensis*, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*; с кодом FRAC11 (стробилуринового ряда) на основе метоксикарилатов азоксистробиноном, димоксистробиноном, пикоксистробиноном, на основе оксимино-ацетатов – крезоксим-метилом, на основе метоксикарбаматов – пиракло-стробиноном, на основе дигидродиоксазинов – флуоксастробиноном, на основе оксазолидиндионов – фамоксадоном. Другая большая группа действующих веществ с кодом FRAC3 (триазоловый ряд) представлена триазолами (дифеноконазол, протиоконазол, тебуконазол, ципроконазол, эпоксиконазол, ипконазол, пропиконазол, флутриафол) и имидазолами (имазалил). Код FRAC1 представлен бензимидазолами (беномил), код 2 – дикарбоксамидами (ипродион), код 4 – ацилаланинами (мефеноксам), код 7 – пиридинкарбоксамидами (боскалид), пиразол-4 – карбоксамидами (пентиопирад), код 9 – аналино-пиримидинами (ципродинил), код 12 – фенилпирролами (флудиоксонил), код 27 – цианоацетамид-оксимами (цимоксанил), код 29–2,6-динитро-анилинами (флу-азинам), код M 03 – дитиокарбаматами (тирам).

Таким образом, большинство фунгицидов содержат в своем составе действующие вещества. Механизм их действия заключается в ингибировании митохондриального дыхания путем воздействия на комплекс III цитохромоксидазы (стробилуриновый ряд; код по FRAC11; 46% от всех фунгицидов) и действием на C14-деметилазу при синтезе стеролов (триазоловый ряд; код по FRAC3; 44% от всех фунгицидов). В связи с тем, что действующие вещества с этими механизмами действия относятся к группе с высоким (стробилурины) и средним (триазолы) риском возникновения резистентных форм согласно методическим указаниям FRAC, необходимо правильное чередование данных фунгицидов для профилактики возникновения резистентных популяций гриба.

Современные коммерческие фунгициды часто являются комбинированными, содержащими действующие вещества двух и более классов (например, SDHI + триазол: боскалид + дифеноконазол и др.), что расширяет спектр их действия и снижает риск возникновения резистентности патогена. Эффективность таких фунгицидов обычно высока: отмечаются снижение пораженности сои на 60–80% и прибавка урожайности на 0,5–0,8 т/га по сравнению с необработанным контролем. Например, в опытах в Европе опрыскивание смесью флуопирама и протиоконазола снизило развитие белой гнили на 85%, а урожайность выросла на 20–25% [17].

Ограничивающими факторами химического метода являются высокая стоимость и экологические риски, поэтому кратность обработок обычно невелика. Как правило, в сезон проводят лишь одно профилактическое опрыскивание в начале цветения и иногда, при затяжной влажной погоде, делают повторную обработку через 10–14 дней. Интенсивное или неправильное применение фунгицидов способно привести к появлению устойчивых популяций патогена. В частности, в Бразилии, Китае и США выявлены штаммы *Ss*, устойчивые к рекомендуемым в полевых условиях нормам применения боскалида (ингибитор SDHI), во Франции – к карбендазиму (класс бензимидазолы) [5, 26, 33]. Поэтому рекомендуется чередовать препараты с разными механизмами действия в соответствии с рекомендациями FRAC.

В практике защиты сои от белой гнили складывается следующая интегрированная схема: сочетание агротехнических приемов (севооборота, обработки почвы, создания условий для разложения растительных остатков) с обработкой биопрепаратами снижает запас склероциев в почве, а с началом цветения (при прогнозе влажной погоды) проводят однократное опрыскивание системным фунгицидом для

защиты цветков и завязей – критически важных для формирования урожая органов. Такой комплекс мер позволяет существенно сократить вредоносность белой гнили [3, 28].

Устойчивость сортов к S. sclerotiorum и подходы к селекции. Одним из наиболее перспективных методов борьбы с белой гнилью сои является использование устойчивых сортов. Генетическая устойчивость считается наиболее экологичным и экономически эффективным способом защиты растений, однако создание таких сортов осложняется биологией самого патогена. *Ss* является некротрофом с широким кругом хозяев, и растения в процессе эволюции не выработали против него специфических иммунных механизмов, как от биотрофов, например, против ржавчины или вирусов [39].

Устойчивость сои к белой гнили носит полигенный и частичный характер. Полностью иммунные генотипы пока не найдены [18], но есть линии, ограничивающие развитие инфекции. Такие растения обладают более жесткими тканями, локализованным некрозом, а также способностью к повышенной продукции фитоалексинов (например, глицеоллина) и фенольных соединений [17]. Устойчивые сорта также нейтрализуют активные формы кислорода, подавляя апоптоз из-за действия оксалоовой кислоты – ключевого фактора патогенности [17]. Транскриптомные исследования показали активацию генов жасмоновой кислоты и этилена у слабовосприимчивых линий сои. Также показано, что устойчивые сорта накапливают фенольные кислоты, ингибирующие рост гриба *in vitro*. Устойчивость контролируется множеством локусов количественных признаков (QTL), каждый из которых снижает поражение на 5–10%. Наиболее значимыми являются участки на хромосомах 15, 20 и 8 (QTL WM_Res), а также ген *PROH* (пролин-гидроксилаза) на хромосоме 3, усиливающий антиоксидантную защиту [17]. Пирамидирование 3–4 QTL в одном генотипе позволяет добиться 20–30%-ного снижения поражаемости патогеном. В исследованиях в США в 2018 г. подтверждена стабильность наследования и экспрессии 33 QTL в потомстве сортов PI 194639, PI 391589A и Skylla [17]. По причине отсутствия иммунитета по типу «Ген за ген» изучаются гены общего стресс-ответа. Например, введение гена *OxO* (оксалаатоксидазы) из пшеницы повысило устойчивость у сои, рапса и подсолнечника к патогену [35]. Исследуются также другие методы редактирования генома: например, показано, что отключение гена *LSD1* у рапса снижает чувствительность к оксалату. Однако в России и в некоторых других странах использование генетически отредактированных растений ограничено законодательно.

Селекция активно ведется в США, Китае, Канаде [18], причем применяются как классические методы, так и методы маркер-ассоциированной селекции (МАС). В США выведены слабовосприимчивые к белой гнили линии WM (resistant to White Mold), в Китае – сорта ZX. Из представленных в России сортов перспективны Хатсон, Декабит [24], Бриз (<https://fncdv.ru/>), СК Алекса (<https://co-ko.ru/>), заявленные оригинаторами как слабовосприимчивые к основным патогенам, в том числе к белой гнили.

Для оценки устойчивости сортов сои разработаны методы искусственного заражения. Одним из них является инокуляция агаром с мицелием на стебель с последующим измерением длины некроза через несколько дней. Другим часто применяемым методом является опрыскивание растений суспензией измельченного мицелия с последующим учетом процента поражения. Оценки в поле и в условиях теплиц или фитотронов коррелируют умеренно ($r = 0.5–0.6$), но позволяют предварительно отбирать устойчивые или слабовосприимчивые генотипы [17]. Перспективным направлением является также межвидовая гибридизация. У диких видов, например, *Glycine soja*, могут быть обнаружены уникальные QTL и гены, отсутствующие у культурных сортов. Также интерес представляют белки *PGIP* – ингибиторы полигалактуроназы,

обнаруженные у гороха и фасоли, которые потенциально могут быть перенесены и экспрессироваться в сое [15].

В заключение стоит отметить, что несмотря на отсутствие полностью устойчивых сортов, уже существуют линии, у которых поражаемость существенно ниже, чем у традиционно возделываемых образцов. Постепенное внедрение таких генотипов в сочетании с агротехническими и биологическими мерами дает возможность существенно снизить ущерб от белой гнили.

Перспективы исследований и инновационные подходы в защите от белой гнили. Несмотря на значительные успехи в изучении биологии *Ss* и мер борьбы, белая гниль сои до сих пор остается серьезной проблемой. Для ее решения требуются дальнейшие исследования и применение новых технологий. Ниже перечислены наиболее перспективные направления и разработки, которые в будущем могут повысить эффективность защиты сои от белой гнили.

1. *Усовершенствование и развитие биологических методов.* Разрабатываются новые биопрепараты против *Ss*. Перспективным оказался ряд штаммов бактерий рода *Bacillus*. Например, штамм *B. velezensis* 20507 подавлял рост *Ss* благодаря синтезу комплекса антигрибных метаболитов (диффицидин, фенгизин, сурфактин и др.) и при обработке растений существенно снижал развитие белой гнили [Cheng]. Выделены также антагонистические бактерии, специализированные именно против *Ss*. Описан, в частности, новый штамм *Bacillus cereus* (HF10), который тормозил рост *Ss* на 79% на питательной среде *in vitro* и на 70–80% в полевых испытаниях снижал поражение капусты, практически не влияя на другие почвенные грибы [8]. Продолжаются полевые испытания биопрепаратов на основе известных природных антагонистов. В этом плане перспективны некоторые штаммы *Trichoderma* sp. и *Bacillus subtilis*. Недавние опыты на рапсе показали, что обработка семян специфическим штаммом *B. subtilis* (RSS-1) уменьшала частоту развития белой гнили на всходах и молодых растениях, повышая их сохранность и урожайность.

Таким образом, формируется новое поколение биофунгицидов – как однокомпонентных антагонистов, так и комплексных препаратов, которые в интегрированных системах защиты способны существенно снизить запас инокулюма *Ss* в почве.

Новым направлением является использование миковирусов – вирусов, инфицирующих мицелий и склероции *Ss*. У этого патогена обнаружено более 10 различных вирусов. Некоторые из них вызывают гиповирулентность, то есть значительно снижают вирулентность зараженных штаммов. Например, вирус *SsHADV-1* (ДНК-вирус из семейства *Genomoviridae*) полностью подавляет способность *Ss* образовывать апотеции и синтезировать оксалат. Полевые опыты продемонстрировали, что обработка почвы «гиповирулентными» штаммами гриба (носителями миковирусов) уменьшает заражаемость растений в поле и, кроме того, индуцирует у них системную устойчивость к другим патогенам [19]. Также перспективным является опрыскивание склероциев или растений суспензией выделенных вирусов, однако эффективные способы доставки вирусных частиц в мицелий и склероции патогена пока не разработаны.

Кроме вирусов, интерес представляет использование эндофитных микроорганизмов для ранней колонизации тканей растений и индуцирования устойчивости. Показано, что обработка растений некоторыми эндофитными грибами (например, непатогенными штаммами *Cladosporium* или *Penicillium*, выделенными из тканей подсолнечника и рапса) может индуцировать у растений системную устойчивость, и в этом случае при последующем заражении *Ss* размеры некрозов существенно уменьшаются [31]. Важной задачей является и управление ризосферным микробиомом, то есть повышение супрессивности почвы путем внесения органических добавок (микробных

удобрений), стимулирующих развитие в почве популяций гиперпаразитов склероциев и других антагонистов *Sclerotinia* [23].

Обогащение микробиома полезными штаммами через инокуляцию семян, обработку почвы или селекцию симбиотических сообществ рассматривается как экологически безопасный способ повысить естественную защиту растений от белой гнили. Наконец, большие надежды возлагаются на синтетическую биологию, то есть конструирование антагонистов с улучшенными свойствами, например, штаммы *Trichoderma* sp., продуцирующие оксалаксоксидазу или усиливающие устойчивость растений. Все перечисленные биологические стратегии в перспективе могут существенно снизить пестицидную нагрузку на агроценозы.

2. РНК-интерференция. Метод РНК-интерференции рассматривается как инновационный и перспективный метод защиты растений от фитопатогенов. Технология Host-Induced Gene Silencing (HIGS) предполагает «встраивание» в растение фрагментов РНК, нацеленных на жизненно важные гены патогена, что приводит к сайленсингу (подавлению экспрессии) этих генов при инфицировании. В экспериментах на рапсе этот подход продемонстрировал многообещающие результаты. Так, трансгенные линии *Brassica napus*, экспрессирующие двуцепочечную РНК против гена *AbHydrolase-3* гриба, проявили значительную устойчивость к *Ss*. В результате этого площадь некрозов на листьях и стеблях существенно сократилась по сравнению с контрольными растениями [38]. Аналогично на сое было показано, что экспрессия в растении РНК, комплементарной гену оксалоацетат-ацетилгидролазы (*Ssoah1*) *Ss*, защищает от развития белой гнили. В инфицированных трансгенных растениях уровень транскриптов *Ssoah1* в прорастающей грибнице был снижен, и патоген терял вирулентность [25]. Этот принцип был реализован и без создания ГМО. Так, американским ученым удалось с помощью вирусного вектора (вируса пятнистости стручков фасоли) в сое запустить синтез siRNA против того же гена *Ssoah1*, что также снизило развитие болезни.

Другая стратегия использования РНК-интерференции Spray-Induced Gene Silencing (SIGS) предполагает нанесение на растение раствора двуцепочечной РНК, нацеленной на мРНК патогена. *Ss* способен поглощать внешние молекулы РНК, поэтому опрыскивание листьев специальными dsRNA может подавлять экспрессию генов вирулентности гриба (например, генов, участвующих в биосинтезе оксалата) и тем самым защищать растение [25, 38]. Несмотря на то, что технологии HIGS/SIGS находятся на стадии исследований, уже получены доказательства эффективности РНК-интерференции в отношении *Ss* в лабораторных условиях. Ожидается, что дальнейшее развитие этого направления позволит создавать высокоспецифичные «РНК-фунгициды», безопасные для окружающей среды и с минимальным влиянием на микробиом почвы.

3. Платформы для прогнозирования массового развития заболевания (цифровые платформы, споровые ловушки, климатические модели). Цифровые технологии и модели позволяют заблаговременно оценивать риск развития белой гнили и оптимизировать применение мер защиты. В сельскохозяйственных предприятиях ряда стран внедряются онлайн-платформы и мобильные приложения, интегрирующие погодные данные, информацию о состоянии посевов и модели вспышек *Ss*. Эти модели с достаточно высокой точностью (до 80–85%) позволяют определять оптимальные сроки профилактических обработок фунгицидами, что особенно важно при узком «окне» эффективного применения, а именно в фазу цветения.

Для непосредственного мониторинга наличия инокулюма в полевых условиях применяются споровые ловушки с автоматическим детектированием патогена. Современные системы способны улавливать аскоспоры в воздухе и с помощью ПЦР

в реальном времени или иммуносенсоров определять присутствие ДНК *Ss* в пробе воздуха [10]. Также предложены и новые технические решения, вплоть до микрофлюидных чипов для высокочувствительного улавливания единичных спор *Ss* непосредственно в поле [10]. В совокупности с метеоданными (температура, влажность, продолжительность влажного периода) такие датчики позволяют в режиме реального времени оценивать вероятность инфицирования растений.

Интеграция климатических моделей с фитопатологическими данными уже реализована в виде геоинформационных систем прогноза, выдающих предупреждения о риске эпифитотии белой гнили в различных регионах [29]. Таким образом, цифровые платформы и автоматизированные ловушки спор служат основой для системы поддержки принятия решений, позволяя товаропроизводителям своевременно проводить обработки и предотвращать вспышки белой гнили [10, 29].

4. *Генная инженерия и селекция сортов с вертикальной устойчивостью.* Современные технологии открывают новые возможности для получения сортов, устойчивых к белой гнили, путем направленных генетических модификаций и традиционной селекции. Одним из перспективных подходов является редактирование генома с помощью CRISPR/Cas9. Например, в рапсе методом CRISPR удалось нокаутировать гены, отвечающие за опадание цветков (гомологи гена *IDA*, *Inflorescence Deficient in Abscission*), что снизило распространение *Ss* за счет предотвращения переноса возбудителя с опавших лепестков на листья и стебли. Другим направлением является создание трансгенных растений, инактивирующих оксалат [13].

Параллельно проводится классическая селекция на устойчивость и поиск в природе источников генов, обуславливающих устойчивость. С помощью ассоциативного картирования недавно идентифицирован ген *BnaA07.MKK9*, кодирующий киназу, активация которой инициирует защитные реакции (синтез этилена, кампестерина, глюкозинолатов и пероксида водорода) [12]. Аллели этого гена обеспечивают повышение полевой устойчивости рапса к белой гнили на 30% [35]. Поиск подобных генетических факторов осуществляется и в отношении сои; ожидается, что они вскоре станут доступными для использования в коммерческой селекции [35].

Одновременно ведется поиск принципиально новых химических соединений с антисклероциальной активностью. Изучаются, например, производные растительных фитоалексинов, нехарактерных для растений-хозяев гриба, а также различные низкомолекулярные ингибиторы прорастания склероциев. В перспективе внедрение новых фунгицидных молекул в сочетании с уже существующими методами (агротехническими и биологическими) позволит создать более стабильную систему защиты от белой гнили.

Выводы

Conclusions

Белая гниль сои, вызываемая грибом *Sclerotinia sclerotiorum*, остается одной из самых вредоносных болезней сои в регионах с умеренно влажным климатом, вызывая значительные потери урожая и ухудшая качество продукции. Защита культуры требует комплексного подхода, включающего в себя агротехнические приемы (севооборот, обработку почвы, уничтожение растительных остатков), применение биологических агентов (антагонисты на основе *Trichoderma*, *Bacillus*, *Coniothyrium minitans*) и химическую защиту с использованием фунгицидов в критические фазы развития растений. Диагностика болезни базируется на сочетании визуального осмотра, микологического анализа, молекулярных и иммунологических методов (ПЦР, LAMP, ИФА).

Современные исследования направлены на разработку инновационных решений: биофунгицидов нового поколения, методов РНК-интерференции, использования микровирусов и прогнозирование вспышек с использованием цифровых платформ. Большое внимание уделяется селекции устойчивых сортов сои включая использование методов маркер-ассоциированной селекции, идентификацию QTL, ответственных за устойчивость и применение методов генной инженерии. Интеграция перечисленных мер создает основу для эффективной, экологически безопасной и устойчивой системы защиты сои от белой гнили.

Список источников

1. Блинова С.А., Конышева М.Л., Шварцев А.А., Соловьев А.А. и др. Оптимизация молекулярно-генетических методов диагностики грибов рода *Sclerotinia* // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2022. № 6. С. 31–42. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-6-31-42>
2. Маслиенко Л.В., Курилова Д.А., Шипиевская Е.Ю. Скрининг штаммов антагонистов возбудителя белой гнили рапса // *Масличные культуры*. 2012. № 2. С. 183-191
3. Albert D., Dumonceaux T., Carisse O., Beaulieu C. et al. Combining desirable traits for a good biocontrol strategy against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Microorganisms*. 2022;10(6):1189. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061189>
4. Alkooranee J.T., Aledan T.R., Ali A.K., Lu G. et al. Detecting the hormonal pathways in oilseed rape behind induced systemic resistance by *Trichoderma harzianum* TH12 to *Sclerotinia sclerotiorum*. *PLoS One*. 2017;12(1): e0168850. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168850>
5. Andrade C.M., Tinoco M.L.P., Rieth A.F., Maia F.C.O. et al. Host-induced gene silencing in the necrotrophic fungal pathogen *Sclerotinia sclerotiorum*. *Plant Pathology*. 2016;65(4):626-632. <https://doi.org/10.1111/ppa.12447>
6. Bardin S.D., Huang H.C. Research on biology and control of *Sclerotinia* diseases in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2001;23:88-98. <https://doi.org/10.1080/07060660109506914>
7. Bolton M.D., Thomma B.P.H.J., Nelson B.D. *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary: biology and molecular traits of a broad host range pathogen. *Molecular Plant Pathology*. 2006;7(1):1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2005.00316.x>
8. Cheng Y., Lou H., He H., He X. et al. Genomic and biological control of *Sclerotinia sclerotiorum* using an antagonistic strain *Bacillus velezensis* 20507. *Frontiers in Microbiology*. 2024;15:1385067. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1385067>
9. Derbyshire M.C., Denton-Giles M. The control of *Sclerotinia* stem rot on oilseed rape (*Brassica napus*): current practices and future opportunities. *Plant Pathology*. 2016;65(6):859-877. <https://doi.org/10.1111/ppa.12517>
10. Duarte P.A., Menze L., Shoute L., Zeng J. et al. Highly efficient capture and quantification of airborne *S. sclerotiorum* spores using a nanoelectrode-activated microwell array. *ACS Omega*. 2022;7(1):459-468. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04878>
11. Elsheshtawi M., Elkhaky M.T., Sayed S.R. Integrated control of white rot disease on beans caused by *Sclerotinia sclerotiorum* using Contans® and reduced fungicide application. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2017;24(2):405-409. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.038>
12. Fan J., Li J., Ren S. et al. Natural variation in *BnaA07.MKK9* confers resistance to *Sclerotinia* stem rot in oilseed rape. *Nature Communications*. 2024;15:5059. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49504-6>

13. Geng R., Shan Y., Li L., Shi C.-L. et al. CRISPR/Cas9-editing of *BnaIDA* genes prevents silique shattering, floral organ abscission and Sclerotinia spread in rapeseed. *Plant Communications*. 2022;3(6):100452. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100452>
14. Gustavo C.B., André B.P., David S.J., Felipe F.S. et al. Incidence and severity of white mold for soybean under different cultural practices and local meteorological conditions. *Plant Disease*. 2015;31(4):1004-1014. <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n4a2015-26125>
15. Hossain M.M., Sultana F., Rubayet M.T. et al. White mold: a global threat to crops and key strategies for its sustainable management. *Microorganisms*. 2024;13(1):4. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010004>
16. Kabbage M., Yarden O., Dickman M.B. Pathogenic attributes of *Sclerotinia sclerotiorum*: switching from a biotrophic to necrotrophic lifestyle. *Plant Pathology*. 2015;64(5):1004-1016. <https://doi.org/10.1111/ppa.12344>
17. Kandel R., Chen C.Y., Grau C.R. et al. Soybean resistance to white mold: evaluation of soybean germplasm under different conditions and validation of QTL. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:505. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00505>
18. Kandel Y.R., Hunt C., Ames K. et al. Meta-analysis of yield response of soybean to foliar fungicides in the United States and Canada. *Plant Disease*. 2021;105(5):1382-1389. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-20-1578-RE>
19. Khan H.A., Mukhtar M., Bhatti M.F. Mycovirus-induced hypovirulence in notorious fungi *Sclerotinia*: a comprehensive review. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2023;54(4):2071-2091. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01073-9>
20. Lehner M.S., de Paula Junior T.J., Del Ponte E.M., Mizubuti E.S.G. et al. Independently founded populations of *Sclerotinia sclerotiorum* from a tropical and a temperate region have similar genetic structure. *PLoS One*. 2017;12(4): e0173915. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173915>
21. Liu S., Fu L., Chen J. et al. Baseline sensitivity of *Sclerotinia sclerotiorum* to metconazole and the analysis of cross-resistance with carbendazim, dimethachlone, boscalid, fluazinam, and fludioxonil. *Phytoparasitica*. 2021;49:123-130. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00867-8>
22. Ma W., Ding J., Jia Q., Li Q. et al. A novel strain of *Bacillus cereus* with a strong antagonistic effect specific to *Sclerotinia* and its genomic and transcriptomic analysis. *Microorganisms*. 2024;12(3):611. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030611>
23. Massawe V.C., Hanif A., Farzand A., Mburu D.K. et al. Volatile compounds of endophytic *Bacillus* spp. have biocontrol activity against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Phytopathology*. 2018;108(12):1373-1385. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-18-0118-R>
24. Maui A., Sauranbaev B.N., Orazbayev K.I. Soybean pathogens in the southeast of Kazakhstan. *Journal of social, humanities and administrative sciences*. 2017;3(5):20-26.
25. McCaghey B., Shao X., Kurzejeski E., Lindstrom T. et al. Host-induced gene silencing of a *Sclerotinia sclerotiorum* oxaloacetate acetylhydrolase using *Bean pod mottle virus* reduces white mold severity on soybean. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:677631. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.677631>
26. Mueller D.S., Chilvers M.I., Malvick D.K., Mueller J.G. et al. Fungicide sensitivity of *Sclerotinia sclerotiorum* isolates from soybean in the United States // *Plant Disease*. 2023;107(4):1231-1238. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-22-1707-RE>
27. Newman T.E., Derbyshire M.C., Solis-Moya E. et al. The broad host range pathogen *Sclerotinia sclerotiorum* produces multiple effector proteins that induce host cell death intracellularly. *Molecular Plant Pathology*. 2023;24(7):866-881. <https://doi.org/10.1111/mpp.13291>

28. O'Sullivan C.A., Belt K., Thatcher L.F. Tackling control of a cosmopolitan phytopathogen: *Sclerotinia*. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:707509. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.707509>
29. Reich J., Lamma R.S., Venette J., Chilvers M.I. et al. Predicting airborne ascospores of *Sclerotinia sclerotiorum* through machine learning and statistical methods. *Plant Pathology*. 2024;73(6):1-16. <https://doi.org/10.1111/ppa.13902>
30. Saharan G.S., Mehta N. *Sclerotinia Diseases of Crop Plants: Biology, Ecology and Disease Management*. Berlin, Germany: Springer, 2008:531.
31. Schmidt C.S., Mrnka L., Lovecká P., Frantík T. et al. Bacterial and fungal endophyte communities in healthy and diseased oilseed rape and their potential for biocontrol of *Sclerotinia* and *Phoma* disease. *Scientific Reports*. 2021;11:3657. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81937-7>
32. Shoute L.C.T., Anwar A., MacKay S. et al. Immuno-impedimetric Biosensor for Onsite Monitoring of Ascospores and Forecasting of *Sclerotinia* Stem Rot of Canola. *Scientific Reports*. 2018; 8:12396. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30167-5>
33. Silva R.A., Lehner M.S., Paula Júnior T.J. et al. Fungicide sensitivity of isolates of *Sclerotinia sclerotiorum* from different hosts and regions in Brazil and phenotypic instability of thiophanate-methyl resistant isolates. *Tropical plant pathology*. 2024;49:93-103. <https://doi.org/10.1007/s40858-023-00629-x>
34. Smolinska U., Kowalska B. Biological control of the soil-borne fungal pathogen *Sclerotinia sclerotiorum* – a review. *Journal of Plant Pathology*. 2018;100(1):1-12. <https://doi.org/10.1007/s42161-018-0023-0>
35. Verma R., Kaur J. Expression of barley oxalate oxidase confers resistance against *Sclerotinia sclerotiorum* in transgenic *Brassica juncea*. *Transgenic Research*. 2021;30(2):143-154. <https://doi.org/10.1007/s11248-021-00234-1>
36. Vitorino L.C., Silva F.O.D., Cruvinel B.G., Bessa L.A. et al. Biocontrol Potential of *Sclerotinia sclerotiorum* and Physiological Changes in Soybean in Response to *Butia archeri* Palm Rhizobacteria. *Plants*. 2020;9(1):64. <https://doi.org/10.3390/plants9010064>
37. Williams B., Kabbage M., Kim H.J., Britt R. et al. Tipping the balance: *Sclerotinia sclerotiorum* secreted oxalic acid suppresses host defenses by manipulating the host redox environment. *PLoS Pathogens*. 2011;7(6): e1002107. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002107>
38. Wytinck N., Ziegler D.J., Walker P.L., Sullivan D.S. et al. Host-induced gene silencing of the *Sclerotinia sclerotiorum* *AbHydrolase-3* gene reduces disease in transgenic canola (*Brassica napus*). *PLoS ONE*. 2022;17(8): e0261102. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261102>
39. Xu L., Li G., Jiang D., Chen W. *Sclerotinia sclerotiorum*: an evaluation of virulence theories. *Annual Review of Phytopathology*. 2018;56:311-338. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050052>
40. Ziesman B.R., Turkington T.K., Basu U., Strelkov S.E. A Quantitative PCR System for Measuring *Sclerotinia sclerotiorum* in Canola (*Brassica napus*). *Plant Disease*. 2016;100(5):984-990. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-15-0605-RE>

References

1. Blinova S.A., Konyshcheva M.L., Shvartsev A.A., Solov'ev A.A. et al. Optimisation of molecular-genetic methods for diagnosing fungi of Genus *Sclerotinia*. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2022;1(6):31-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-6-31-42>

2. Maslienko L.V., Kurilova D.A., Shipovskaya E.Yu. The screening of antagonist strains of rapeseed white rot agent. *Oil Crops*. 2012;(2):183-191. (In Russ.)
3. Albert D., Dumonceaux T., Carisse O., Beaulieu C. et al. Combining desirable traits for a good biocontrol strategy against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Microorganisms*. 2022;10(6):1189. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061189>
4. Alkooranee J.T., Aledan T.R., Ali A.K., Lu G. et al. Detecting the hormonal pathways in oilseed rape behind induced systemic resistance by *Trichoderma harzianum* TH12 to *Sclerotinia sclerotiorum*. *PLoS One*. 2017;12(1): e0168850. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168850>
5. Andrade C.M., Tinoco M.L.P., Rieth A.F., Maia F.C.O. et al. Host-induced gene silencing in the necrotrophic fungal pathogen *Sclerotinia sclerotiorum*. *Plant Pathology*. 2016;65(4):626-632. <https://doi.org/10.1111/ppa.12447>
6. Bardin S.D., Huang H.C. Research on biology and control of *Sclerotinia* diseases in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2001;23:88-98. <https://doi.org/10.1080/07060660109506914>
7. Bolton M.D., Thomma B.P.H.J., Nelson B.D. *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary: biology and molecular traits of a broad host range pathogen. *Molecular Plant Pathology*. 2006;7(1):1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2005.00316.x>
8. Cheng Y., Lou H., He H., He X. et al. Genomic and biological control of *Sclerotinia sclerotiorum* using an antagonistic strain *Bacillus velezensis* 20507. *Frontiers in Microbiology*. 2024;15:1385067. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1385067>
9. Derbyshire M.C., Denton-Giles M. The control of *Sclerotinia* stem rot on oilseed rape (*Brassica napus*): current practices and future opportunities. *Plant Pathology*. 2016;65(6):859-877. <https://doi.org/10.1111/ppa.12517>
10. Duarte P.A., Menze L., Shoute L., Zeng J. et al. Highly efficient capture and quantification of airborne *S. sclerotiorum* spores using a nanoelectrode-activated microwell array. *ACS Omega*. 2022;7(1):459-468. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04878>
11. Elsheshtawi M., Elkhaky M.T., Sayed S.R. Integrated control of white rot disease on beans caused by *Sclerotinia sclerotiorum* using Contans® and reduced fungicide application. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2017;24(2):405-409. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.038>
12. Fan J., Li J., Ren S. et al. Natural variation in *BnaA07.MKK9* confers resistance to *Sclerotinia* stem rot in oilseed rape. *Nature Communications*. 2024;15:5059. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49504-6>
13. Geng R., Shan Y., Li L., Shi C.-L. et al. CRISPR/Cas9-editing of *BnaIDA* genes prevents silique shattering, floral organ abscission and *Sclerotinia* spread in rapeseed. *Plant Communications*. 2022;3(6):100452. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100452>
14. Gustavo C.B., André B.P., David S.J., Felipe F.S. et al. Incidence and severity of white mold for soybean under different cultural practices and local meteorological conditions. *Plant Disease*. 2015;31(4):1004-1014. <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n4a2015-26125>
15. Hossain M.M., Sultana F., Rubayet M.T. et al. White mold: a global threat to crops and key strategies for its sustainable management. *Microorganisms*. 2024;13(1):4. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010004>
16. Kabbage M., Yarden O., Dickman M.B. Pathogenic attributes of *Sclerotinia sclerotiorum*: switching from a biotrophic to necrotrophic lifestyle. *Plant Pathology*. 2015;64(5):1004-1016. <https://doi.org/10.1111/ppa.12344>
17. Kandel R., Chen C.Y., Grau C.R. et al. Soybean resistance to white mold: evaluation of soybean germplasm under different conditions and validation of QTL. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:505. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00505>

18. Kandel Y.R., Hunt C., Ames K. et al. Meta-analysis of yield response of soybean to foliar fungicides in the United States and Canada. *Plant Disease*. 2021;105(5):1382-1389. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-20-1578-RE>
19. Khan H.A., Mukhtar M., Bhatti M.F. Mycovirus-induced hypovirulence in notorious fungi *Sclerotinia*: a comprehensive review. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2023;54(4):2071-2091. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01073-9>
20. Lehner M.S., de Paula Junior T.J., Del Ponte E.M., Mizubuti E.S.G. et al. Independently founded populations of *Sclerotinia sclerotiorum* from a tropical and a temperate region have similar genetic structure. *PLoS One*. 2017;12(4): e0173915. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173915>
21. Liu S., Fu L., Chen J. et al. Baseline sensitivity of *Sclerotinia sclerotiorum* to metconazole and the analysis of cross-resistance with carbendazim, dimethachlone, boscalid, fluazinam, and fludioxonil. *Phytoparasitica*. 2021;49:123-130. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00867-8>
22. Ma W., Ding J., Jia Q., Li Q. et al. A novel strain of *Bacillus cereus* with a strong antagonistic effect specific to *Sclerotinia* and its genomic and transcriptomic analysis. *Microorganisms*. 2024;12(3):611. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030611>
23. Massawe V.C., Hanif A., Farzand A., Mburu D.K. et al. Volatile compounds of endophytic *Bacillus* spp. have biocontrol activity against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Phytopathology*. 2018;108(12):1373-1385. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-18-0118-R>
24. Maui A., Sauranbaev B.N., Orazbayev K.I. Soybean pathogens in the southeast of Kazakhstan. *Journal of social, humanities and administrative sciences*. 2017;3(5):20-26.
25. McCaghey B., Shao X., Kurzejeski E., Lindstrom T. et al. Host-induced gene silencing of a *Sclerotinia sclerotiorum* oxaloacetate acetylhydrolase using *Bean pod mottle virus* reduces white mold severity on soybean. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:677631. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.677631>
26. Mueller D.S., Chilvers M.I., Malvick D.K., Mueller J.G. et al. Fungicide sensitivity of *Sclerotinia sclerotiorum* isolates from soybean in the United States. *Plant Disease*. 2023;107(4):1231-1238. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-22-1707-RE>
27. Newman T.E., Derbyshire M.C., Solis-Moya E. et al. The broad host range pathogen *Sclerotinia sclerotiorum* produces multiple effector proteins that induce host cell death intracellularly. *Molecular Plant Pathology*. 2023;24(7):866-881. <https://doi.org/10.1111/mpp.13291>
28. O'Sullivan C.A., Belt K., Thatcher L.F. Tackling control of a cosmopolitan phytopathogen: *Sclerotinia*. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:707509. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.707509>
29. Reich J., Lappala R.S., Venette J., Chilvers M.I. et al. Predicting airborne ascospores of *Sclerotinia sclerotiorum* through machine learning and statistical methods. *Plant Pathology*. 2024;73(6):1-16. <https://doi.org/10.1111/ppa.13902>
30. Saharan G.S., Mehta N. *Sclerotinia Diseases of Crop Plants: Biology, Ecology and Disease Management*. Berlin, Germany: Springer, 2008:531.
31. Schmidt C.S., Mrnka L., Lovecká P., Frantík T. et al. Bacterial and fungal endophyte communities in healthy and diseased oilseed rape and their potential for biocontrol of *Sclerotinia* and *Phoma* disease. *Scientific Reports*. 2021;11:3657. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81937-7>
32. Shoute L.C.T., Anwar A., MacKay S. et al. Immuno-impedimetric Biosensor for Onsite Monitoring of Ascospores and Forecasting of *Sclerotinia* Stem Rot of Canola. *Scientific Reports*. 2018;8:12396. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30167-5>
33. Silva R.A., Lehner M.S., Paula Júnior T.J. et al. Fungicide sensitivity of isolates of *Sclerotinia sclerotiorum* from different hosts and regions in Brazil and

phenotypic instability of thiophanate-methyl resistant isolates. *Tropical plant pathology*. 2024;49:93-103. <https://doi.org/10.1007/s40858-023-00629-x>

34. Smolinska U., Kowalska B. Biological control of the soil-borne fungal pathogen *Sclerotinia sclerotiorum* – a review. *Journal of Plant Pathology*. 2018;100(1):1-12. <https://doi.org/10.1007/s42161-018-0023-0>

35. Verma R., Kaur J. Expression of barley oxalate oxidase confers resistance against *Sclerotinia sclerotiorum* in transgenic *Brassica juncea*. *Transgenic Research*. 2021;30(2):143-154. <https://doi.org/10.1007/s11248-021-00234-1>

36. Vitorino L.C., Silva F.O.D., Cruvinel B.G., Bessa L.A. et al. Biocontrol Potential of *Sclerotinia sclerotiorum* and Physiological Changes in Soybean in Response to *Butia archeri* Palm Rhizobacteria. *Plants*. 2020;9(1):64. <https://doi.org/10.3390/plants9010064>

37. Williams B., Kabbage M., Kim H.J., Britt R. et al. Tipping the balance: *Sclerotinia sclerotiorum* secreted oxalic acid suppresses host defenses by manipulating the host redox environment. *PLoS Pathogens*. 2011;7(6): e1002107. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002107>

38. Wytinck N., Ziegler D.J., Walker P.L., Sullivan D.S. et al. Host-induced gene silencing of the *Sclerotinia sclerotiorum* *AbHydrolase-3* gene reduces disease in transgenic canola (*Brassica napus*). *PLoS ONE*. 2022;17(8): e0261102. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261102>

39. Xu L., Li G., Jiang D., Chen W. *Sclerotinia sclerotiorum*: an evaluation of virulence theories. *Annual Review of Phytopathology*. 2018;56:311-338. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050052>

40. Ziesman B.R., Turkington T.K., Basu U., Strelkov S.E. A Quantitative PCR System for Measuring *Sclerotinia sclerotiorum* in Canola (*Brassica napus*). *Plant Disease*. 2016;100(5):984-990. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-15-0605-RE>

Сведения об авторах

Рашит Ислямович Тараканов, канд. биол. наук, доцент кафедры защиты растений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: r.tarakanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3235-8467>

Виктория Васильевна Медведева, студент кафедры защиты растений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: vikamedm@mail.ru

Петр Владимирович Евсеев, канд. биол. наук, заведующий лабораторией молекулярной микробиологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова»; 117342, г. Москва, ул. Островитянова 1; e-mail: petevseev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1646-9802>

Ольга Алексеевна Савоськина, д-р с.-х. наук, профессор кафедры земледелия и методики опытного дела, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: osavoskina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1568-4922>

Светлана Ивановна Чебаненко, канд. с.-х. наук, доцент кафедры защиты растений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: svchebanenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6128-1948>

Февзи Сеид-Умерович Джалилов, д-р биол. наук, профессор кафедры защиты растений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: dzhalilov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5014-8375>

Information about the authors

Rashit I. Tarakanov, CSc (Bio), Associate Professor at the Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: r.tarakanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3235-8467>

Victoria V. Medvedeva, student of the Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: vikamedm@mail.ru

Peter V. Evseev, CSc (Bio), Head of the Laboratory of Molecular Microbiology, Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov; 1 Ostrovityanova St., Moscow, 117513, Russian Federation; e-mail: petevseev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1646-9802>

Olga A. Savoskina, DSc (Ag), Professor at the Department of Agriculture and Experimental Methods, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: osavoskina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1568-4922>

Svetlana I. Chebanenko, CSc (Ag), Associate Professor at the Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: svchebanenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6128-1948>

Fevzi S.-U. Dzhalilov, DSc (Bio), Professor at the Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: dzhalilov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5014-8375>

ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

**Оценка компонентного состава молока коров симментальской породы
в связи с питательной ценностью кормов**

**Оксана Александровна Воронина, Лариса Павловна Игнатьева,
Сергей Юрьевич Зайцев**✉

Федеральный исследовательский центр животноводства имени Л.К. Эрнста,
Дубровицы, Подольск, Россия

✉ **Автор, ответственный за переписку:** s.y.zaitsev@mail.ru

Аннотация

Нормированное питание молочного скота – одна из актуальных задач, с решением которой сталкивается каждое хозяйство. Комплексный подход к решению такой задачи включает в себя теоретическое обоснование и практический анализ фактического состава как кормов, так и получаемого молока. Именно контрольные анализы молока позволяют зафиксировать «отклик» и оценить реальный уровень усвоения и трансформации питательных веществ рациона. Наши исследования выполнены однократно, на коровах симментальской породы ($n = 15$), в условиях учебного хозяйства на территории Воронежской области. В структуру рациона кормления входили сено разнотравное 3,0 кг, солома 0,5 кг, зеленая масса (разнотравье) 32,0 кг, концентраты 4,6 кг. Отбор проб кормов выполнен параллельно с отбором проб молока. Для анализа компонентного состава молока использовали аналитическую систему «CombiFoss-7»; анализ микроэлементов проводили на «атомно-адсорбционном спектрометре ZEE nit 650 P» (Analytik Jena AG); анализ состава кормов выполнен согласно соответствующим ГОСТам. Результаты показали, что уровень обеспечения обменной энергией, протеинами, микроэлементами удовлетворительный и соответствует физиологии животных (уровню продуктивности, живой массе и т.д.). Для железа установлено избыточное поступление с кормами. По результатам оценки компонентного состава молока – массовой доли белка и уровня мочевины, заложенных в рационе, использование уровня энергии и протеина является неоптимальным. Так, для 40% коров исследованной группы массовая доля белка (МДБ) – меньше 3,20%, для 47% находится в интервале от 3,21 до 3,60%, для 13% – МДБ выше 3,61%. Для 69% коров уровень мочевины в молоке – менее $10 \text{ мг} \cdot 100 \text{ мл}^{-1}$ (выше только у отдельных коров, но нет проб молока с уровнем мочевины выше $15 \text{ мг} \cdot 100 \text{ мл}^{-1}$). Средние значения массовой доли жира (МДЖ), полученные нами в исследованиях, на 23,1% ниже характерных для симментальской породы. Положительным является то, что для 20% исследованных животных МДЖ – больше 3,61%. Комплексная оценка состава кормов и биохимических параметров молока позволила обнаружить определенный дисбаланс. Рекомендуем обращать должное внимание на баланс рациона потребности коров в энергии, протеинах и микроэлементах. Этот баланс может быть нарушен ввиду этологии пищевого поведения, особенностей физиологии и биохимии пищеварения молочных коров, поэтому он требует постоянного мониторинга.

Ключевые слова

Компонентный состав молока, микроэлементы, баланс рациона

Благодарности

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания (регистрационный номер ЕГИСУ темы

НИР ГЗ 2024–2026: № 124020200032–4). Авторы выражают благодарность руководству ГБПОУ ВО «Острогожский многопрофильный техникум» (директору О.В. Рединой и заведующему учебным хозяйством О.В. Бочкаревой) за помощь в организации и проведении исследований.

Для цитирования

Воронина О.А., Игнатъева Л.П., Зайцев С.Ю. Оценка компонентного состава молока коров симментальской породы в связи с питательной ценностью кормов // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 149–159.

LIVESTOCK BREEDING, BIOLOGY AND VETERINARY MEDICINE

Evaluation of Simmental cow milk component composition in relation to feed nutritional value

Oksana A. Voronina, Larisa P. Ignatieva, Sergey Yu. Zaitsev✉

Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Dubrovitsy, Podolsk, Russia

✉Corresponding author: s.y.zaitsev@mail.ru

Abstract

Rationing of dairy cattle is one of the critical challenges faced by every farm. A comprehensive approach to addressing this challenge involves both theoretical substantiation and practical analysis of the actual composition of both feedstuffs and the resulting milk. Crucially, regular milk analyses enable the “response” to be recorded, allowing for an assessment of the actual level of nutrient assimilation and transformation from the diet. Our investigation was conducted as a single-point study on Simmental cows (n=15) at a training farm located in the Voronezh Region. The feeding ration comprised 3.0 kg of mixed hay, 0.5 kg of straw, 32.0 kg of green mass (mixed grasses), and 4.6 kg of concentrates. Feed sampling was performed in parallel with milk sampling. Milk component composition analysis was performed using the “CombiFoss-7” analytical system; trace element analysis was conducted using an “atomic absorption spectrometer ZEE nit 650 P” (Analytik Jena AG); and feed composition analysis adhered to the relevant GOST standards. The results indicated satisfactory levels of metabolic energy, protein, and trace element supply, which aligned with the physiological requirements of the animals (considering productivity level, live weight, etc.). However, an excessive intake of iron via feedstuffs was identified. Based on the assessment of milk component composition, specifically the milk protein content and urea levels, it appears that the energy and protein provided by the feedstuffs in the diet are not optimally utilized. For instance, in 40% of the investigated cows, milk protein content (MPC) was below 3.20%; for 47%, it ranged from 3.21% to 3.60%; and for 13%, MPC exceeded 3.61%. Furthermore, 69% of the cows exhibited milk urea levels below 10 mg*100ml⁻¹ (with levels only slightly higher in individual cows, but no samples exceeding 15 mg*100ml⁻¹). The average milk fat content (MFC) observed in our study was 23.1% lower than the typical values for the Simmental breed. Positively, 20% of the animals investigated showed MFC above 3.61%. This comprehensive evaluation of feed composition and milk biochemical parameters revealed a discernible imbalance. We recommend close attention be paid to balancing the dietary requirements of cows for energy, protein, and micronutrients. This balance can be disrupted by factors such as feeding behavior ethology, as well as specific physiological and biochemical aspects of digestion in dairy cows, thus necessitating continuous monitoring.

Keywords

Milk component composition, micronutrients, the balance of the diet

Acknowledgments

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment (EGISU research topic registration number for 2024–2026: No. 124020200032–4). The authors gratefully acknowledge the administration of Ostrogozhsky Multidisciplinary Technical College, specifically Director O.V. Redina and Head of the Training Farm O.V. Bochkareva, for their invaluable assistance in organizing and conducting the research.

For citation

Voronina O.A., Ignatieva L.P., Zaitsev S.Yu. Evaluation of Simmental cow milk component composition in relation to feed nutritional value. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 150–159.

Введение Introduction

Расчет потребности молочного скота в энергии и питательных веществах – главное условие при формировании структуры и определении нормированного питания для создания оптимальных зоотехнических условий эксплуатации высокопродуктивных молочных коров [1–3]. В оценке эффективности баланса рациона одну из ведущих позиций занимает комплексный анализ не только кормов, но и молока [4–6]. Именно поэтому для лаборатории селекционно-генетического качества [7] по всей России необходимо звено аудита трех составляющих: состояния здоровья коров, оценки качества кормовых рационов, оценки племенной ценности коров [8]. Кроме того, это важная часть реализации ст. 30 Федерального закона от 3 августа 1995 г. № 123-ФЗ «О племенном животноводстве» (в ред. Федерального закона от 4 августа 2023 г. № 454-ФЗ), ГОСТ Р 52054–2023 [9], ГОСТ 23453–2014 [10] и других методических документов [11, 12].

Одна из задач лаборатории селекционного контроля качества молока заключается в разработке и внедрении информативной системы контроля обмена веществ у дойных коров [13, 14]. Простая и стройная система оценки метаболизма предложена в работе [13], где авторы по результатам анализа молока предлагают оценивать, насколько успешно рацион дойных коров обеспечивает их потребности по протеину и энергии. В качестве метода анализа молока для подобных лабораторий широко распространена инфракрасная спектрометрия в ближнем и среднем ИК-диапазонах, дополненная встроенными программами математической обработки данных [5, 6, 15].

В работе [13] на основе четырех показателей молока (мочевина, ацетон, масляная кислота, число соматических клеток) авторы предлагают выделить 5 состояний, характеризующих самочувствие дойной коровы: оптимальное, допустимое, удовлетворительное, субклиническое и клиническое. Помимо этого, мочевина – важный критерий обеспеченности азотом микроорганизмов рубца [2–4]. При уровне мочевины в молоке от 15 до 35 мг/100 мл баланс оценивается как нормальный. Значения меньше нижней границы свидетельствуют о дефиците азота, больше верхней – об избытке.

Поскольку мочевина – конечный продукт метаболизма белков, по данному параметру можно судить о белковой питательности рациона [2–4]. По данным работы [16], на коровах голштино-фризской породы авторы поставили цель исследовать взаимосвязь показателей соотношения жира к белку в молоке в качестве индикатора энергетического баланса. Наблюдения показали, что при коэффициенте соотношения жира к белку в молоке $\geq 1,5$ обнаружен выраженный отрицательный энергетический баланс по стаду, тем не менее они не рекомендуют экстраполировать их результаты на другие молочные хозяйства без должного эксперимента. Показано, что для оценки рисков возникновения ацидозов и кетозов в стаде полезны учет и мониторинг массовой доли жира и массовой доли белка. Так, низкая жирномолочность 2,73–3,19%

характерна для ацидоза; кетоз может сопровождаться повышением массовой доли жира до 4,25–5,63%, снижением массовой доли белка и лактозы [17]. При должном подходе мониторинг соматических клеток в молоке может стать основой для определения генетической и геномной изменчивости. Авторами установлены коэффициенты наследуемости, которые выявили низкую генетическую изменчивость для количества соматических клеток (0,119) и умеренную при их дифференциации (0,211) [7].

Безусловно, для оценки обеспеченности молочного скота кормами рациона важны организация и проведение балансовых опытов [18] – только так можно рассчитать баланс азота в организме. Это более трудоемкий опыт, требующий отдельного эксперимента, который позволяет лучше оценить эффективность трансформации энергии и питательных веществ рациона молочными коровами для синтеза молочного белка [19, 20]. Более подробно ограничения для балансовых экспериментов описаны в статье [19].

Для нормирования микроэлементов чаще всего используют 8 показателей: Co, Cu, I, Fe, Mn, Mo, Se и Zn; позже к ним добавили Ni и Cr без указания конкретных норм [21, 22]. Однако их нормирование в практике кормления носит скорее рекомендательный характер и редко подвергается анализу. В рамках исследований нами выполнен разведочный анализ для оценки эффективности используемого в конкретном хозяйстве рациона по данным анализа используемых кормов и получаемого молока.

Цель исследований: оценка компонентного и микроэлементного состава кормов и молока коров симментальской породы для оценки удовлетворения потребностей в питании молочных коров.

Методика исследований

Research method

В качестве объекта исследований использовали пробы корма и молока от коров симментальской породы из хозяйства, расположенного в Острогжском районе Воронежской области.

Исследования выполнены однократно на текущем стандартно-получаемом рационе. Пробы получены в летние периоды (июль-август) 2024 и 2025 гг., во время утренней контрольной дойки, от коров симментальской породы ($n = 25$) согласно ГОСТ 26809.1–2014. Все животные были осмотрены ветеринарным врачом; по его заключению, они клинически здоровы. Средний возраст составил 5 лет, средняя живая масса – 623 кг, среднее число отелов – 3, стадия лактации – заключительная (8 месяцев). В структуру рациона кормления входили сено разнотравное 3,0 кг, солома 0,5 кг, зеленая масса (разнотравье) 32,0 кг, концентраты 4,6 кг. Образцы кормов отбирали согласно ГОСТ ISO 6497–2014.

Исследования кормов и молока выполнены в 2024 г. в лабораториях Федерального исследовательского центра животноводства имени Л.К. Эрнста (ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста). Для анализа основных компонентов молока использовали аналитическую систему «CombiFoss-7» (Дания) [5]. Анализ кормов выполнен в соответствии с актуальным ГОСТ 13496.4–2019 и расчетным методом. Анализ уровня меди, цинка, железа в кормах и молоке выполнен на атомно-адсорбционном спектрометре (с электротермической атомизацией) ZEE nit 650 P (Analytik Jena AG, Германия) с дейтериевой и зеемановской коррекцией фона. Для подготовки образцов к анализу проводили минерализацию в системе микроволновой подготовки проб «MILESTONE ETHOS UP»/«ETHOS EASY». К 0,5 мл молока/0,5 мг навески предварительно высушенного корма добавляли 1,0 мл 30%-ной перекиси водорода и 5,0 мл концентрированной азотной кислоты (ОСЧ для элементного анализа). Режим системы микроволновой подготовки: 20 мин – нагревание до +190°C; 15 мин – удержание при температуре до +190°C; 30 мин – охлаждение до +35°C.

Статистическую обработку полученных результатов производили в программе Microsoft Office Excel 2021 (надстройка «Анализ данных»). Из данных описательной статистики приводим: М – среднее значение, m – стандартное отклонение; дополнительно: CV – коэффициент вариации, Q1 – первый квартиль, Q3 – третий квартиль, IQR – межквартильный размах.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Показатели питательной ценности и микроэлементного состава кормов. Результаты исследований отдельных показателей питательной ценности и элементного анализа кормов рациона представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели питательной ценности и микроэлементного состава исследуемых кормов

Table 1

Nutritional value and microelement composition of studied feeds

Показатели питательной ценности	Образцы кормов, содержание в натуральном корме			
	сено	солома	зеленая масса	комбикорм
Протеин, г/кг	68,71	42,38	62,22	92,86
Жир, г/кг	17,23	14,90	17,72	15,59
Клетчатка, г/кг	239,54	214,85	97,66	0,75
БЭВ*, г/кг, в т.ч.	507,02	519,28	310,09	721,53
Зола, г/кг	52,35	69,12	68,94	26,79
Кальций, г/кг	7,94	3,45	10,52	1,78
Фосфор, г/кг	2,61	1,92	2,64	2,78
Магний, г/кг	1,39	0,68	1,20	1,12
ПП*, г/кг	58,4	36,02	52,89	78,93
Валовая энергия, МДж/кг	15,11	14,17	9,15	15,06
Обменная энергия, МДж/кг	7,51	7	5,21	11,05
ЭКЕ*	0,75	0,70	0,52	1,11
Медь, мг/кг	1,51	1,17	3,47	6,99
Железо, мг/кг	118,88	101,96	164,04	77,71
Цинк, мг/кг	7,74	17,97	25,88	26,97

*БЭВ – безазотистые экстрактивные вещества; ПП – переваримый протеин, ЭКЕ – энергетическая кормовая единица.

Исходя из данных по структуре рациона и данных анализа кормов фактическое потребление протеина, переваримого протеина, валовой и обменной энергии соответствует рекомендуемым нормам и даже несколько превосходит их. Потребление микроэлементов составило: меди – 148 мг/гол. в сутки; железа – 6014 мг/гол. в сутки; цинка – 984 мг/гол. в сутки. При сопоставлении полученных данных с нормами [7] выяснилось, что уровень потребления указанных элементов соответствует периоду лактации и удовлетворяет потребности молочных коров относительно меди и цинка. Уровень железа – выше предложенной в рекомендации нормы на 3048 мг.

Показатели компонентного и микроэлементного состава молока. Важным элементом оценки физиолого-биохимического статуса коров является оценка показателей компонентного и микроэлементного состава молока (табл. 2).

Таблица 2

Показатели компонентного и микроэлементного состава молока

Table 2

Component and microelement composition of milk

Показатели	M	±m	C _v	Q1	Q3	IQR
МДЖ, %	3,00	0,24	31	2,39	3,48	1,09
МДБи, %	3,06	0,08	9,9	2,845	3,24	0,40
МДБо, %	3,23	0,07	8,6	3,02	3,38	0,36
Казеин, %	2,51	0,08	11,7	2,31	2,73	0,42
Мочевина, мг/100 мл	9,24	0,85	35,7	7,25	11,8	4,55
МДЛ, %	4,46	0,17	15	4,15	4,915	0,77
СОМО, %	8,45	0,23	10,5	7,925	8,93	1,01
СВ, %	11,23	0,34	11,8	10,495	12,115	1,62
ТЗ	–0,512	0,02	1,64	–0,504	–0,517	0,01
pH	6,47	0,47	2,3	6,43	6,58	0,15
Zn, мкг/л	903,1	49,8	21,3	767,6	1067,7	300,1
Cu, мкг/л	72,5	6,6	29,0	60,504	78,96	18,46
Fe, мкг/л	5908,2	628,0	41,2	4370,4	5894	1523,6

Примечание. МДЖ – массовая доля жира; МДБи – массовая доля белка истинного; МДБо – массовая доля белка общего; МДЛ – массовая доля лактозы; СОМО – сухой обезжиренный молочный остаток; СВ – сухое вещество; ТЗ – точка замерзания, pH – кислотность, CV – коэффициент вариации, Q1 – первый квартиль, Q3 – третий квартиль; IQR – межквартильный размах.

Интересно, что по оценке биологических маркеров белкового обмена – проценту белка и мочевины в молоке – можно заключить, что уровень обеспечения молочных коров энергией и протеином является недостаточным. Так, для 40% (n = 6) исследованной группы МДБ меньше 3,20%, для 47% (n = 7) находится в интервале от 3,21 до 3,60%, для 13% (n = 2) МДБ выше 3,61%. Нет проб молока с уровнем мочевины выше 15 мг/100 мл. Для 69% (n = 9) уровень мочевины в молоке менее 10 мг/100 мл. Средние значения МДЖ, полученные нами в исследованиях, на 23,1% (0,9%) ниже характерных для симментальской породы [23], только для 20% (n = 3) исследованных животных МДЖ больше 3,61%.

При анализе полученных данных по методике, предложенной в работе [13], у 10 из 15 гол. отмечен недостаток энергии и протеина в рационе (содержание белка ниже 3,2%, мочевины – ниже 15 мг/100 мл); у 5 гол. из 15 – недостаток протеина (содержание белка – от 3,2 до 3,6%, мочевина – ниже 30 мг/100 мл). При этом данные анализа кормов свидетельствуют о том, что рацион и качество его состава удовлетворяют потребности коров симментальской породы в заключительной стадии лактации согласно рекомендациям по кормлению [22, 24]. Есть превышение относительно рекомендуемых норм по железу, что является типичным для региона и может сказываться на усвоении цинка и меди ввиду их антагонизма [22].

Таким образом, физиологический и технологический факторы требуют большего внимания при подборе кормов и их элементного состава. Возможное решение – это создание 2–3 адресных рецептов комбикормов, различных по компонентному составу и идентичных по питательности, с акцентом на контроль их усвоения [14].

Предлагаем рассмотреть возможность модернизации и установки автоматизированной системы учета потребления корма. Это обеспечит более детальный контроль над важными зоотехническими показателями и поедаемостью рациона и лучшее представление о пищевом поведении животных [14, 24, 25].

Выводы Conclusions

Полученные данные легли в основу предварительной оценки молочного хозяйства:

1. По анализу кормов установлено, что уровень обеспечения коров протеином, энергией и отдельными микроэлементами является достаточным, а по отдельным позициям (Fe) – избыточным.

2. По анализу молока и оценка баланса энергии по МДБ и уровню мочевины установлен небольшой дисбаланс, для уточнения которого требуется дополнительный анализ поедаемости кормов и более детальное изучение обменных процессов на уровне биохимии и общего клинического анализа крови коров. На основании имеющихся данных рекомендуем обращать должное внимание на баланс рациона потребности коров в энергии, протеинах и микроэлементах, для чего требуется постоянный мониторинг ситуации.

Список источников

1. Харитонов Е.Л. *Экспериментально-прикладная физиология пищеварения жвачных животных*: Монография. Дубровицы: Всероссийский научно-исследовательский институт животноводства имени академика Л.К. Эрнста, 2019. 448 с. EDN: BUCWYB

2. Харитонов Е.Л. *Физиология и биохимия питания молочного скота*: Монография. Боровск: Оптима Пресс, 2011. 372 с. EDN: QLCIMP
3. Зайцев С.Ю., Воронина О.А., Колесник Н.С., Сивкина О.Н. и др. *Биохимические и физико-химические методы исследования молока коров*: Монография. Дубровицы: ФИЦ ВИЖ имени Л.К. Эрнста, 2024. 396 с. EDN: XBWTQT
4. Зайцев С.Ю. *Антиоксидантная активность молока*: Методическое пособие. Дубровицы: ФИЦ ВИЖ имени Л.К. Эрнста, 2022. 56 с. EDN: ENYFKW
5. Сермягин А.А., Карликова Г.Г., Лашнева И.А., Корнелаева М.В. *Рекомендации по контролю физиологического состояния и здоровья коров с использованием биомаркеров состава молока*: Методические рекомендации. Дубровицы: ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, 2022. 52 с.
6. Kharitonov E. The Processes of Nutrition and Metabolism Affecting the Biosynthesis of Milk Components and Vitality of Cows with High- and Low-Fat Milk. *Animals*. 2022;12(5):604. <https://doi.org/10.3390/ani12050604>
7. Lashneva I.A., Sermyagin A.A., Ignatieva L.P., Gladyr E.A. et al. Milk somatic cells monitoring in Russian Holstein cattle population as a base for determining genetic and genomic variability. *Journal of Animal Science*. 2021;99(S3):252. <https://doi.org/10.1093/jas/skab235.460>
8. Быстрова Н.Ю., Курочкина И.П., Маматова Л.А., Шувалова Е.Б. К вопросу оценки эффективности разведения племенных ресурсов // *Экономическая статистика*. 2023. Т. 20, № 3. С. 26–34. <http://doi.org/10.21686/2500-3925-2023-3-26-34>
9. *ГОСТ Р 52054-2023. Молоко коровье сырое. Технические условия*. Москва: Российский институт стандартизации, 2023. 10 с.
10. *ГОСТ 23453-2014. Молоко сырое. Методы определения соматических клеток*. Москва: Стандартинформ, 2015. 13 с.
11. Сермягин А.А., Лашнева И.А., Косицин А.А., Игнатьева Л.П. и др. Морфологический состав соматических клеток в молоке коров как критерий оценки здоровья молочной железы в связи с продуктивностью и компонентами молока // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56, № 6. С. 1183–1198. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.6.1183rus>
12. Schwarz D. Differential somatic cell count – a new biomarker for mastitis screening. *Proc. of the 40th ICAR Biennial Session held in Puerto Varas, Chile. October 24-28, 2016*. Rome, Italy: ICAR, 2017:105-113.
13. Букаров Н.Г., Кисель Е.Е., Белякова А.Н. Оценка состояния обмена веществ дойных коров по составу молока // *Молочное и мясное скотоводство*. 2015. № 4. С. 16–18. EDN: TZKDRF
14. Абубакаров А.А. Организация контроля за рационом кормления для повышения удойности коров // *Актуальные исследования*. 2023. № 11. С. 83–91. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14635590>
15. Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N. et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*. 2021;8(12):551. <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>
16. Cabezas-Garcia E.H., Gordon A.W., Mulligan F.J., Ferris C.P. Revisiting the relationships between fat-to-protein ratio in milk and energy balance in dairy cows of different parities, and at different stages of lactation. *Animals*. 2021;11(11):3256. <https://doi.org/10.3390/ani11113256>
17. Часовщикова М.А., Губанов М.В. Соотношение между массовой долей жира и белка в молоке коров как показатель здоровья стада // *Вестник КрасГАУ*. 2022. № 9 (186). С. 104–110. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-9-104-110>

18. Колесник Н.С., Боголюбова Н.В., Зеленченкова А.А., Лахонин П.Д. Процессы пищеварения и газообразования у овец под влиянием комплекса фитогеников // *Аграрная наука*. 2025. Т. 1, № 4. С. 113–120. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-113-120>
19. Spanghero M., Kowalski Z.M. Updating analysis of nitrogen balance experiments in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):7725-7737. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19656>
20. Иванищева А.П., Сизова Е.А., Камирова А.М., Мусабаева Л.Л. и др. Макро- и микроэлементы в питании животных: многообразие веществ и форм // *Животноводство и кормопроизводство*. 2023. Т. 106, № 2. С. 85–111. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-85>
21. Воронина О.А., Боголюбова Н.В., Зайцев С.Ю. Минеральные элементы в составе молока коров – мини-обзор // *Сельскохозяйственная биология*. 2022. Т. 57, № 4. С. 681–693. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.4.681rus>
22. Некрасов Р.В., Головин А.В., Махаев Е.А., Аникин А.С. и др. *Нормы потребностей молочного скота и свиней в питательных веществах*: Монография. Москва: Российская академия наук, 2018. 290 с. EDN: XVLDML
23. Игнатъева Л.П., Шеметюк С.А., Плотникова Л.И., Гридяева Н.И. и др. Эффективность использования симментальского скота немецко-австрийской селекции в племенных стадах Воронежской области // *Молочное и мясное скотоводство*. 2018. № 5. С. 8–13. EDN: UZKYAU
24. Некрасов Р., Аникин А. Расчет адресных рецептов комбикормов для коров // *Комбикорма*. 2021. № 1. С. 40–43. <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2021-01-3-133>
25. Лемешевский В.О., Цзэни С. Использование обменной энергии и особенности субстратной обеспеченности энергетических и продуктивных функций у крупного рогатого скота // *Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии*. 2024. Т. 13, № 1. С. 72–79. <https://doi.org/10.48612/sbornik-2024-1-17>

References

1. Kharitonov E.L. *Experimental and applied physiology of digestion in ruminants*: a monograph. Dubrovitsy, Russia: Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 2019:448. (In Russ.)
2. Kharitonov E.L. *Physiology and biochemistry of dairy cattle nutrition*: a monograph. Borovsk, Russia: Optima Press, 2011:372. (In Russ.)
3. Zaitsev S.Yu., Voronina O.A., Kolesnik N.S., Sivkina O.N. et al. *Biochemical and physicochemical methods for studying cow's milk*: a monograph. Dubrovitsy, Russia: Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 2024:396. (In Russ.)
4. Zaitsev S.Yu. *Antioxidant activity of milk*: a methodological manual. Dubrovitsy, Russia: Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 2022:56. (In Russ.)
5. Sermyagin A.A., Karlikova G.G., Lashneva I.A., Kornelaeva M.V. *Recommendations for monitoring the physiological state and health of cows using biomarkers of milk composition*: a methodological manual. Dubrovitsy, Russia: Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, 2022:52. (In Russ.)
6. Kharitonov E. The Processes of Nutrition and Metabolism Affecting the Biosynthesis of Milk Components and Vitality of Cows with High- and Low-Fat Milk. *Animals*. 2022;12(5):604. <https://doi.org/10.3390/ani12050604>

7. Lashneva I.A., Sermyagin A.A., Ignatieva L.P., Gladyr E.A. et al. Milk somatic cells monitoring in Russian Holstein cattle population as a base for determining genetic and genomic variability. *Journal of Animal Science*. 2021;99(S3):252 <https://doi.org/10.1093/jas/skab235.460>
8. Bystrova N.Y., Kurochkina I.P., Mamatova L.A., Shuvalova E.B. On the issue of evaluating the effectiveness of breeding tribal resources. *Statistics and Economics*. 2023;20(3):26-34. <http://doi.org/10.21686/2500-3925-2023-3-26-34>
9. GOST R52054-2023. *Cow raw milk. Specifications*. Moscow, Russia: Russian Standardization Institute, 2023:10. (In Russ.)
10. GOST 23453-2014. *Milk. Methods for determination of somatic cells*. Moscow, Russia: Standartinform, 2015:13. (In Russ.)
11. Sermyagin A.A., Lashneva I.A., Kositsin A.A., Ignatieva L.P. et al. Differential somatic cell count in milk as criteria for assessing cows' udder health in relation with milk production and components. *Agricultural Biology*. 2021;56(6):1183-1198. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.6.1183rus>
12. Schwarz D. Differential somatic cell count – a new biomarker for mastitis screening. *Proc. of the 40th ICAR Biennial Session held in Puerto Varas, Chile. October 24-28, 2016*. Rome, Italy: ICAR, 2017:105-113.
13. Bukarov N.G., Kisel' E.E., Belyakova A.N. Assessment of metabolism in dairy cows by milk composition. *Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding*. 2015;(4):16-18. (In Russ.)
14. Abubakarov A.A. Organization of control over the feeding ration to increase the milk yield of cows. *Aktualnye issledovaniya*. 2023;(11):79. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14635590>
15. Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N. et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*. 2021;8(12):551. <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>
16. Cabezas-Garcia E.H., Gordon A.W., Mulligan F.J., Ferris C.P. Revisiting the relationships between fat-to-protein ratio in milk and energy balance in dairy cows of different parities, and at different stages of lactation. *Animals*. 2021;11(11):3256. <https://doi.org/10.3390/ani11113256>
17. Chasovshchikova M.A., Gubanov M.V. The ratio between dairy fat and milk protein in cows as an indicator of herd health. *Bulletin of KSAU*. 2022;(9(186)):104-110. (In Russ.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-9-104-110>
18. Kolesnik N.S., Bogolyubova N.V., Zelenchenkova A.A., Lakhonin P.D. Digestion and gas formation processes in sheep under the influence of a complex of phytogenics. *Agrarian Science*. 2025;1(4):113-120. (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-113-120>
19. Spanghero M., Kowalski Z.M. Updating analysis of nitrogen balance experiments in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):7725-7737. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19656>
20. Ivanishcheva A.P., Sizova E.A., Kamirova A.M., Musabayeva L.L. et al. Macro-and microelements in animal nutrition: a variety of substances and forms. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(2):85-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-2-85>
21. Voronina O.A., Bogolyubova N.V., Zaitsev S.Yu. Mineral composition of cow milk – a mini review. *Agricultural Biology*. 2022;57(4):681-693. (In Russ.)
22. Nekrasov R.V., Golovin A.V., Makhaev E.A., Anikin A.S. et al. *Standards of nutritional requirements of dairy cattle and pigs: a monograph*. Moscow, Russia: Russian Academy of Sciences, 2018:290. (In Russ.)

23. Ignatieva L.P., Shemetyuk S.A., Plotnikova L.I., Gridyaeva N.I. et al. Efficiency of using the Simmental cattle of German-Austrian origin at breeding herds in Voronezh Region. *Journal of Dairy and beef cattle breeding*. 2018;(5):8-13. (In Russ.)

24. Nekrasov R., Anikin A. Calculation of targeted recipes for mixed feed for cows. *Kombikorma*. 2021;(1):40-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2021-01-3-133>

25. Lemeshevsky V.O., Zengyi S. Use of metabolism energy and features of substrate provision of energy and productive functions in cattle. *Sbornik nauchnykh trudov Krasnodarskogo nauchnogo tsentra po zootekhnii i veterinarii*. 2024;13(1):72-79. (In Russ.) <https://doi.org/10.48612/sbornik-2024-1-17>

Сведения об авторах

Оксана Александровна Воронина, канд. биол. наук, ветеринарный врач, старший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр животноводства имени Л.К. Эрнста»; 142132, Российская Федерация, Московская область, г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60; e-mail: voroninaok-senia@inbox.ru

Сергей Юрьевич Зайцев, д-р биол. наук, д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр животноводства имени Л.К. Эрнста»; 142132, Российская Федерация, Московская область, г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60; e-mail: s.y.zaitsev@mail.ru

Лариса Павловна Игнатьева, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела популяционной генетики и генетических основ разведения животных, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр животноводства имени Л.К. Эрнста»; 142132, Российская Федерация, Московская область, г.о. Подольск, пос. Дубровицы, 60; e-mail: ignatieva-lp@mail.ru

Information about the authors

Oksana A. Voronina, CSc (Bio), Veterinarian, Senior Research Associate at the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst; 60 Dubrovitsy, Podolsk, Moscow region 142132, Russian Federation; e-mail: voroninaok-senia@inbox.ru

Sergey Yu. Zaitsev, DSc (Bio), DSc (Chem), Professor, Leading Research Associate at the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst; 60 Dubrovitsy, Podolsk, Moscow Region, 142132, Russian Federation; e-mail: s.y.zaitsev@mail.ru

Larisa P. Ignatyeva, CSc (Ag), Leading Research Associate at the Department of Population Genetics and Genetic Foundations of Animal Breeding, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst; 60 Dubrovitsy, Podolsk, Moscow Region, 142132, Russian Federation; e-mail: ignatieva-lp@mail.ru

ЗООТЕХНИКА, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

**Трансплантация *in vivo* эмбрионов в коневодстве:
исторические данные и современное состояние**

**Георгий Петрович Дюльгер¹, Дмитрий Иванович Лазарев²,
Сергей Владимирович Акчурин^{1✉}, Ирина Владимировна Акчурина¹,
Владислав Сергеевич Бычков¹, Дмитрий Валерьевич Свистунов¹**

¹Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

²Центр репродукции лошадей ООО «Хартли Хорс Хаус», Московская область, Россия

✉ Автор, ответственный за переписку: sakchurin@rgau-msha.ru

Аннотация

Статья посвящена обзору биотехнологии производства и трансплантации эмбрионов *in vivo* в коневодстве. Согласно регистру IETS только за последние 5 лет в мировом коневодстве проведено 152815 эмбриотрансферов, подавляющее большинство которых (125017, или 81,81%) выполнено с применением *in vivo* эмбрионов. Для подсадки применяют главным образом свежеполученные зародыши. Доля криотрансфера по сравнению с переносом свежеполученных эмбрионов ничтожно мала (0,48% против 99,52%). Зародыши от кобыл-доноров обычно получают без индукции суперовуляции, непосредственно из полости матки. Оптимальное время для вымывания эмбриона – 7–8-е сутки после овуляции. Катетеризацию шейки матки проводят через влагалище при помощи гибкого двухканального силиконового катетера с надувным баллончиком под контролем пальцев руки в одноразовой гинекологической перчатке. Эффективность вымывания эмбрионов достигает в среднем 50–65%. Рекомендуется синхронизировать половой цикл донора с половым циклом 2–3 реципиентов, чтобы по крайней мере у одной из них овуляция наступила через 1–2 дня после овуляции кобылы-донора. Синхронизацию течки и овуляции можно вызвать с помощью препаратов различных фармакологических групп, обладающих прогестагенной (прогестерон, алтреногест) и/или лютеолитической (нативный простагландин F_{2a} или его высокоактивный синтетический аналог – клопростенол) активностью, в сочетании с препаратами, запускающими овуляцию (деслорелин или ХГЧ). Пересадку зародышей в матку производят трансцервикально мануотеральным и визоутеральным способами. При первом (классическом) способе подсадки эмбриона в матку катетеризация цервикального канала проводится под мануальным контролем, при втором – с использованием двухстворчатого влагалищного зеркала с фиксацией нижней губы влагалищной части шейки матки гинекологическими щипцами Уилшера. Эффективность мануотерального (классического) способа при эмбриотрансфере свежеполученными эмбрионами достигает 65,5–77,8%, по методу Уилшера – 90,9–93,4%.

Ключевые слова

Коневодство, лошади, вспомогательные репродуктивные технологии, *in vivo*, *in vitro*, эмбриотрансплантация

Для цитирования

Дюльгер Г.П., Лазарев Д.И., Акчурин С.В., Акчурина И.В. и др. Трансплантация *in vivo* эмбрионов в коневодстве: исторические данные и современное состояние // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 160–173.

***In vivo* embryo transfer in horse breeding:
historical data and current status**

**Georgy P. Dyulger¹, Dmitry I. Lazarev², Sergey V. Akchurin¹,
Irina V. Akchurina¹, Vladislav S. Bychkov¹, Dmitriy V. Svistounov¹**

¹Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
²Center of Reproduction of Horses, Hartley Horse House, OOO,
Moscow Region, Russia

✉ **Corresponding author:** sakchurin@rgau-msha.ru

Abstract

This article provides a review of the biotechnology concerning *in vivo* embryo production and transfer in the equine industry. According to the IETS registry, a total of 152,815 embryo transfers have been performed globally in horse breeding over the past five years alone, with the vast majority (125,017, or 81.81%) utilizing *in vivo* embryos. Primarily, freshly recovered embryos are used for transfer. The proportion of cryopreserved embryo transfers remains negligible compared to fresh embryo transfers (0.48% vs. 99.52%). Embryos are typically recovered from donor mares without superovulation induction, directly from the uterine lumen. The optimal time for embryo flushing is 7–8 days post-ovulation. Cervical catheterization is performed transcervically, via the vagina, using a flexible double-lumen silicone catheter equipped with an inflatable cuff, under digital guidance (with a gloved hand). The average embryo recovery rate typically ranges from 50–65%. It is recommended to synchronize the donor's estrous cycle with those of 2–3 recipients, ensuring that at least one recipient ovulates 1–2 days after the donor mare. Estrus and ovulation synchronization can be induced using compounds from various pharmacological groups that possess progestagenic (e.g., progesterone, altrenogest) and/or luteolytic (e.g., native prostaglandin F_{2α} or its highly active synthetic analog – cloprostenol) activity, often in combination with ovulation-inducing agents (e.g., deslorelin or hCG). Embryo transfer into the uterus is performed transcervically, using either the manual-uterine or visual-uterine technique. In the first (classical) technique of uterine embryo transfer, cervical canal catheterization is guided by manual control. The second technique involves using a Polansky speculum, with the ventral lip of the vaginal cervix stabilized by Wilshir cervical forceps. The efficiency of the manual-uterine (classical) technique for fresh embryo transfer achieves pregnancy rates of 65.5–77.8%, whereas the Wilshir technique yields 90.9–93.4%.

Keywords

Horse breeding, assisted reproductive technology, *in vivo*, *in vitro*, embryo transfers

For citation

Dyulger G.P., Lazarev D.I., Akchurin S.V., Akchurina I.V. et al. *In vivo* embryo transfer in horse breeding: historical data and current status. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 160–173.

**Введение
Introduction**

Трансплантация эмбрионов – это репродуктивная технология, при которой зародыши, полученные от самки-донора или выращенные в лабораторных условиях (с применением процедуры экстракорпорального оплодотворения, ИКСИ),

переносят в половые пути самки-реципиента для их дальнейшего вынашивания и рождения в срок зрелого плода [1, 2].

Наибольшее практическое применение эмбриотрансфер получил в скотоводстве. Только в 2023 г. в мировом скотоводстве проведено более 1,6 млн эмбриотрансферов [25]. Трансплантация *in vivo* (и в меньшей степени – *in vitro*) эмбрионов достаточно активно практикуется также в коневодстве. По объему производства эмбрионов и количеству эмбриопереносов, выполненных в 2023 г., коневодство занимает третье место после скотоводства и овцеводства соответственно [25].

Цель исследований: на основании анализа публикаций в базах данных оценить практические возможности современной технологии производства и пересадки *in vivo* эмбрионов в коневодстве.

Методика исследований

Research method

Источниками научной информации для подготовки данного обзора послужили базы данных PubMed (<https://www.pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>) и eLibrary.ru (<https://www.elibrary.ru/>). Рассматривались русскоязычные и англоязычные версии статей за последние 10 лет. Поиск проводился по ключевым словам, относящимся к разведению лошадей и вспомогательным репродуктивным технологиям, включая перенос эмбрионов (в PubMed – horse breeding, horses, assisted reproductive technology, *in vivo* and *in vitro* embryo transfers; в eLibrary.ru – «вспомогательные репродуктивные технологии», «пересадка нативных и витральных эмбрионов в коневодстве»). Кроме того, учитывались публикации, содержащие информацию о биотехнологиях получения эмбрионов от кобыл-доноров и имеющие полный текст в eLibrary.ru. Статьи включались в обзор при условии наличия информации о технологиях получения и переноса эмбрионов у лошадей и доступности полнотекстовой версии. Исключению подлежали публикации, не соответствующие теме исследований или недоступные для детального анализа по причине отсутствия полного текста.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Первая успешная трансплантация 5–7-дневных нативных эмбрионов пони, полученных и пересаженных нехирургическим способом реципиентам, была выполнена в Японии в 1974 г. [15]. Первое сообщение о рождении жеребят с применением хирургического и нехирургического способов подсадки свежеполученных 1–6- и 6–8-дневных эмбрионов в маточные трубы и полость матки кобыл-реципиентов соответственно сделано в Великобритании в 1975 г. [4], а от пересадки замороженно-оттаянного зародыша – в Японии 31 мая 1982 г. [28].

В России первые успешные пересадки эмбрионов кобылам-реципиентам были выполнены в лаборатории физиологии размножения ВНИИ коневодства [3]: в 1982 г. родился жеребенок – трансплантант от пересадки свежего эмбриона (С.Г. Лебедев), в 1989 г. – после эмбриотрансфера культивированного в авторской МСЖ-среде (24 ч) зародыша (С.Г. Лебедев, Л.Ф. Лебедева), а в 2012 г. появились на свет первые жеребята от пересадки двух криоконсервированных (методом витрификации) эмбрионов (Л.Ф. Лебедева).

Коммерческое применение метода в коневодстве началось в 1980-е гг. прошлого столетия [6]. В настоящее время трансплантация эмбрионов достаточно широко практикуется в коневодстве во многих странах мира. При этом большинство

коннозаводческих ассоциаций разрешают регистрацию (вносить в реестр породы) неограниченное количество жеребят, рожденных путем эмбриотрансфера в течение года от одной кобылы-донора [9].

Статистика трансплантаций *in vivo* и *in vitro* эмбрионов в коневодстве в период с 2019 по 2023 гг. по данным регистра Международного общества эмбриональных технологий (The International Embryo Technology Society, или сокращенно IETS) приведена в таблице.

Как следует из материалов таблицы 1, трансплантация эмбрионов является достаточно распространенной в коневодстве технологией. Только за последние 5 лет (в период с 2019 до 2023 гг.), по данным IETS, в коневодстве выполнено свыше 152 тыс. эмбриотрансфера. При этом *in vivo* технология эмбриотрансфера продолжает оставаться более распространенной и востребованной, чем *in vitro* (81,81% переносов против 18,19%). Для пересадки применяют главным образом свежеполученные зародыши. Доля криотрансфера при переносе *in vivo* эмбрионов достигает всего 0,48%, *in vitro* эмбрионов она значительно выше и составляет 47,78%.

Лидерами по производству и пересадке преимплантационных эмбрионов, зачатых после ручной случки и/или искусственного осеменения и/или выращенных в лабораторных условиях в пробирке с помощью процедуры ЭКО/ИКСИ, в Южной Америке являются Бразилия, в Северной – США, в Европе – Франция и Италия [25].

В России практический интерес к трансплантации эмбрионов в коневодстве пока имеет ограниченный диапазон. В период с 2009 по 2023 гг. в России с использованием данного метода получали от 1 до 10 жеребят в год [12]. По данным регистра IETS за 2024 г., в РФ за отчетный период в коневодстве выполнено 15 подсадок *in vivo* эмбрионов, из которых одна – с использованием замороженно-оттаянного эмбриона [25].

Таблица

Статистика трансплантации *in vivo* и *in vitro* эмбрионов в коневодстве по данным регистра IETS за 2019–2023 гг. [21–25]

Table

Statistics of *in vivo* and *in vitro* embryo transfer in horse breeding based on IETS registry data for 2019–2023 [21–25]

Год	Проведено эмбриотрансферов		
	эмбрионами <i>in vivo</i>	эмбрионами <i>in vitro</i>	Всего
2019	23546	3564	27110
2020	26241	3857	30098
2021	26205	6078	32283
2022	23019	5977	28996
2023	26006	8322	30740
Итого	125017	27798	152815

Процедура получения и трансплантации эмбрионов, полученных естественным путем, включает в себя ряд последовательных этапов: отбор подходящих кобыл-доноров и реципиентов; осеменение доноров в рамках естественного или стимулированного полового цикла; извлечение эмбрионов у доноров; оценка качества, культивирование и консервация полученных зародышей; синхронизация половых циклов реципиентов и доноров, а также перенос эмбрионов реципиентам [1, 2].

При выборе кобыл-доноров эмбрионов учитывается их племенная ценность. В эту категорию входят молодые кобылы с хорошей родословной, спортивные кобылы, демонстрирующие высокие результаты, и кобылы старшего возраста, обладающие ценными племенными качествами несмотря на бесплодие [2].

Получение эмбрионов от кобыл-доноров чаще всего происходит без применения методик, стимулирующих множественную овуляцию. Это связано с тем, что современные схемы индукции суперовуляции в коневодстве пока не отличаются высокой эффективностью и стабильностью результатов [2].

Для осеменения кобыл-доноров с целью получения зародышей применяют, как правило, двукратную искусственную инсеминацию в течение естественного полового цикла, сочетая ее с гормональной стимуляцией овуляции. Рекомендуемая концентрация сперматозоидов в используемой спермодозе составляет 250–300 млн активных спермиев [2, 6].

Время осеменения кобыл-доноров в охоте устанавливают по результатам УЗИ-мониторинга за ростом доминантных фолликулов и их овуляцией. Первую инсеминацию проводят, когда размер доминантного фолликула составляет 35–40 мм (рис. 1). Преовуляторный фолликул в зависимости от ракурса сканирования определяется как анэхогенное образование округлой или округло-вытянутой в сторону овуляторной ямки формы. Одновременно с инсеминацией кобыле инъецируют овуляторную дозу деслорелина (20 мкг в/м) или хорионического гонадотропина (2000–3000 МЕ в/в) для индукции овуляции в прогнозируемый период. Через 24, 30 и 36 ч после первого осеменения и гормональной стимуляции овуляции проводится трансректальное ультразвуковое сканирование яичников кобыл. При визуализации прямых признаков овуляции кобыл осеменяют повторно через 24, 30 или 36 ч соответственно, при ее отсутствии – осеменение проводится через 36 ч с последующим обязательным сканированием яичников через 12 ч.

Преовуляторные фолликулы у лошадей непосредственно перед овуляцией достигают в среднем 49,8...51,0 мм [14].

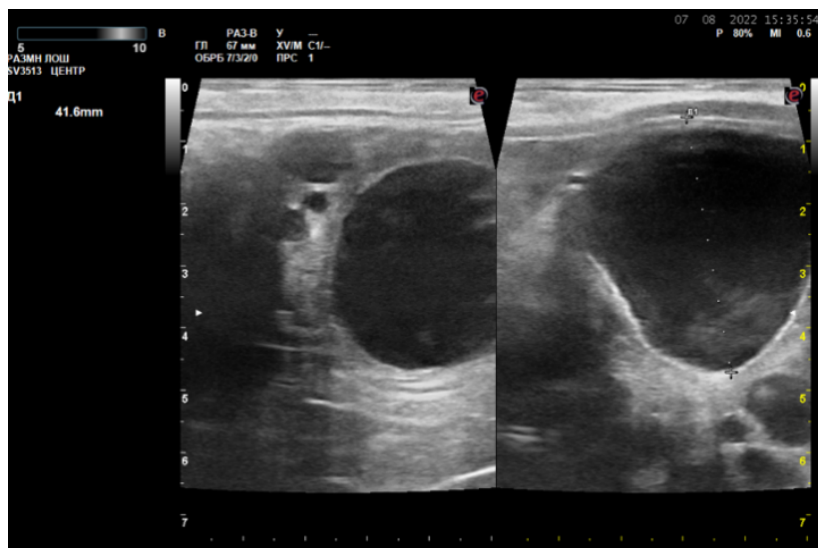
При использовании одной дозы спермы хорошие результаты получают при осеменении кобыл в первые часы после овуляции, диагностированной при скрининговом исследовании яичников каждые 6 или 8 ч через 20 более ч и после введения овуляторной дозы гонадотропина или ХГч [13].

При системном ультразвуковом мониторинге овуляции с двукратным искусственным осеменением кобылы-донора свежей спермой достигается более высокая степень оплодотворяемости, чем при использовании замороженно-оттаянной спермы.

Получение эмбрионов от кобыл-доноров. Эмбрионы получают при помощи трансцервикального катетера из полости тела матки.

Миграция эмбрионов в рог матки происходит в период с 5,5 по 6-е сутки после овуляции. В это время зародыши находятся на стадии морулы, или ранней бластоцисты, и имеют средний диаметр около 0,2 мм [1, 2]. Для сравнения: размер неоплодотворенной яйцеклетки составляет около 0,15 мм. С 7 по 9-е сутки гестации наблюдается значительный рост эмбрионов – от 0,4 до 2,2 мм [20]. Вымывание эмбрионов оптимально проводить на 7 или 8-е сутки [9]. Позднее вымывание, на 9-е сутки, не рекомендуется ввиду большого размера бластоцисты, что повышает вероятность повреждения и снижает шансы на успешную пересадку [2].

Кобылу фиксируют в станке. Хвост бинтуют и отводят в сторону. При помощи бинта или тесемки его привязывают к станку. Прямую кишку освобождают от содержимого, чтобы провести УЗИ яичников и определить наличие и локализацию желтых тел (рис. 2). Затем проводят туалет и антисептическую обработку наружных половых органов.



a

б

Рис. 1. Эхограммы доминантного яичника кобылы в охоте в преовуляторный период с преовуляторным фолликулом округлой (а) или округло-вытянутой в сторону овуляционной ямки формы (б) размером более 40 мм

Figure 1. Ultrasonographic images of the dominant ovary in a mare during estrus in the pre-ovulatory phase with preovulatory follicle with a diameter greater than 40 mm, appearing either round (a) or round-elongated shape towards the ovulation fossa (b)

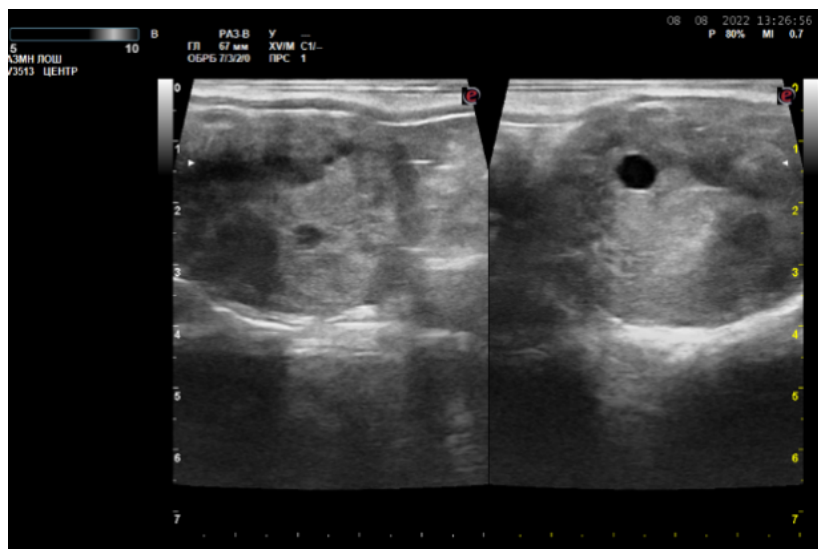


Рис. 2. Эхограммы доминантного яичника кобылы с желтым телом в стадию диэструса

Figure 2. Ultrasonographic images of the dominant ovary in a mare with a corpus luteum during the diestrus phase

Большинству кобыл-доноров для безопасного и эффективного проведения процедуры вымывания эмбрионов из полости матки не требуется применение седативных препаратов и/или проведение эпидуральной анестезии (10%-ным раствором новокаина или лидокаина). Седативные средства (ксилазин или детомидина гидрохлорид, но не ацетпромазин) применяют только строптивым животным либо легко возбудимым молодым кобылам, не прирученным к станку и/или акушерско-гинекологическим манипуляциям [13].

Вымывание эмбрионов выполняют с соблюдением норм ветеринарно-санитарного контроля и техники безопасности. Для вымывания эмбрионов обычно применяют раствор Дюльбекко, дополненный 1%-ной инактивированной фетальной бычьей сывороткой. Для кратковременного хранения эмбрионов используют среду Nam's F10, которую предварительно насыщают газовой смесью (90% азота, 5% кислорода и 5% углекислого газа) в течение 3–5 мин, а затем обогащают, добавляя 10%-ную инактивированную фетальную бычью сыворотку или сыворотку новорожденного теленка, а также антибиотики: пенициллин (1000 ЕД/мл) и стрептомицин (100 мкг/мл) [1, 2].

Катетеризацию шейки матки проводят через влагалище при помощи гибкого двухканального силиконового катетера с надувным баллончиком (диаметром 8 мм и длиной от 0,8 м до 1,35...1,5 м) под контролем пальцев руки в одноразовой гинекологической перчатке. После введения катетера в полость матки (рис. 3) в его баллончик нагнетают 30–60 мл воздуха. Далее полость матки (тела и рогов) обрабатывают серией промываний, используя 1 л специальной среды, повторно – 3–6 раз, собирая промывочную жидкость в емкость объемом немного более 1 л. Эффективность удаления промывочной жидкости из тела и рогов матки контролируют методом пальпации через прямую кишку. Важно, чтобы объем остаточной жидкости после каждого промывания не превышал 10% от объема введенной жидкости [1, 2].

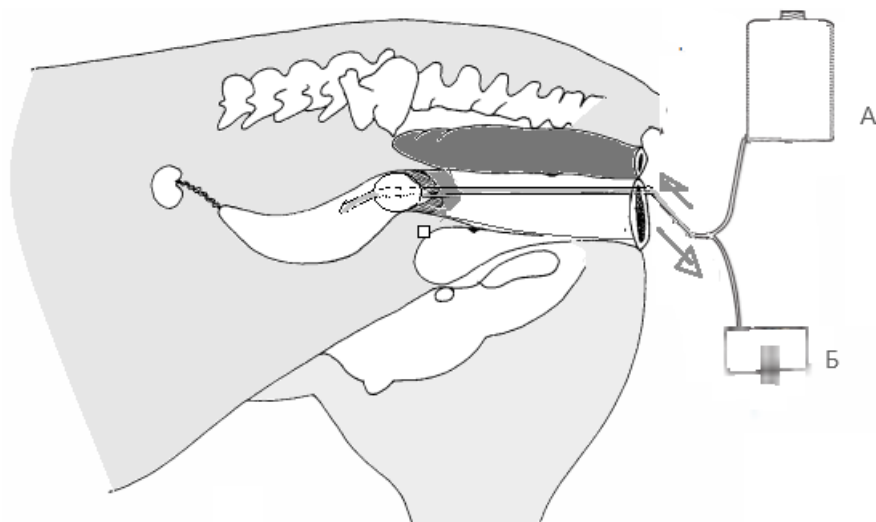


Рис. 3. Местоположение баллонообразного расширения гибкого силиконового катетера при извлечении эмбрионов:
А – емкость с раствором Дюльбекко; Б – эмбриосборник (фильтр)

Figure 3. Location of the balloon-like dilation of a flexible silicone catheter during embryo recovery:
A – container with Dulbecco's solution; B – embryo collection filter unit

Промывочная жидкость сливается в емкость или пропускается через эмбриональный фильтр. Нефильтрованную промывную жидкость после сбора выдерживают в течение 20–30 мин для осаждения эмбрионов. Затем аккуратно удаляют верхнюю часть жидкости (850–900 мл), а оставшийся нижний слой жидкости порциями переносят в чашки Петри для дальнейшего макро- и микроскопического анализа с использованием бинокулярной лупы (увеличение – 10–15 крат). Обнаруженные зародыши подвергают морфологической оценке. Зародыши, демонстрирующие признаки дегенерации, аномалии развития или другие отклонения, отбраковывают. Эмбрионы, признанные пригодными для пересадки, аккуратно извлекают при помощи шприца (1 мл) и катетера и переносят в стерильную чашку Петри со средой для трансплантации. Для очистки эмбрионы отмывают в течение 1–2 мин и переносят в другую чашку Петри, где они хранятся до момента трансплантации [2].

При использовании эмбрионального фильтра поиск эмбрионов проводят непосредственно в стеклянном эмбриосборнике с разлинованным дном.

Основными критериями оценки качества эмбрионов являются их морфологические характеристики и жизнеспособность.

Для оценки морфологических особенностей эмбрионов используют инвертированный микроскоп с увеличением от 50 до 100 крат. Эмбрионы, обладающие высокой биологической ценностью, имеют следующие характеристики: правильную шаровидную форму, равномерную и светлую цитоплазму, неповрежденную прозрачную оболочку, одинаковые по размеру бластомеры и хорошо выраженные межклеточные соединения.

После оценки жизнеспособности эмбрионы дважды промывают в растворе фосфатного буфера Дюльбекко с добавлением антибиотиков. Затем эмбрионы помещают в небольшую чашку Петри, содержащую среду для культивирования, либо вместе с небольшим количеством среды засасывают в палетку. Для пересадки эмбрионы, полученные непосредственно перед процедурой, используют в течение 0–4 ч после извлечения из половых путей донора, но не позднее 14 ч [9, 13].

Эффективность вымывания эмбрионов достигает в среднем 50–65% [11–13, 19] и зависит от широкого круга факторов и, в частности, от состояния репродуктивного здоровья (фертильности) кобыл-доноров, их возраста, качества донорской спермы, сроков и техники вымывания эмбрионов.

При необходимости транспортировки зародышей на большие расстояния их замораживают. Относительно хорошо процедуру замораживания и оттаивания переносят 6-дневные зародыши лошадей размером менее 300 мкм.

В качестве реципиентов для эмбрионов отбирают кобыл, отвечающих ряду требований. Они должны быть здоровыми, фертильными, в возрасте от 3 до 12 лет (максимум 15 лет), с хорошо развитой молочной железой. Важным является отсутствие патологий родового канала и осложнений в период беременности, родов или в послеродовом периоде. Кроме того, необходимо, чтобы кобылы демонстрировали стабильные и полноценные половые циклы в период половой активности [2].

На одного донора в идеале подбирают 2–3 и более реципиентов. Синхронность проявления половой охоты и овуляции между кобылой-донором и реципиентами обеспечивают при помощи препаратов различных фармакологических групп, обладающих прогестагенной (прогестерон, алтреногест) и/или лютеолитической (нативный прогестагландин Ф-2 альфа или его высокоактивный синтетический аналог – клопростенол) активностью в сочетании препаратами-триггерами овуляции (десморелин или ХГЧ).

Пересадка зародыша. Пересадку зародышей в матку производят трансцервикально мануотеральным и визоутеральным способами. При первом способе подсадки эмбрионов в матку катетеризация цервикального канала проводится под мануальным

контролем, при втором – с использованием двухстворчатого влагалищного зеркала с фиксацией нижней губы влагалищной части шейки матки гинекологическими щипцами Уилшера.

Мануотеральный, или классический, способ эмбриотрансфера. Кобылу фиксируют в станке. Хвост забинтовывают и отводят в сторону. При сильном беспокойстве самкам-реципиентам проводится седация и/или эпидуральная анестезия. Половые органы обмывают теплым раствором 1%-ного натрия бикарбоната и дезинфицируют [2].

Руку, одетую в полистироловую перчатку, вместе с катетером со свежеполученным или замороженно-оттаянным эмбрионом, заключенным в специальную пластиковую соломинку объемом 0,5 мл, вводят во влагалище. Металлический катетер выдвигают из защитной гигиенической оболочки и под контролем указательного пальца направляют в наружную часть цервикального канала. Затем руку извлекают из влагалища и вводят в прямую, опорожненную от каловых масс кишку. После мануальной ориентации в тазовой полости, удерживая пальцами руки шейку матки, катетеризуют цервикальный канал. Цервикс проходят, манипулируя катетером и оттягивая шейку матки вперед и назад. Эмбрион вводят путем нажатия на стилет металлического катетера, удостоверившись, что его кончик находится в теле матки на глубине 8...15 см. Катетер извлекают из половых органов, а соломинку исследуют под бинокулярной лупой, чтобы убедиться, что зародыш перенесен в полость матки.

Трансцервикальный метод переноса эмбриона в полость тела матки может быть реализован с использованием длинной одноканальной пипетки из полистирола, соединенной со шприцем. В канал пипетки последовательно набирают с помощью шприца: 1 мл антисептического раствора (10 000 ЕД пенициллина и 10 000 мкг стрептомицина); 0,25 мл воздуха; 0,5 мл культуральной среды (без эмбриона); еще 0,25 мл воздуха; 0,5 мл культуральной среды, содержащей эмбрион, отобранный для пересадки; 0,25 мл воздуха; 0,5 мл культуральной среды (без эмбриона); 0,25 мл воздуха; 0,5 мл культуральной среды. Описанная последовательность необходима для защиты эмбриона в процессе переноса и для точной локализации места его введения [1, 2]. Эффективность эмбриотрансфера свежеполученными эмбрионами достигает 65,5–77,8% [7–10, 12, 13, 16, 17, 26]. При подсадке эмбрионов отличного и хорошего качества эмбриональная смертность составляет всего 7,1–17,0% [7, 10, 12, 16, 17], удовлетворительного или плохого качества – 46,2 и 79,0% соответственно [17].

Недостатки метода заключаются в том, что он является трудоемким, сложным в техническом исполнении, поэтому необходимы специальная подготовка и постоянная практика.

Визуотеральный способ эмбриотрансфера разработан в Великобритании 2004 г. и подробно описан в работе S. Wilsher, W.R. Allen [27]. Для трансцервикального введения эмбриона в полость тела матки применяют двухстворчатое влагалищное зеркало Полански с винтовым фиксатором и подсветкой, инструмент для трансплантации (металлический катетер с гнездом для соломинки и стилетом-толкателем для ее опорожнения) и гинекологические щипцы Уилшера для захватывания, тракции и контракции шейки матки.

Техника подсадки эмбриона в полость матки по методу Уилшера достаточно проста. Кобылу ставят в специальный станок. Корень хвоста кобылы следует забинтовать, чтобы жесткие волосы хвоста не попали во влагалище. Процедуру рекомендуется проводить под седацией (ацетопромазин в дозе 10 мг в/в). После опорожнения прямой кишки от каловых масс проводится тщательная антисептическая обработка наружных гениталий с финальным удалением антисептика одноразовой стерильной салфеткой.

Остуженное после автоклавирования и увлажненное теплым стерильным изотоническим раствором хлорида натрия влагалищное зеркало в закрытом состоянии осторожно вводится через половую щель до свода влагалища. После обнажения краиниальной части вагины на нижнюю губу шейки матки накладывают гинекологические щипцы Уилшера. Полистироловую пипетку или металлический катетер с эмбрионом, заключенным в пластиковую соломинку, выдвигают из защитной гигиенической оболочки и направляют в наружное отверстие цервикального канала. Осторожно манипулируя шейкой матки при помощи гинекологических щипцов, катетер с эмбрионом продвигают через цервикальный канал в тело матки. Эмбрион вводят путем нажатия на стилет катетера. Катетер вместе с гинекологическими щипцами и влагалищным зеркалом извлекают, и соломинку исследуют под бинокулярной лупой, чтобы убедиться в том, что зародыш перенесен в полость матки [2].

Метод прошел клиническую апробацию и доказал свою высокую эффективность [5, 8, 9, 18]. По данным ученых из Утрехтского университета [8], эффективность метода по частоте наступления беременности при переносе свежеполученных эмбрионов достигает 92,3%, по частоте наступления родов – 83,2%.

Выводы

Conclusions

Приведенные выше данные позволяют сделать вывод о том, что в сфере эмбриотрансфера *in vivo*-технология производства и пересадки эмбрионов является наиболее востребованной, доступной и служит важным биотехнологическим методом сохранения и приумножения генетических ресурсов в коневодстве. Для пересадки применяют главным образом свежеполученные зародыши. Доля криоэмбриотрансфера при переносе *in vivo* эмбрионов кобылам-реципиентам достигает всего 0,48%.

Список источников

1. Дюльгер Г.П. *Физиология и биотехника размножения животных. Курс лекций*: Учебное пособие. Изд. 3-е. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 256 с. EDN: ABGQQY
2. Дюльгер Г.П., Храмцов В.В., Кертиева Н.М. *Физиология и биотехника размножения лошадей*: Учебное пособие. Москва: Гэотар-Медиа, 2012. 120 с.
3. Лебедева Л.Ф. Эмбриотехнологии в современной системе воспроизводства лошадей // *Коневодство и конный спорт*. 2020. № 6. С. 19–22. <https://doi.org/10.25727/HS.2020.6.62727>
4. Allen W., Rowson L. Surgical and non-surgical egg transfer in horses. *Journal of reproduction and fertility. Supplement*. 1975;23:525-530.
5. Card C. Non-surgical embryo transfer technique and recipient mare pregnancy rate. *Vet. Rec.* 2018;183(10):320-322. <http://doi.org/10.1136/vr.k3700>
6. Carlos Gardón J.C., Satué K. History of Horses and the Biotechnologies Applied to Its Reproduction. *Intechopen*. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001925>
7. Carnevale E.M., Ramirez R.J., Squires E.L. et al. Factors Affecting Pregnancy Rate and Early Embryonic Death after Equine Embryo Transfer. *Theriogenology*. 2000;54:965-979. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(00\)00405-2](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(00)00405-2)
8. Cuervo-Arango J., Claes A.N., Stout T. Effect of embryo transfer technique on the likelihood of pregnancy in the mare: a comparison of conventional and Wilsher's forceps-assisted transfer. *Vet. Rec.* 2018;183(10):323. <http://doi.org/10.1136/vr.104808>
9. Dordas-Perpinya M., François Bruyas J. Practical aspects of equine embryo transfer. *Translational Research in Vet. Sci.* 2019;2(1):23-39. <https://doi.org/10.12775/TRVS.2019.002>

10. Fanelli D., Tesi M., Ingallinesi M. et al. Recipients' Pregnancy Rate Was Affected by Season but Not by the Temperature-Humidity Index (THI) in an Equine Commercial ET Programme in Southern Europe. *Reprod. Dom. Anim.* 2022;57:343-348. <https://doi.org/10.1111/rda.14070>
11. Ferreira-Silva J.C., Sales F.A.B.M., Nascimento P.S. et al. Evaluation of embryo collection and transfer days on the pregnancy rate of Mangalarga Marchador mares during the breeding season. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.* 2019;32(3):214-220. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v32n3a06>
12. Kalashnikov V., Solodova E., Lebedeva L. Current state of horse embryo transfer technology in Russia and factors influencing its effectiveness. *BIO Web of Conferences.* 2024;121:01004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412101004>
13. McCue P.M., Squires E.L. *Equine Embryo Transfer*. Florence, Oregon, USA: Teton New Media, 2015:168
14. Melia J., Amrozi A., Supriatna I., Agil M. Determination of ovulation time in gayo mares based on images of preovulatory follicle growth. *J. Kedokteran Hewan.* 2023;17(2):80-83. <https://doi.org/10.21157/j.ked.hewan.v17i2.26766>
15. Oguri N., Tsutsumi Y. Non-surgical egg transfer in mares. *J. Reprod.* 1974;41:313-320. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0410313>
16. Okada C.T.C., Segabinazzi L.G., Crespilho A.M. et al. Effect of the flunixin meglumine on pregnancy rates in an equine embryo transfer program. *J. Equine Vet. Sci.* 2018;62:40-43. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2017.10.023>
17. Panzani D., Vannozzi I., Marmorini P. et al. Factors Affecting Recipients' Pregnancy, Pregnancy Loss, and Foaling Rates in a Commercial Equine Embryo Transfer Program. *J. Equine Vet. Sci.* 2016;37:17-23. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2015.10.011>
18. Ramírez H., Cuervo-Arango J., Losinno L. Embryo transfer technique affects pregnancy rates in recipient mares. *J. Equine Vet. Sci.* 2023;125:104672. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104672>
19. Sala-Ayala L., Martínez-Boví R., Querol-Paajanen A., Cuervo-Arango J. The effect of uterine massage and number of embryo flushing attempts on embryo recovery in mares. *Theriogenology.* 2024;224:94-101. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2024.05.017>
20. Vanderwall D.K. Early embryonic development and evaluation of equine embryo viability. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 1996;12(1):61-83. [https://doi.org/10.1016/s0749-0739\(17\)30295-x](https://doi.org/10.1016/s0749-0739(17)30295-x)
21. Viana J. 2019 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter.* 2020;38(4):7-26.
22. Viana J.H.M. 2021 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter.* 2022;40(4):22-40.
23. Viana J.H.M. 2020 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter.* 2021;39(4):24-38.
24. Viana J.H.M. 2022 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter.* 2023;41(4):20-38.
25. Viana J.H.M. 2023 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter.* 2024;42(4):1-15.
26. Wala N., Serres C., Foss R. et al. Effect of duration of embryo holding on recipient mares' pregnancy rate. *J. Equine Vet. Sci.* 2018;66:215. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2018.05.102>
27. Wilsher S., Allen W.R. An improved method for nonsurgical embryo transfer in the mare. *Equine Veter. Educ.* 2004;16(1):39-44. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3292.2004.tb00265.x>
28. Yamamoto Y., Oguri N., Tsutsumi Y., Hachinohe Y. Experiments in the freezing and storage of equine embryos. *J. Reprod. Fertil.* 1982;32:399-403.

References

1. Dyulger G.P. *Physiology and biotechnics of animal reproduction: A course of lectures: a textbook*. 3rd ed. Saint Petersburg, Russia: Publishing House Lan, 2023:256. (In Russ.)
2. Dyulger G.P., Khramtsov V.V., Kertieva N.M. *Physiology and biotechnics of horse breeding: a textbook*. Moscow, Russia: GEOTAR-Media, 2012:120. (In Russ.)
3. Lebedeva L.F. Embryotechnologies in current system of equine reproduction. *Konevodstvo i konniy sport*. 2020;(6):19-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.25727/HS.2020.6.62727>
4. Allen W., Rowson L. Surgical and non-surgical egg transfer in horses. *Journal of reproduction and fertility. Supplement*. 1975;23:525-530.
5. Card C. Non-surgical embryo transfer technique and recipient mare pregnancy rate. *Vet. Rec*. 2018;183(10):320-322. <http://doi.org/10.1136/vr.k3700>
6. Carlos Gardón J.C., Satué K. History of Horses and the Biotechnologies Applied to Its Reproduction. *Intechopen*. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001925>
7. Carnevale E.M., Ramirez R.J., Squires E.L. et al. Factors Affecting Pregnancy Rate and Early Embryonic Death after Equine Embryo Transfer. *Theriogenology*. 2000;54:965-979. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(00\)00405-2](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(00)00405-2)
8. Cuervo-Arango J., Claes A.N., Stout T. Effect of embryo transfer technique on the likelihood of pregnancy in the mare: a comparison of conventional and Wilsher's forceps-assisted transfer. *Vet. Rec*. 2018;183(10):323. <http://doi.org/10.1136/vr.104808>
9. Dordas-Perpinya M., François Bruyas J. Practical aspects of equine embryo transfer. *Translational Research in Vet. Sci*. 2019;2(1):23-39. <https://doi.org/10.12775/TRVS.2019.002>
10. Fanelli D., Tesi M., Ingallinesi M. et al. Recipients' Pregnancy Rate Was Affected by Season but Not by the Temperature-Humidity Index (THI) in an Equine Commercial ET Programme in Southern Europe. *Reprod. Dom. Anim*. 2022;57:343-348. <https://doi.org/10.1111/rda.14070>
11. Ferreira-Silva J.C., Sales F.A.B.M., Nascimento P.S. et al. Evaluation of embryo collection and transfer days on the pregnancy rate of Mangalarga Marchador mares during the breeding season. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu*. 2019;32(3):214-220. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v32n3a06>
12. Kalashnikov V., Solodova E., Lebedeva L. Current state of horse embryo transfer technology in Russia and factors influencing its effectiveness. *BIO Web of Conferences*. 2024;121:01004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412101004>
13. McCue P.M., Squires E.L. *Equine Embryo Transfer*. Florence, Oregon, USA: Teton New Media, 2015:168.
14. Melia J., Amrozi A., Supriatna I., Agil M. Determination of ovulation time in gayo mares based on images of preovulatory follicle growth. *J. Kedokteran Hewan*. 2023;17(2):80-83. <https://doi.org/10.21157/j.ked.hewan.v17i2.26766>
15. Oguri N., Tsutsumi Y. Non-surgical egg transfer in mares. *J. Reprod*. 1974;41:313-320. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0410313>
16. Okada C.T.C., Segabinazzi L.G., Crespilho A.M. et al. Effect of the flunixin meglumine on pregnancy rates in an equine embryo transfer program. *J. Equine Vet. Sci*. 2018;62:40-43. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2017.10.023>
17. Panzani D., Vannozzi I., Marmorini P. et al. Factors Affecting Recipients' Pregnancy, Pregnancy Loss, and Foaling Rates in a Commercial Equine Embryo Transfer Program. *J. Equine Vet. Sci*. 2016;37:17-23. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2015.10.011>
18. Ramírez H., Cuervo-Arango J., Losinno L. Embryo transfer technique affects pregnancy rates in recipient mares. *J. Equine Vet. Sci*. 2023;125:104672. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104672>

19. Sala-Ayala L., Martínez-Boví R., Querol-Paajanen A., Cuervo-Arango J. The effect of uterine massage and number of embryo flushing attempts on embryo recovery in mares. *Theriogenology*. 2024;224:94-101. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2024.05.017>
20. Vanderwall D.K. Early embryonic development and evaluation of equine embryo viability. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 1996;12(1):61-83. [https://doi.org/10.1016/s0749-0739\(17\)30295-x](https://doi.org/10.1016/s0749-0739(17)30295-x)
21. Viana J. 2019 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter*. 2020;38(4):7-26.
22. Viana J.H.M. 2021 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter*. 2022;40(4):22-40.
23. Viana J.H.M. 2020 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter*. 2021;39(4):24-38.
24. Viana J.H.M. 2022 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter*. 2023;41(4):20-38.
25. Viana J.H.M. 2023 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter*. 2024;42(4):1-15.
26. Wala N., Serres C., Foss R. et al. Effect of duration of embryo holding on recipient mares' pregnancy rate. *J. Equine Vet. Sci.* 2018;66:215. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2018.05.102>
27. Wilsher S., Allen W.R. An improved method for nonsurgical embryo transfer in the mare. *Equine Veter. Educ.* 2004;16(1):39-44. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3292.2004.tb00265.x>
28. Yamamoto Y., Oguri N., Tsutsumi Y., Hachinohe Y. Experiments in the freezing and storage of equine embryos. *J. Reprod. Fertil.* 1982;32:399-403.

Сведения об авторах

Георгий Петрович Дюльгер, д-р ветеринар. наук, доцент, профессор кафедры ветеринарной медицины, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: dulger@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2501-1235>

Дмитрий Иванович Лазарев, канд. с.-х. наук, научный сотрудник, руководитель Центра репродукции лошадей ООО «Хартли Хорс Хаус»; 143700, Российская Федерация, Московская область, г.о. Шаховская, д. Стариково; e-mail: dl@equinereproduction.ru

Сергей Владимирович Акчурина, д-р ветеринар. наук, доцент, профессор кафедры ветеринарной медицины, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: sakchurin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6822-0013>

Ирина Владимировна Акчурина, канд. ветеринар. наук, доцент, доцент кафедры ветеринарной медицины, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: akchurinaiv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1975-2929>

Владислав Сергеевич Бычков, канд. ветеринар. наук, доцент кафедры ветеринарной медицины, Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: vlad91bd@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1548-9999>

Дмитрий Валерьевич Свистунов, канд. ветеринар. наук, доцент кафедры ветеринарной медицины, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: dimitriisvist@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4277-9709>

Information about the authors

Georgy P. Dyulger, DSc (Vet), Associate Professor, Professor at the Department of Veterinary Medicine, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: dulger@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2501-1235>

Dmitry I. Lazarev, CSc (Ag), Research Associate, Head of the Center of Reproduction of Horses “Hartley Horse House”, ООО; Starikovo village, Shakovskaya District, Moscow Region, 143700, Russian Federation; e-mail: dl@equinereproduction.ru

Sergey V. Akchurin, DSc (Vet), Associate Professor, Professor at the Department of Veterinary Medicine, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: sakchurin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6822-0013>

Irina V. Akchurina, CSc (Vet), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Veterinary Medicine, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: akchurinaiv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1975-2929>

Vladislav S. Bychkov, CSc (Vet), Associate Professor at the Department of Veterinary Medicine, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: vlad91bd@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1548-9999>

Dmitriy V. Svistounov, CSc (Vet), Assistant at the Department of Veterinary Medicine, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: dimitriisvist@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4277-9709>

ЗООТЕХНИКА, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

**Влияние штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis*
на микробиоту и питательность силоса из злаково-бобовой травосмеси**

**Лариса Александровна Ильина^{1,2✉}, Иван Григорьевич Малахов¹,
Василий Александрович Заикин², Георгий Юрьевич Лаптев^{1,2},
Виталий Юрьевич Морозов¹, Сергей Павлович Склеров¹**

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «БИОТРОФ», Санкт-Петербург, Россия

✉ Автор, ответственный за переписку: ilina@biotrof.ru

Аннотация

Силосование является процессом консервирования кормов, качество которых во многом определяется микробиологическими процессами. При неблагоприятных условиях заготовки, высокой исходной влажности растительного сырья, несоблюдении технологии вместо молочнокислых бактерий могут развиваться энтеробактерии, клостридии и другие виды, которые снижают питательную ценность и качество готового корма. Цель исследований заключалась в изучении влияния новых штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* в качестве биоконсервантов на микробиоту и питательность силоса из злаково-бобовой растительной массы. В эксперименте оценивали внесение в силосуемую массу штамма *Enterococcus faecium* 46 и комбинации штаммов *Enterococcus faecium* 46 и *Bacillus subtilis* 18 в сравнении с контрольным вариантом без консерванта. Показатели питательности силоса и состав микробиоты определяли на 30-е сутки ферментации растительной массы. Наилучшие результаты по количеству сухого вещества, нейтрально-детергентной клетчатке и доле молочной кислоты в сумме кислот были продемонстрированы при совместном использовании штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis*. По результатам оценки микробиоты методом количественной ПЦР в данном опытном варианте детектировано наиболее высокое количество бактерий рода *Lactobacillus* и меньшее количество представителей семейства *Enterobacteriaceae*, в том числе *Escherichia coli*, *Klebsiella* sp., *Citrobacter* sp. Полученные результаты свидетельствуют о том, что синергетическое воздействие штаммов при консервировании корма позволило затормозить развитие гнилостных и патогенных токсинообразующих бактерий благодаря усиленному синтезу молочной кислоты. На основании полученных результатов можно заключить о высокой перспективе комплекса бактерий для улучшения ферментации, сохранности питательных веществ в консервированных кормах.

Ключевые слова

Силос, злаково-бобовая растительная масса, *Enterococcus faecium*, *Bacillus subtilis*, микробиота силоса, биоконсерванты, питательность кормов

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23–16–20007 и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 23–16–20007 «Разработка комплексного биотехнологического подхода для биологической защиты КРС и продукции животноводства от патогенных бактерий и их токсинов».

Для цитирования

Ильина Л.А., Малахов И.Г., Заикин В.А., Лаптев Г.Ю. и др. Влияние новых штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* на микробиоту и питательность силоса из злаково-бобовой травосмеси // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 174–191.

LIVESTOCK BREEDING, BIOLOGY AND VETERINARY MEDICINE

Effect of *Enterococcus faecium* and *Bacillus subtilis* strains on the microbiota and nutritional value of grass-legume silage

Larisa A. Ilina^{1,2✉}, Ivan G. Malakhov¹, Vasily A. Zaikin², Georgy Yu. Laptev^{1,2}, Vitaly Yu. Morozov¹, Sergey P. Sklyarov¹

¹ Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

² BIOTROF, OOO, Saint Petersburg, Russia

✉ Corresponding author: ilina@biotrof.ru

Abstract

Ensiling is a feed preservation process the quality of which is largely determined by microbiological processes. Under unfavorable harvesting conditions, high initial moisture content of the plant material, or non-compliance with technology, undesirable microorganisms such as enterobacteria, clostridia, and other species may proliferate instead of lactic acid bacteria. This proliferation degrades the nutritional value and quality of the finished feed. The aim of the present study was to investigate the effect of new strains of *Enterococcus faecium* and *Bacillus subtilis*, employed as biopreservatives, on the microbiota and nutritional value of grass-legume silage. The experiment evaluated the inoculation of ensiled biomass with *Enterococcus faecium* 46 and a combination of *Enterococcus faecium* 46 and *Bacillus subtilis* 18, in comparison to a control treatment without a preservative. Silage nutritional parameters and microbiota composition were determined on the 30th day of plant mass fermentation. The most favorable results regarding dry matter content, neutral detergent fiber, and the proportion of lactic acid in total organic acids were observed with the combined application of *Enterococcus faecium* and *Bacillus subtilis* strains. Microbiota assessment via quantitative PCR in this experimental variant revealed the highest abundance of *Lactobacillus* species and a reduced count of *Enterobacteriaceae* family representatives, including *Escherichia coli*, *Klebsiella* sp., and *Citrobacter* sp. These findings suggest that the synergistic action of these strains during feed preservation effectively inhibited the development of putrefactive and pathogenic toxin-forming bacteria due to enhanced lactic acid synthesis. Based on these results, we conclude that this bacterial complex holds significant promise for improving fermentation and nutrient preservation in ensiled forages.

Keywords

Silage, grass-legume biomass, *Enterococcus faecium*, *Bacillus subtilis*, silage microbiota, biopreservatives, feed nutritional value

Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 23–16–20007, and by the St. Petersburg Science Foundation, grant No. 23–16–20007 “Development of an integrated biotechnological approach for biological protection of cattle and livestock products from pathogenic bacteria and their toxins”.

For citation

Ilina L.A., Malakhov I.G., Zaikin V.A., Laptev G.Yu. et al. Effect of *Enterococcus faecium* and *Bacillus subtilis* strains on the microbiota and nutritional value of grass-legume silage. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 174–191.

Введение Introduction

Силосование растительного сырья является основным биологическим методом его сохранения [1]. В норме консервация достигается за счет быстрого снижения pH среды, которое обеспечивается при помощи молочнокислых бактерий. Эпифитные молочнокислые бактерии утилизируют простые углеводы, содержащиеся в силосованных растениях, и метаболизируют их до молочной кислоты, в меньшей степени – до уксусной кислоты, что предотвращает порчу силоса и позволяет ему храниться длительное время [2]. При нормальном развитии процессов силосования получается качественный и безопасный корм для животных. Однако при нарушении процессов, когда закисление среды происходит недостаточно быстро, начинают размножаться патогенные и условно-патогенные микроорганизмы [3]. Плохо приготовленный или загрязненный силос может содержать патогенные микроорганизмы, которые снижают продуктивность животных, вызывают болезни крупного рогатого скота [4] и представляют угрозу для здоровья человека [5, 6].

Корма обычно заражаются патогенами при внесении на поля навоза в качестве удобрения или вследствие переноса через почву во время сбора урожая [7]. Согласно современным представлениям, крупный рогатый скот является основным резервуаром некоторых патогенных микроорганизмов – таких, как *Escherichia coli* O157: H7 [8], которые могут попадать в навозные отстойники с навозом крупного рогатого скота и впоследствии попадать на сельскохозяйственные культуры. Сообщалось, что корма обычно заражаются патогенами при внесении на поля навоза в качестве удобрения или вследствие переноса через почву во время сбора урожая [9]. Тем не менее информация о присутствии клостридий в консервированных кормах из различных кормовых культур является преимущественно разрозненной. Следовательно, силос, как и другие корма для скота, может быть важным средством передачи возбудителей болезней на ферме [4]. Наиболее распространенными патогенными микроорганизмами, обнаруживаемыми в силосе, являются *Escherichia coli*, особенно *E. coli* O157: H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* sp. и *Clostridium* sp. [9]. Существуют отдельные исследования, подтверждающие переход бактериальных токсинов в молоко [10].

Состав и численность эпифитной бактериальной микрофлоры на силосованном растительном сырье недостаточны для инициации образования молочной кислоты присутствующими молочнокислыми бактериями. Естественные популяции молочнокислых бактерий на растительном материале часто являются гетероферментативными и малочисленными [5]. Для получения силоса хорошего качества и высокой усвояемости кормов необходима направленная коррекция процесса силосования добавлением различных препаратов. На практике рекомендуется использование консервантов, особенно для силосования зеленых кормов с низким содержанием моно-, ди- и олигосахаридов, высоким содержанием белка и буферной емкостью.

Ожидаемые изменения в процессе силосования с использованием микробных добавок, содержащих молочнокислые бактерии, включают в себя преобладание этих микроорганизмов в процессе ферментации, увеличение отношения молочной кислоты к другим продуктам ферментации (например, уксусной кислоте, этанолу), более быстрое снижение pH, снижение протеолиза и увеличение восстановления сухого вещества [11]. Сочетание *Lactobacillus buchneri* с *Lactobacillus plantarum* может способствовать повышению синтеза уксусной кислоты, что позитивно влияет на аэробную стабильность силоса [12]. Бациллы, благодаря своим высоким антимикробным свойствам и высокой выживаемости в окружающей среде, являются перспективными для регуляции микробиологических процессов в ходе консервирования кормов.

Цель исследований: изучение влияния биологических штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* на микробиоту силоса из злаково-бобовых культур.

Методика исследований

Research method

Для оценки консервирующего действия штаммов микроорганизмов был проведен модельный лабораторный эксперимент по консервированию злаково-бобовой массы первого укоса, собранной в период бутонизации. В исследовании были использованы штаммы *Bacillus subtilis* 18 и *Enterococcus faecium* 46, выделенные на предыдущем этапе исследований из злаково-бобового силоса. Опыт проводили в 3-х повторностях: 1 вариант (без консервантов); 2 вариант (штаммы *Enterococcus faecium* 46); 3 вариант (штамм *Enterococcus faecium* 46 + *Bacillus subtilis* 18). Количество каждого штамма для консервирования кормов использовали из следующего расчета: 1 мл препарата (содержит $1 \cdot 10^8$ КОЕ/г бактериального штамма), расходуется на обработку 30 кг зеленой массы.

Консервирование кормов проводили с использованием вакуумных пакетов. Зеленую массу растений весом 1 кг закладывали в пакеты, затем из них откачивали воздух при одновременном запаивании пакета с помощью вакуумного упаковщика бескамерного Lava V.333 Premium. Полученную таким образом спрессованную в безвоздушном пространстве массу хранили при температуре $(36 \pm 1)^\circ\text{C}$. На 30-е сутки пакеты с кормом вскрывали и отбирали образцы для исследований показателей качества и микробиологического состава.

Биохимический состав растительной массы и кормов из нее определяли в соответствии с «Физико-химическими методами анализа кормов» [13]. В образцах корма определяли следующие показатели: массовую долю сухого вещества, сырого протеина, сырого жира, сырой клетчатки, КДК (кислотно-детергентная клетчатка), НДК (нейтрально-детергентная клетчатка). Уровень активной кислотности (pH) определяли в соответствии с ГОСТ 26180–84, массовые доли молочной, уксусной и масляной кислоты – по ГОСТ Р 55986–2022.

Для молекулярно-генетических исследований отбор проб проводили с максимально возможным при данных методах соблюдением условий асептики. Образцы были заморожены (-20°C) и переданы на сухом льду в лабораторию.

Для исследования состава микробиоты из образцов консервированных кормов выделяли тотальную ДНК с использованием набора Genomic DNA Purification Kit («Thermo Fisher Scientific, Inc.», США) согласно прилагаемой инструкции. Реакции амплификации проводили с использованием специфических праймеров на амплификаторе DT-Light («ДНК-Технология», Россия) согласно следующим условиям амплификации: 3 мин при $+94^\circ\text{C}$ (предварительный прогрев); 40 с при $+94^\circ\text{C}$; 60 с при $+55^\circ\text{C}$; 90 с при $+72^\circ\text{C}$ (34 цикла); $+72^\circ\text{C}$ – 5 мин. Фрагменты ДНК визуализировали методом геля электрофореза в агарозном геле, используя трис-ацетатный буфер, после чего проводили фотофиксацию результатов.

Последовательности использованных праймеров (5'-3') для детекции бактерий и дрожжей представлены в таблице 1. Подбор праймеров осуществлялся с использованием базы данных NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>).

Математическую и статистическую обработку результатов осуществляли в программе Microsoft Office Excel 2019. Достоверность различий устанавливали по t-критерию Стьюдента, различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Результаты исследований в таблицах представлены в формате «Среднее значение \pm стандартная ошибка среднего» (Mean \pm SEM).

Последовательности праймеров для анализа микроорганизмов

Table 1

Primer sequences for microbial analysis

Микроорганизм	Последовательности праймеров
<i>Lactobacillus</i> sp.	5'- AGCAGTAGGGAATCTTCCA-3' 5'-CACCGCTACACATGGAG-3'
<i>Bifidobacterium</i> sp.	5- CTCCTGGAACGGGTGG –3 5- GGTGTTCTTCCCGATATCTACA –3
<i>Streptococcus</i> sp.	5'-ATTTCTGTAACAGCTACCAACGA-3' 5'-GAATTCCTGTCTTTTCAAAGTC-3'
<i>Bacteroides</i> sp.	5'-GAGAGGAAGGTCCCCCAC-3' 5'-CGCTACTTGGCTGGTTCAG-3'
<i>Faecalibacterium prausnitzii</i>	5- CCATGAATTGCCTTCAAACTGTT –3 5- GAGCCTCAGCGTCAGTTGGT –3
<i>Acinetobacter</i> sp.	5'-TCTTGGTGGTCACTTGAAGC-3' 5'-ACTCTGTGGTTGTGGAGCA-3'
<i>Enterobacter</i> sp.	5'-CATTGACGTTACCCGCAGAAGAAGC –3' 5'-CTCTACGAGACTCAAGCTTGC-3'
<i>Escherichia coli</i>	5'-TGATTGGCAAAATCTGGCCG-3' 5'-GAAATCGCCCAAATCGCCAT-3'
<i>Klebsiella</i> sp.	5'-TGCTACTGTATCGCCGTC-3' 5'- CTCAGTGCTCTACAGAAAACC-3'
<i>Citrobacter</i> sp.	5'-CTC ACG CCC TGG CAA GGT TT-3' 5'-CTT TTG CCC TAG CTG CGG T-3'
<i>Proteus vulgaris/mirabilis</i>	5'-ACTACCCATCAGATTATGTCAT-3' 5'-CTGTTTGAGGAAAATGCAATTTA-3'

Результаты и их обсуждение**Results and discussion**

В наших исследованиях была поставлена цель изучения влияния бактериальных штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* на структуру микробного сообщества готового силоса.

Результаты анализа биохимических показателей качества готового силоса из злаково-бобовой растительной массы на 30-е сутки после хранения в анаэробных условиях представлены в таблице 2. Было установлено, что использование бактериальных штаммов приводило к повышению ряда показателей качества силоса по сравнению с контрольным образцом без консервантов.

Таблица 2

**Результаты оценки показателей качества силоса из злаково-бобовой смеси
на 30-е сутки при использовании бактериальных штаммов**

Table 2

**Results of the evaluation of silage quality parameters
from grass-legume mixture on the 30th day using bacterial strains**

Показатель	Контроль	<i>Enterococcus faecium</i> 46	<i>Enterococcus faecium</i> 46 и <i>Bacillus subtilis</i> 18
pH	4,37±0,03 ^a	4,58±0,04 ^b	4,45±0,01 ^c
Обменная энергия, МДж/кг	8,98±0,04 ^a	8,92±0,51 ^a	9,00±0,20 ^a
Массовая доля сухого вещества, %	22,61±0,45 ^a	21,32±0,52 ^a	26,05±0,07 ^b
Массовая доля сырого протеина, %	16,90±0,40 ^a	16,34±0,34 ^a	16,27±0,47 ^a
Массовая доля сырого жира, %	4,11±0,04 ^a	4,08±0,06 ^a	3,92±0,13 ^a
Массовая доля сырой клетчатки, %	31,4±0,98 ^a	31,5±1,61 ^a	30,4±0,62 ^a
Кисотно-детергентная клетчатка, %	36,7±0,70 ^a	35,7±0,47 ^a	35,0±1,51 ^a
Нейтрально-детергентная клетчатка, %	59,7±0,92 ^a	60,6±1,26 ^a	56,2±0,48 ^b
Массовая доля молочной кислоты в общем количестве кислот, %	68,61±0,87 ^a	68,60±0,64 ^a	72,42±0,80 ^b
Массовая доля молочной кислоты, %	1,92±0,07 ^a	1,64±0,09 ^a	2,46±0,14 ^b
Массовая доля масляной кислоты, %	0±0,01 ^a	0,04±0,02 ^a	0,04±0,01 ^a
Массовая доля уксусной кислоты, %	0,88±0,04 ^a	0,71±0,03 ^b	0,90±0,06 ^a

Примечание. Значения а-с для показателей указывают на достоверные отличия между вариантами при $p \leq 0,05$.

Установлено, что наибольшие показатели обменной энергии и сухого вещества ($p \leq 0,05$) были достигнуты при использовании для консервирования кормов композиции штаммов бактерий *Enterococcus faecium* 46 и *Bacillus subtilis* 18. Известно, что на питательность силоса могут оказывать влияние следующие факторы: вид используемых растений, фаза уборки, период и сроки заготовки, сезонные и погодные условия, применение минеральной подкормки. В наших исследованиях применение смеси бактериальных штаммов в ходе процессов ферментации при консервировании кормов, очевидно, способствовало наилучшей сохранности сухого вещества, количество которого превышало данный показатель на 15,3–22,3% ($p \leq 0,05$) по сравнению с другими вариантами.

По содержанию сырого протеина, сырого жира, сырой клетчатки и КДК полученные корма достоверной разницы не имели. При этом применение для консервирования силоса композиции штаммов *Enterococcus faecium* 46 и *Bacillus subtilis* 18 приводило к достоверному снижению НДК (нейтрально-детергентной клетчатки) на 6,2% ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем, включающей в себя такие структурные компоненты

растительных клеток, как гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин. Снижение количества НДК в силосе может способствовать повышению его переваримости животными.

Известно, что процесс сохранения питательных веществ и энергии силоса основывается на быстром снижении pH в ходе ферментации. В течение 30 дней консервирования кормов при благоприятных условиях содержание молочной кислоты значительно нарастает, что свидетельствует о быстром и контролируемом процессе силосования.

В нашем эксперименте наиболее сильное подкисление корма было отмечено в варианте при использовании в качестве консервантов комплекса штаммов бактерий *Enterococcus faecium* 46 и *Bacillus subtilis* 18) и в контрольном варианте. Снижение pH силоса во время ферментации в основном связано с образованием органических кислот, прежде всего – молочной кислоты. Как показано в таблице 2, процентное отношение молочной кислоты в доле других кислоты было наиболее высоким в варианте 3 (смесь штаммов бактерий *Enterococcus faecium* 46 и *Bacillus subtilis* 18). Интересно, что в контрольном варианте и варианте с применением комплекса штаммов, где pH была наиболее низкой, количество уксусной кислоты достоверно (при $p \leq 0,05$) превышало показатели варианта с использованием штамма *Enterococcus faecium*.

Очевидно, наблюдаемое усиление синтеза молочной кислоты в силосе под влиянием композиции штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* способствовало заметному ускорению подкисления растительной массы, на что указывает достоверно более высокое сохранение питательных веществ в силосе, о чем свидетельствует количество в нем сухого вещества и обменной энергии.

С применением метода количественной ПЦР была изучена представленность в консервированном корме некоторых групп микроорганизмов (табл. 3). Судя по результатам исследований, применение используемых штаммов оказало различное влияние на состав микробиоты готового корма.

Основной группой микроорганизмов в силосе во всех вариантах были молочнокислые бактерии. В наших исследованиях лактобактерии рода *Lactobacillus* детектировались в количестве от $4,0 \times 10^{11} \pm 1,1 \times 10^{11}$ экв.геном/г (контроль) до $1,0 \times 10^{12} \pm 7,5 \times 10^{11}$ экв.геном/г (вариант со штаммом *Enterococcus faecium*) в силосе. Достоверного изменения количества лактобактерий между группами не выявлено, однако в опытных вариантах с применением бактериальных штаммов в качестве консервантов наблюдалось повышение представленности в готовых кормах бактерий данного рода в 1,5–2,5 раза по сравнению с контролем. Доминирование молочнокислых бактерий в фазы основного брожения и покоя при соблюдении технологии закладки и хранения растительного субстрата связано с их устойчивостью к уровню pH до 3,0–3,5, что делает их крайне конкурентоспособными в условиях силосной экосистемы.

Количество бифидобактерий, также способных к биосинтезу органических кислот, составляло от $6,2 \times 10^8 \pm 3,3 \times 10^7$ до $7,3 \times 10^8 \pm 4,0 \times 10^7$ экв.геном/г растительной массы и не имело достоверных отличий между вариантами. Представленность стрептококков рода *Streptococcus* sp. варьировала в зависимости от группы. В варианте без применения консервантов их численность составляла $4,2 \times 10^6 \pm 1,2 \times 10^5$, тогда как в остальных вариантах их количество было ниже (предела достоверного определения методов количественной ПЦР (ниже 10^3 экв.геном/г растительной массы)).

Также в образцах готового силоса были выявлены бактерии рода *Bacteroides*, которые относятся к нежелательным микроорганизмам в консервированных кормах, поскольку они могут снижать питательную ценность корма за счет гидролиза сложных макромолекулярных органических веществ – таких, как деградация углеводов, до моносахаридов. В наших исследованиях бактероиды были выявлены в низких количествах, достоверной разницы между вариантами не обнаружено. Наименьшая

представленность бактероидов выявлена в опытном варианте с *Enterococcus faecium* ($9,2 \times 10^7 \pm 2,1 \times 10^6$ экв.геном/г растительной массы).

В образцах силоса всех вариантов нами были детектированы различные представители семейства *Enterobacteriaceae*, в том числе *Enterobacter* sp., *Escherichia coli*, *Klebsiella* sp., *Citrobacter* sp., *Proteus vulgaris/mirabilis*. По современным представлениям, данные микроорганизмы являются основными компонентами эпифитной микробиоты растений и при неблагоприятных условиях консервирования кормов могут занимать доминирующее положение в составе микробиоты готового силоса. В наших исследованиях представленность различных таксонов семейства *Enterobacteriaceae* была невысокой во всех вариантах. В частности, наиболее представленной группой данного семейства были бактерии рода *Enterobacter*, количество которых варьировало в пределах $4,3 \times 10^7 \pm 1,6 \times 10^6$ до $1,6 \times 10^8 \pm 2,1 \times 10^7$ экв.геном/г растительной массы, и группа *Proteus vulgaris/mirabilis*, количество которых варьировало в пределах $7,4 \times 10^7 \pm 5,1 \times 10^6$ до $2,2 \times 10^8 \pm 4,1 \times 10^7$ экв.геном/г растительной массы в зависимости от образца. Наименее представленными в образцах готового силоса были бактерии вида *Escherichia coli* и *Klebsiella* sp.

Наименьшее количество *Escherichia coli*, *Klebsiella* sp. и *Citrobacter* sp. детектировано в варианте, где для консервирования растительной массы использовалась смесь штаммов *Enterococcus faecium* 46 и *Bacillus subtilis* 18.

Таблица 3

Количество бактерий в силосе из злаково-бобовой смеси на 30-е сутки при использовании бактериальных штаммов, экв.геном/г растительной массы

Table 3

Bacterial count in grass-legume silage on the 30th day using bacterial strains, genome equivalents/g of plant mass

Микроорганизм	Контроль	<i>Enterococcus faecium</i> 46	<i>Enterococcus faecium</i> 46 и <i>Bacillus subtilis</i> 18
<i>Lactobacillus</i> sp.	$4,0 \times 10^{11} \pm 1,1 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{12} \pm 7,5 \times 10^{11}$	$6,2 \times 10^{11} \pm 9,1 \times 10^{10}$
<i>Bifidobacterium</i> sp.	$7,1 \times 10^8 \pm 4,3 \times 10^7$	$6,2 \times 10^8 \pm 3,3 \times 10^7$	$7,3 \times 10^8 \pm 4,0 \times 10^7$
<i>Streptococcus</i> spp.	$4,2 \times 10^6 \pm 1,2 \times 10^5$	—	—
<i>Bacteroides</i> sp.	$9,4 \times 10^7 \pm 2,0 \times 10^6$	$9,2 \times 10^7 \pm 2,1 \times 10^6$	$1,3 \times 10^8 \pm 2,2 \times 10^7$
<i>Faecalibacterium prausnitzii</i>	$4,2 \times 10^5 \pm 3,9 \times 10^4$	—	$1,1 \times 10^6 \pm 6,4 \times 10^4$
<i>Acinetobacter</i> spp.	$6,1 \times 10^9 \pm 8,7 \times 10^7$	$7,4 \times 10^9 \pm 1,4 \times 10^8$	$6,6 \times 10^9 \pm 2,0 \times 10^8$
<i>Enterobacter</i> spp.	$4,3 \times 10^7 \pm 1,6 \times 10^6$	$1,6 \times 10^8 \pm 2,1 \times 10^7$	$6,1 \times 10^7 \pm 3,1 \times 10^6$
<i>Escherichia coli</i>	$7,3 \times 10^6 \pm 2,4 \times 10^5$	$2,0 \times 10^7 \pm 4,2 \times 10^6$	$6,2 \times 10^6 \pm 8,8 \times 10^4$
<i>Klebsiella</i> sp.	$3,3 \times 10^6 \pm 1,8 \times 10^5$	$7,1 \times 10^6 \pm 1,7 \times 10^5$	$1,0 \times 10^6 \pm 9,1 \times 10^4$
<i>Citrobacter</i> sp.	$2,1 \times 10^7 \pm 7,5 \times 10^5$	$7,0 \times 10^7 \pm 3,2 \times 10^6$	$2,1 \times 10^7 \pm 6,8 \times 10^5$
<i>Proteus vulgaris/mirabilis</i>	$7,4 \times 10^7 \pm 5,1 \times 10^6$	$2,2 \times 10^8 \pm 4,1 \times 10^7$	$1,0 \times 10^8 \pm 4,2 \times 10^7$

Силосование является сложным микробиологическим процессом, на который влияет эпифитная микрофлора, присутствующая на кормовых культурах в ходе вегетации. В составе эпифитной микробиоты и микрофлоры силоса обитает около 300–600 видов бактерий [5, 12]. Так, на надземных органах кормовых культур, выявляются, в частности, патогенные микроорганизмы, а ведущую роль играют молочнокислые бактерии, которые синтезируют молочную кислоту в качестве основного метаболита, тем самым подкисляя силос до необходимого уровня pH и предотвращая развитие нежелательной микрофлоры, которая снижает качество силоса. Состав и количественное соотношение микроорганизмов в процессе ферментации силосного субстрата значительно отличаются от микробиоты кормового травостоя в период вегетации. Это связано с тем, что резкая смена значений сукцессионных агентов (окислительно-восстановительного потенциала, температуры, влажности, уровня pH, порой достигающего экстремальных величин, и др.) определяет уникальность таксономического разнообразия микробиоценоза, крайне гетерогенного и динамичного. При этом силосная экосистема является искусственно созданной, непрерывно изменяющейся и подвергающейся антропогенному прессу, что делает ее уникальной микробиоэкологической нишей. Для нее характерны весьма сложные внутренние связи и специфические закономерности динамики.

Таким образом, выполняя анализ бактерий с использованием культуральных методов, можно узнать о присутствии основных видов микроорганизмов (бактерий, грибов, дрожжей), влияющих на процесс силосования [5].

Качество силоса является результатом деятельности микробного сообщества, участвующего на всех этапах ферментации, а также их метаболитов [14]. Процесс ферментации определяет качество и количество заготовленного корма. Сбор силосованных кормов при надлежащей влажности и стадии зрелости, быстрое заполнение, правильная упаковка и покрытие силоса напрямую влияют на процесс ферментации. Среди других важных факторов, которые оказывают влияние на качество ферментации, – влажность исходного сырья и содержание в нем растворимых углеводов [15]. При высокой исходной влажности растительного сырья при силосовании может стимулироваться рост нежелательных и патогенных микроорганизмов, что снижает качество силоса [16].

В данных исследованиях с использованием молекулярно-генетического анализа количественной ПЦР нами был изучен состав микроорганизмов при силосовании злаково-бобовой смеси под воздействием бактериальных штаммов – консервантов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis*. Интересно, что показатели pH готового силоса на 30-е сутки хранения несколько превышали показатель контрольного варианта, где не использовали бактериальных штаммов в качестве биоконсервантов. Однако применение композиции штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* для консервирования растительной массы способствовало образованию достоверно ($p \leq 0,05$) более высокой процентной доли молочной кислоты. Полученные данные свидетельствуют об оптимизации процессов брожения при консервировании корма под действием препаратов, что обеспечивало достоверное ($p \leq 0,05$) повышение сохранности сухого вещества по сравнению с контролем. Одновременно в данном опытным варианте нами отмечено достоверно меньшее количество НДК ($p \leq 0,05$) по сравнению с другими вариантами. Нейтрально-детергентная клетчатка состоит из фракций целлюлозы и гемицеллюлозы, связанных с лигнином, что препятствует их ферментации в рубце [17]. Сообщалось, что снижение содержания НДК в рационе может оказывать позитивное влияние на усвоение энергии коврами [18, 19].

Сохранение питательных веществ силоса при применении штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* в наших исследованиях могло быть обусловлено оптимизацией процессов ферментации в ходе консервирования, связанных с образованием в силосе более высокого количества молочной кислоты при снижении представленности других – уксусной и масляной. Известно, что молочная кислота, доля которой достигала максимального количества при использовании для силосования корма композиции штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis*, подавляет размножение нежелательных микроорганизмов.

Основной группой микроорганизмов во всех образцах готового корма были бактерии рода *Lactobacillus*, которые являются продуцентами молочной кислоты. Доминирование молочнокислых бактерий в фазы основного брожения и покая при соблюдении технологии закладки и хранения растительного субстрата связано с их устойчивостью к уровню pH до 3,0–3,5, что делает их крайне конкурентоспособными в условиях силосной экосистемы. Доминирование *Lactobacillus* желательны во время ферментации силоса, поскольку оно связано с увеличением концентрации молочной кислоты при снижении pH [20, 21]. Например, показано, что бактерии *Lactobacillus plantarum* играют решающую роль в улучшении ферментации на ранних стадиях силосования, поскольку они синтезируют молочную кислоту. Это приводит к снижению pH, подавлению роста нежелательных микроорганизмов и предотвращению дальнейшего разложения сахаров и белков в силосе [22]. Другой вид молочнокислых бактерий – *Lactobacillus brevis* – является облигатным гетероферментативным видом, который синтезирует высокое содержание уксусной кислоты, что может улучшить аэробную стабильность силоса и предотвратить ухудшение, вызванное нежелательными микроорганизмами [23]. Хорошо известно, что на поздних стадиях силосования *Lactobacillus* играет важную роль в увеличении содержания молочной кислоты и снижении значения pH [24].

В наших исследованиях количество лактобактерий в микробиоте силоса было высоким и достигало значений $1,0 \times 10^{12} \pm 7,5 \times 10^{11}$ экв.геном/г растительной массы. Максимальное количество данных микроорганизмов выявлено в опытных вариантах, где для консервирования использовали бактериальные штаммы. Это свидетельствует о высоком благоприятном фоне подкисления для их развития.

Высокое количество молочнокислых бактерий часто ассоциируется с высококачественной ферментацией силоса, тогда как другие микроорганизмы – такие, как кишечные бактерии, клостридии, дрожжи и плесень, нежелательны. Большинство бактерий, участвующих в молочнокислой ферментации силоса, относятся к родам *Lactobacillus*, *Pedococcus*, *Weissella* и *Leuconostoc* [25].

В исследованном нами готовом силосе детектированы бактерии родов *Streptococcus* и *Bifidobacterium*. Бифидобактерии хорошо известны как важный кишечный пробиотик для людей и животных. Род *Bifidobacterium* обладает уникальным путем фруктозо-6-фосфатной фосфокетолазы, используемым для ферментации углеводов в уксусную и молочную кислоту [26].

Неблагоприятные условия для роста молочнокислых бактерий в силосе могут привести к недостаточному снижению pH в растительной матрице, и, как следствие, эффективность ингибирования патогенной микрофлоры может быть ограничена [27]. После начальной фазы подкисления растительного материала происходит интенсивный рост относительно аэробных или анаэробных бактерий, и этот процесс называется вторичной ферментацией. Основными микроорганизмами, ответственными за процессы вторичной ферментации в силосе, являются бактерии семейства *Enterobacteriaceae* (энтеробактерии) и рода *Clostridium* [28].

Вторыми по количеству в микробном сообществе силоса всех исследованных нами вариантов были бактерии рода *Acinetobacter*. Ogunade et al. (2017) [27] обнаружили присутствие *Acinetobacter* в силосе после 120 дней и предположили, что повышенное относительное обилие *Acinetobacter* может быть связано с повышенной концентрацией уксусной кислоты. Было показано, что некоторые *Acinetobacter* могут выживать, когда в окружающей среде достаточно ацетата [29]. *Acinetobacter* sp. был наиболее основным видом бактерий в силосе из кукурузы [30]. В исследовании (Kesry) и др. (2018) [31] определили *Acinetobacter* как второй по количеству таксон в силосе из цельного растения кукурузы после 5-дневного аэробного воздействия после бактерий рода *Lactobacillus*. Это согласуется с выводами Liu и др. [32], которые обнаружили *Acinetobacter* в качестве доминирующих микроорганизмов в силосе из ячменя с высоким pH после 5 и 7 дней аэробного воздействия.

Представители рода *Bacteroidetes*, выявленные в образцах готового корма в наших исследованиях, как известно, отрицательно коррелируют с показателями питательности, поскольку разрушают растительные полисахариды до моносахаридов [33].

Энтеробактерии также являются важным показателем качества в силосовании. В наших исследованиях в образцах силоса всех вариантов нами были детектированы различные представители семейства *Enterobacteriaceae*, в том числе *Enterobacter spp.*, *Escherichia coli*, *Klebsiella sp.*, *Citrobacter sp.*, *Proteus vulgaris/mirabilis*. Наименьшее количество *Escherichia coli*, *Klebsiella sp.* *Citrobacter sp.* детектировано в образце, где для консервирования растительной массы использовалась смесь штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis*. Очевидно, меньшее содержание данных микроорганизмов в силосе связано с более высоким детектированным показателями молочной кислоты и сухого вещества в данном образце.

Известно, что грамотрицательные бактерии семейства *Enterobacteriaceae* широко распространены в природе, в том числе на растениях. Штаммы, выделенные из травы, относились в основном к группе *Erwinia herbicola*, выделенные из силоса – к *Escherichia coli*, *Hafnia alvei* и *Klebsiella pneumoniae*. Виды *Enterobacter* составляют эндогенную флору пищеварительного тракта до 80% здоровой популяции людей. Эти условно-патогенные микроорганизмы, как правило, не способны вызывать патогенные изменения у людей, животных или у растений. Основным конечным продуктом ферментации этого рода является уксусная кислота. Исключением являются бактерии, продуцирующие эндотоксины, которые вызывают мастит [34]. Бактерии семейства *Enterobacteriaceae* вызывают декарбоксилирование и дезаминирование аминокислот и способны использовать соединения азота в качестве источника энергии в процессах дыхания. Оптимальный pH для их роста составляет от 6,0 до 7,0. Большинство штаммов не могут расти при pH ниже 4,5 [34]. В консервированных кормах при благоприятных условиях, обеспечивающих быстрое подкисление, энтеробактерии развиваются только в первой фазе первичной ферментации, когда концентрация ионов водорода не слишком высока.

Выводы Conclusions

Вопросы сохранения качества ферментируемых кормов вызывают широкий интерес у специалистов. Исходя из полученных результатов нами в условиях модельного лабораторного эксперимента получены позитивные доказательства использования бактериальных штаммов *Enterococcus faecium* 46 и *Bacillus subtilis* 18 при заготовке

консервируемого силоса из злаково-бобовой смеси. Наилучшие результаты были продемонстрированы для силоса при использовании комплекса штаммов, где на 30-е сутки после начала эксперимента выявлено наибольшее количество сухого вещества в доле молочной кислоты в сумме кислот, и меньшее количество НДК. При анализе бактериального сообщества доминирующими по количеству были бактерии рода *Lactobacillus*. В обоих опытных вариантах с использованием бактериальных штаммов для консервирования отмечено повышение количества лактобактерий. В варианте при использовании композиции штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* было детектировано наименьшее количество энтеробактерий, в том числе *Escherichia coli*, *Klebsiella* sp. и *Citrobacter* sp.

Таким образом, использование бактериальных штаммов *Enterococcus faecium* и *Bacillus subtilis* при консервировании злаково-бобовой смеси позволило затормозить в кормах развитие гнилостных и патогенных токсинообразующих бактерий благодаря усиленному синтезу молочной кислоты. Соответственно применение данных штаммов в качестве заквасок для силосования, вероятно, способно увеличивать срок аэробной стабильности, поскольку обладает высоким антимикробным действием против тех видов микроорганизмов, которые отвечают за порчу корма при выемке.

Список источников

1. Pakarinen P., Majjala S., Jaakkola F.L., Stoddard M. et al. Evaluation of Preservation Methods for Improving Biogas Production and Enzymatic Conversion Yields of Annual Crops. *Biotechnology for Biofuels*. 2011;4:20. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-20>
2. Dong Z.H., Li J.F., Wang S.R., Zhao J. et al. Gamma-ray Irradiation and Microbiota Transplantation to Separate the Effects of Chemical and Microbial Diurnal Variations on the Fermentation Characteristics and Bacterial Community of Napier Grass Silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022;102:4322-4332. <https://doi.org/10.1002/JSFA.11784>
3. Xu Z.S., He H.Y., Zhang S.S., Kong J. Effects of Inoculants *Lactobacillus brevis* and *Lactobacillus parafarraginis* on the Fermentation Characteristics and Microbial Communities of Corn Stover Silage. *Scientific Reports*. 2017;7:13614. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14052-1>
4. Pedroso A.F., Adesogan A.T., Queiroz O.C., Williams S.K. Control of *Escherichia coli* O157: H7 in Corn Silage with or Without Various Inoculants: Efficacy and Mode of Action. *Journal of Dairy Science*. 2010;93(3):1098-1104. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2433>
5. Driehuis F., Wilkinson J.M., Jiang Y. Silage review: Animal and Human Health Risks from Silage. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(5):4093-4110. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13836>
6. Ogunade M., Jiang Y., Kim D.H., Cervantes A.A.P. et al. Fate of *Escherichia coli* O157: H7 and Bacterial Diversity in Corn Silage Contaminated with the Pathogen and Treated with Chemical or Microbial Additives. *Journal of Dairy Science*. 2017;100:1780-1794. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11745>
7. Russell J.B., Diez-Gonzalez F., Jarvis G.N. Potential Effects of Cattle Diets on the Transmission of Pathogenic *Escherichia coli* to Humans. *Microbes and Infection*. 2000;2(10717540):45-53. [https://doi.org/10.1016/s1286-4579\(00\)00286-0](https://doi.org/10.1016/s1286-4579(00)00286-0)
8. Chapman P.A., Siddons C.A., Cerdan Malo A.T., Harkin M.A.A. 1-year Study of *Escherichia coli* O157 in Cattle, Sheep, Pigs and Poultry. *Epidemiology and Infection*. 1997;119(9363024):245-250. <https://doi.org/10.1017/s0950268897007826>

9. Queiroz O.C.M., Ogunade I.M., Weinberg Z., Adesogan A.T. Silage Review: Foodborne Pathogens in Silage and Their Mitigation by Silage Additives. *Journal of Dairy Science*. 2018;101:4132-4142. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13901>
10. Vissers M.M., Driehuis F., Te Giffel M.C., De Jong P. et al. Short communication: Quantification of the Transmission of Microorganisms to Milk via Dirt Attached to the Exterior of Teats. *Journal of Dairy Science*. 2007;90(8):3579-82. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-633>
11. Pahlow G., Muck R.E., Driehuis F., Elferink S.J.W.H.O. et al. Microbiology of Ensiling. In: *Silage science and technology*. Madison, USA: American Society of Agronomy, Inc., 2003.
12. Hu W., Schmidt R.J., McDonnell E.E., Klingerman C.M. The Effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 or *Lactobacillus plantarum* MTD-1 on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silages Ensiled at Two Dry Matter Contents. *Journal of Dairy Science*. 2009;92:3907-3914. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1788>
13. Косолапов В.М., Чуйков В.А., Худякова Х.К., Косолапова В.Г. *Физико-химические методы анализа кормов*. Москва: Типография Россельхозакадемии, 2014. 344 с.
14. Ávila C.L.S., Carvalho B.F. Silage Fermentation-updates Focusing on the Performance of Microorganisms. *Journal of Applied Microbiology*. 2020;128(4):966-984. <https://doi.org/10.1111/jam.14450>
15. Borreani G., Tabacco E., Schmidt R.J., Holmes B.J. et al. Silage Review: Factors Affecting Dry Matter and Quality Losses in Silages. *Journal of Dairy Science*. 2018;101:3952-3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>
16. Zhang Y.C., Li D.X., Wang X.K., Lin Y.L. et al. Fermentation Dynamics and Diversity of Bacterial Community in Four Typical Woody Forages. *Annals of Microbiology*. 2019;69:233-240. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1398-z>
17. Huhtanen P., Rinne M., Nousiainen J. Evaluation of the Factors Affecting Silage Intake of Dairy Cows; A Revision of the Relative Silage Dry Matter Intake Index. *Animal*. 2007;1:758-770. <https://doi.org/10.1017/S175173110773673X>
18. Fustini M., Palmonari A., Canestrari G., Bonfante E. et al. Effect of Undigested Neutral Detergent Fiber Content of Alfalfa Hay on Lactating Dairy Cows: Feeding Behavior, Fiber Digestibility, and Lactation Performance. *Journal of Dairy Science*. 2017;100:4475-4483. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12266>
19. Miller M.D., Kokko C., Ballard C.S., Dann H.M. et al. Influence of Fiber Degradability of Corn Silage in Diets with Lower and Higher Fiber Content on Lactational Performance, Nutrient Digestibility, and Ruminal Characteristics in Lactating Holstein Cows. *Journal of Dairy Science*. 2021;104:1728-1743. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19088>
20. Li L., Sun Y., Yuan Z. Effect of Microalgae Supplementation on the Silage Quality and Anaerobic Digestion Performance of Manyflower Silvergrass. *Bioresource Technology*. 2015;189:334-40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.029>
21. Li M., Zi X., Zhou H., Hou G. et al. Effects of Sucrose, Glucose, Molasses and Cellulase on Fermentation Quality and in Vitro Gas Production of King Grass Silage. *Animal Feed Science and Technology*. 2014;197:206-212. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.06.016>
22. Yan Y.H., Li X.M., Guan H., Huang L.K. Microbial Community and Fermentation Characteristic of Italian Ryegrass Silage Prepared with Corn Stover and Lactic Acid Bacteria. *Bioresource Technology*. 2019;279:166-173. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.107>
23. Guo T.T., Zhang L., Xin Y.P., Xu Z.S. et al. Oxygen-inducible Conversion of Lactate to Acetate in Heterofermentative *Lactobacillus brevis* ATCC367. *Applied and Environmental Microbiology*. 2017;83: e01659-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.01659-17>
24. Cai Y.M., Benno Y., Ogawa M., Ohmomo S. et al. Influence of *Lactobacillus* spp. from an Inoculant and of *Weissella* and *Leuconostoc* spp. from Forage Crops

- on Silage Fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*. 1998;64:2982-2987. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.8.2982-2987.1998>
25. Ni K.K., Zhao J.Y., Zhu B.G., Su R.N. et al. Assessing the Fermentation Quality and Microbial Community of the Mixed Silage of Forage Soybean with CROP Corn or Sorghum. *Bioresource Technology*. 2018;265:563-567. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.097>
 26. Grill J.P., Crociani J., Ballongue J. Characterization of Fructose 6 phosphate Phosphoketolases Purified from *Bifidobacterium* Species. *Current Microbiology*. 1995;31:49-54. <https://doi.org/10.1007/BF00294634>
 27. Ogunade M. Silage Review: Mycotoxins in silage: Occurrence, Effects, Prevention, and Mitigation. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(5):4034-4059. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13788>
 28. Lindgren Ö.S. Influences of Enterobacteria on the Fermentation and Aerobic Stability of Grass Silages. *Grass and Forage Science*. 1995;50:41-47. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1995.tb02292.x>
 29. Fuhs G.W., Chen M. Microbiological Basis of Phosphate Removal in the Activated Sludge Process for the Treatment of Wastewater. *Microbial Ecology*. 1975;2:119-138. <https://doi.org/10.1007/BF02010434>
 30. Bai C., Wang L., Sun H., Xu Y. et al. Dynamics of Bacterial and Fungal Communities and Metabolites During Aerobic Exposure in Whole-plant Corn Silages with Two Different Moisture Levels. *Frontiers in Microbiology*. 2021;12:663895. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.663895>
 31. Keshri J., Chen Y., Pinto R., Kroupitski Y. et al. Microbiome Dynamics During Ensiling of Corn With and Without *Lactobacillus plantarum* Inoculant. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018;102:4025-4037. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8903-y>
 32. Liu B., Huan H., Gu H., Xu N. et al. Dynamics of a Microbial Community During Ensiling and Upon Aerobic Exposure in Lactic Acid Bacteria Inoculation-treated and Untreated Barley Silages. *Bioresource Technology*. 2019;273:212-219. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.041>
 33. Yue Z.B., Chen R., Yang F., James M. et al. Effects of Dairy Manure and Corn Stover Co-digestion on Anaerobic Microbes and Corresponding Digestion Performance. *Bioresource Technology*. 2013;128:65-71. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.115>
 34. Li Y., Nishino N. Effects of Inoculation of *Lactobacillus rhamnosus* and *Lactobacillus buchneri* on Fermentation, Aerobic Stability and Microbial Communities in Whole Crop Corn Silage. *Grass and Forage Science*. 2011;57:184-191. <https://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2011.00226.x>

References

1. Pakarinen P., Majjala S., Jaakkola F.L., Stoddard M. et al. Evaluation of Preservation Methods for Improving Biogas Production and Enzymatic Conversion Yields of Annual Crops. *Biotechnology for Biofuels*. 2011;4:20. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-20>
2. Dong Z.H., Li J.F., Wang S.R., Zhao J. et al. Gamma-ray Irradiation and Microbiota Transplantation to Separate the Effects of Chemical and Microbial Diurnal Variations on the Fermentation Characteristics and Bacterial Community of Napier Grass Silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022;102:4322-4332. <https://doi.org/10.1002/JSFA.11784>
3. Xu Z.S., He H.Y., Zhang S.S., Kong J. Effects of Inoculants *Lactobacillus brevis* and *Lactobacillus parafarraginis* on the Fermentation Characteristics and

- Microbial Communities of Corn Stover Silage. *Scientific Reports*. 2017;7:13614. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14052-1>
4. Pedroso A.F., Adesogan A.T., Queiroz O.C., Williams S.K. Control of *Escherichia coli* O157: H7 in Corn Silage with or Without Various Inoculants: Efficacy and Mode of Action. *Journal of Dairy Science*. 2010;93(3):1098-1104. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2433>
 5. Driehuis F., Wilkinson J.M., Jiang Y. Silage review: Animal and Human Health Risks from Silage. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(5):4093-4110. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13836>
 6. Ogunade M., Jiang Y., Kim D.H., Cervantes A.A.P. et al. Fate of *Escherichia coli* O157: H7 and Bacterial Diversity in Corn Silage Contaminated with the Pathogen and Treated with Chemical or Microbial Additives. *Journal of Dairy Science*. 2017;100:1780-1794. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11745>
 7. Russell J.B., Diez-Gonzalez F., Jarvis G.N. Potential Effects of Cattle Diets on the Transmission of Pathogenic *Escherichia coli* to Humans. *Microbes and Infection*. 2000;2(10717540):45-53. [https://doi.org/10.1016/s1286-4579\(00\)00286-0](https://doi.org/10.1016/s1286-4579(00)00286-0)
 8. Chapman P.A., Siddons C.A., Cerdan Malo A.T., Harkin M.A.A. 1-year Study of *Escherichia coli* O157 in Cattle, Sheep, Pigs and Poultry. *Epidemiology and Infection*. 1997;119(9363024):245-250. <https://doi.org/10.1017/s0950268897007826>
 9. Queiroz O.C.M., Ogunade I.M., Weinberg Z., Adesogan A.T. Silage Review: Foodborne Pathogens in Silage and Their Mitigation by Silage Additives. *Journal of Dairy Science*. 2018;101:4132-4142. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13901>
 10. Vissers M.M., Driehuis F., Te Giffel M.C., De Jong P. et al. Short communication: Quantification of the Transmission of Microorganisms to Milk via Dirt Attached to the Exterior of Teats. *Journal of Dairy Science*. 2007;90(8):3579-82. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-633>
 11. Pahlow G., Muck R.E., Driehuis F., Elferink S.J.W.H.O. et al. Microbiology of Ensiling. In: *Silage science and technology*. Madison, USA: American Society of Agronomy, Inc., 2003.
 12. Hu W., Schmidt R.J., McDonnell E.E., Klingerman C.M. The Effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 or *Lactobacillus plantarum* MTD-1 on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silages Ensiled at Two Dry Matter Contents. *Journal of Dairy Science*. 2009;92:3907-3914. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1788>
 13. Kosolapov V.M., Chuikov V.A., Khudyakova Kh.K., Kosolapova V.G. *Physicochemical methods of feed analysis*. Moscow, Russia: Tipografiya Rosselkhozakademii, 2014:344. (In Russ.)
 14. Ávila C.L.S., Carvalho B.F. Silage Fermentation-updates Focusing on the Performance of Microorganisms. *Journal of Applied Microbiology*. 2020;128(4):966-984. <https://doi.org/10.1111/jam.14450>
 15. Borreani G., Tabacco E., Schmidt R.J., Holmes B.J. et al. Silage Review: Factors Affecting Dry Matter and Quality Losses in Silages. *Journal of Dairy Science*. 2018;101:3952-3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>
 16. Zhang Y.C., Li D.X., Wang X.K., Lin Y.L. et al. Fermentation Dynamics and Diversity of Bacterial Community in Four Typical Woody Forages. *Annals of Microbiology*. 2019;69:233-240. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1398-z>
 17. Huhtanen P., Rinne M., Nousiainen J. Evaluation of the Factors Affecting Silage Intake of Dairy Cows; A Revision of the Relative Silage Dry Matter Intake Index. *Animal*. 2007;1:758-770. <https://doi.org/10.1017/S175173110773673X>
 18. Fustini M., Palmonari A., Canestrari G., Bonfante E. et al. Effect of Undigested Neutral Detergent Fiber Content of Alfalfa Hay on Lactating Dairy Cows: Feeding

- Behavior, Fiber Digestibility, and Lactation Performance. *Journal of Dairy Science*. 2017;100:4475-4483. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12266>
19. Miller M.D., Kokko C., Ballard C.S., Dann H.M. et al. Influence of Fiber Degradability of Corn Silage in Diets with Lower and Higher Fiber Content on Lactational Performance, Nutrient Digestibility, and Ruminal Characteristics in Lactating Holstein Cows. *Journal of Dairy Science*. 2021;104:1728-1743. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19088>
20. Li L., Sun Y., Yuan Z. Effect of Microalgae Supplementation on the Silage Quality and Anaerobic Digestion Performance of Manyflower Silvergrass. *Bioresource Technology*. 2015;189:334-40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.029>
21. Li M., Zi X., Zhou H., Hou G. et al. Effects of Sucrose, Glucose, Molasses and Cellulase on Fermentation Quality and in Vitro Gas Production of King Grass Silage. *Animal Feed Science and Technology*. 2014;197:206-212. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.06.016>
22. Yan Y.H., Li X.M., Guan H., Huang L.K. Microbial Community and Fermentation Characteristic of Italian Ryegrass Silage Prepared with Corn Stover and Lactic Acid Bacteria. *Bioresource Technology*. 2019;279:166-173. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.107>
23. Guo T.T., Zhang L., Xin Y.P., Xu Z.S. et al. Oxygen-inducible Conversion of Lactate to Acetate in Heterofermentative *Lactobacillus brevis* ATCC367. *Applied and Environmental Microbiology*. 2017;83: e01659-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.01659-17>
24. Cai Y.M., Benno Y., Ogawa M., Ohmomo S. et al. Influence of *Lactobacillus* spp. from an Inoculant and of *Weissella* and *Leuconostoc* spp. from Forage Crops on Silage Fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*. 1998;64:2982-2987. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.8.2982-2987.1998>
25. Ni K.K., Zhao J.Y., Zhu B.G., Su R.N. et al. Assessing the Fermentation Quality and Microbial Community of the Mixed Silage of Forage Soybean with CROP Corn or Sorghum. *Bioresource Technology*. 2018;265:563-567. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.097>
26. Grill J.P., Crociani J., Ballongue J. Characterization of Fructose 6 phosphate Phosphoketolases Purified from *Bifidobacterium* Species. *Current Microbiology*. 1995;31:49-54. <https://doi.org/10.1007/BF00294634>
27. Ogunade M. Silage Review: Mycotoxins in silage: Occurrence, Effects, Prevention, and Mitigation. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(5):4034-4059. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13788>
28. Lindgren Ö.S. Influences of Enterobacteria on the Fermentation and Aerobic Stability of Grass Silages. *Grass and Forage Science*. 1995;50:41-47. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1995.tb02292.x>
29. Fuhs G.W., Chen M. Microbiological Basis of Phosphate Removal in the Activated Sludge Process for the Treatment of Wastewater. *Microbial Ecology*. 1975;2:119-138. <https://doi.org/10.1007/BF02010434>
30. Bai C., Wang L., Sun H., Xu Y. et al. Dynamics of Bacterial and Fungal Communities and Metabolites During Aerobic Exposure in Whole-plant Corn Silages with Two Different Moisture Levels. *Frontiers in Microbiology*. 2021;12:663895. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.663895>
31. Keshri J., Chen Y., Pinto R., Kroupitski Y. et al. Microbiome Dynamics During Ensiling of Corn With and Without *Lactobacillus plantarum* Inoculant. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018;102:4025-4037. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8903-y>
32. Liu B., Huan H., Gu H., Xu N. et al. Dynamics of a Microbial Community During Ensiling and Upon Aerobic Exposure in Lactic Acid Bacteria Inoculation-treated and Untreated Barley Silages. *Bioresource Technology*. 2019;273:212-219. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.041>

33. Yue Z.B., Chen R., Yang F., James M. et al. Effects of Dairy Manure and Corn Stover Co-digestion on Anaerobic Microbes and Corresponding Digestion Performance. *Bioresource Technology*. 2013;128:65-71. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.115>

34. Li Y., Nishino N. Effects of Inoculation of *Lactobacillus rhamnosus* and *Lactobacillus buchneri* on Fermentation, Aerobic Stability and Microbial Communities in Whole Crop Corn Silage. *Grass and Forage Science*. 2011;57:184-191. <https://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2011.00226.x>

Сведения об авторах

Лариса Александровна Ильина, д-р биол. наук, профессор кафедры крупного животноводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, лит. А; начальник молекулярно-генетической лаборатории, Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»; 196602, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Малиновская, 8, лит. А; e-mail: ilina@biotrof.ru; <https://orcid.org/0000-0012-3588-4877>

Иван Григорьевич Малахов, аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, лит. А; e-mail: yo.vanya@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2357-5483>

Василий Александрович Заикин, биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории, Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»; 196602, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Малиновская, 8, лит. А; e-mail: dfcx@biotrof.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8029-9955>

Георгий Юрьевич Лаптев, д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры крупного животноводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, лит. А; директор, Общество с ограниченной ответственностью «БИОТРОФ»; 196602, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Малиновская, 8, лит. А; e-mail: georg-laptev@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8795-6659>

Виталий Юрьевич Морозов, д-р ветеринар. наук, профессор, ректор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, лит. А; e-mail: supermoroz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3688-1546>

Сергей Павлович Скляр, канд. ветеринар. наук, доцент, директор Института животноводства и аквакультуры имени В.И. Наумова, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, лит. А; e-mail: ssklyar@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-4184-7206>

Information about the authors

Larisa A. Ilina, DSc (Bio), Professor at the Department of Large Livestock Breeding, Saint-Petersburg State Agrarian University; 2A Peterburgskoe Highway, Pushkin, Saint

Petersburg, 196601, Russian Federation; Head of the Molecular Genetic Laboratory, BIOTROF, OOO; 8A Malinovskaya St., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation; e-mail: ilina@biotrof.ru; <https://orcid.org/0000-0012-3588-4877>

Ivan G. Malakhov, postgraduate student, Saint-Petersburg State Agrarian University; 2A Peterburgskoe Highway, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; e-mail: yo.vanya@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2357-5483>

Vasily A. Zaikin, Biotechnologist at the Molecular Genetics Laboratory, BIOTROF, OOO; 8A Malinovskaya St., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation; e-mail: dfcx@biotrof.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8029-9955>

Grigory Yu. Laptev, DSc (Bio), Associate Professor, Professor at the Department of Large Livestock Breeding, Saint-Petersburg State Agrarian University; 2A Peterburgskoe Highway, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; Director, BIOTROF, OOO; 8A Malinovskaya St., Pushkin, Saint Petersburg, 196602, Russian Federation; e-mail: georg-laptev@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8795-6659>

Vitaly Yu. Morozov, DSc (Vet), Professor, Rector, Saint-Petersburg State Agrarian University; 2A Peterburgskoe Highway, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; e-mail: supermoroz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3688-1546>

Sergey P. Sklyarov, CSc (Vet), Associate Professor, Director of the Institute of Animal Husbandry and Aquaculture named after V.I. Naumov, Saint-Petersburg State Agrarian University; 2A Peterburgskoe Highway, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation; e-mail: ssklyar@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-4184-7206>

ЗООТЕХНИКА, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

**Влияние гравитации, гормонов, функциональных нагрузок
на дифференцированный рост мускулов телок**

**Махар Магомедович Эртуев¹, Иван Петрович Прохоров²✉,
Григорий Сергеевич Шеховцев², Ольга Игнатьевна Соловьева²,
Ольга Алексеевна Калмыкова²**

¹Сочинский национальный парк, Сочи, Краснодарский край, Россия

²Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

✉ **Автор, ответственный за переписку:** iprohorov@rgau-msha.ru

Аннотация

Исследования посвящены изучению интенсивности роста мускулатуры в различных анатомических отделах туш у телок черно-пестрой породы и их помесей с герефордской и шаролеизской породами. Установлено, что рост мускулов отличается значительной вариабельностью, обусловленной функциональной нагрузкой, генетическими факторами и этапом онтогенеза. Наиболее интенсивный рост наблюдался в мускулатуре брюшной стенки, где масса мышечного комплекса к 18 месяцам увеличилась в 25,97 раза, что значительно превышает общие показатели роста мышечной массы туш (16,08). Это связано с повышенной функциональной нагрузкой, вызванной возрастным увеличением массы внутренних органов и развитием рубцового пищеварения. Мускулы, связывающие туловище с грудными конечностями, также демонстрировали высокие темпы роста, выполняя функции поддержания туловища, участия в локомоции и противодействия гравитационному притяжению. Крупные мускулы тазового пояса и области бедра – такие, как средний ягодичный и двуглавый бедра, отличались высокой мощностью и значительной абсолютной массой, обеспечивая распрямление тазовых конечностей и создание пропульсивного толчка. Сравнительный анализ показал, что мускулатура осевого отдела скелета (брюшная стенка, грудная клетка, позвоночный столб) росла с положительной аллометрией, в то время как периферическая мускулатура характеризовалась отрицательной аллометрией. К 18 месяцам относительная масса осевой мускулатуры достигла 51,87%, превысив показатель периферической (48,13%). Результаты работы подчеркивают важность учета функциональных и генетических особенностей роста мускулов для объективной оценки мясных качеств различных анатомических частей туш.

Ключевые слова

Мясная продуктивность, аллометрия роста, мышечные комплексы, онтогенез мускулатуры, телки, помеси, коэффициент роста

Для цитирования

Эртуев М.М., Прохоров И.П., Шеховцев Г.С., Соловьева О.И. и др. Влияние гравитации, гормонов, функциональных нагрузок на дифференцированный рост мускулов телок // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 192–208.

**Effect of gravity, hormones, and functional loads
on the differentiated muscle growth of heifers**

**Makhar M. Ertuev¹, Ivan P. Prokhorov²✉, Grigoriy S. Shekhovtsev², Olga I. Solovyova²,
Olga A. Kalmykova²**

¹Sochi National Park, Sochi, Krasnodar Krai, Russia

²Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉Corresponding author: iprohorov@rgau-msha.ru

Abstract

The present study investigates the intensity of muscle growth in various anatomical parts of carcasses in Black-and-White heifers and their crosses with Hereford and Charolais breeds. It was established that muscle growth exhibits significant variability, influenced by functional load, genetic factors, and the ontogenetic stage. The most intensive growth was observed in the abdominal musculature, where muscle mass increased by 25.97 times by 18 months of age, significantly exceeding the overall growth rate of carcass muscle mass (16.08). This is attributed to increased functional load, caused by the age-related increase in visceral organ mass and the development of ruminal digestion. Muscles connecting the trunk to the thoracic limbs also exhibited high growth rates, performing functions of trunk support, involvement in locomotion, and counteracting gravitational pull. Large muscles of the pelvic girdle and thigh area, such as the middle gluteus and biceps femoris, were characterized by high power and significant absolute mass, ensuring the extension of the pelvic limbs and generating propulsive thrust. Comparative analysis revealed that the musculature of the axial skeleton (abdominal wall, thoracic cage, vertebral column) grew with positive allometry, while peripheral musculature exhibited negative allometry. By 18 months of age, the relative mass of axial musculature reached 51.87%, exceeding that of peripheral musculature (48.13%). The findings highlight the importance of considering functional and genetic characteristics of muscle growth for an objective assessment of the meat quality of various anatomical parts of carcasses.

Keywords

Meat productivity, allometric growth, muscle complexes, musculature ontogenesis, heifers, cross-breeds, growth coefficient

For citation

Ertuev M.M., Prokhorov I.P., Shekhovtsev G.S., Solovyova O.I. et al. Effect of gravity, hormones, and functional loads on the differentiated muscle growth of heifers. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 192–208.

**Введение
Introduction**

Мышцы анатомических отделов туш, выполняющие локомоторные, дыхательные, поддерживающие функции, а также функции, направленные на преодоление гравитационного притяжения к земле, характеризуются значительной вариабельностью в скорости прироста, архитектонике и питательной ценности различных мышц. Вследствие этого анализ онтогенеза отдельных мышечных групп представляет научный

интерес для выявления взаимосвязи их функциональной нагрузки и особенностей роста, а также для объективной оценки мясных достоинств разных анатомических частей тела мясных животных.

Многие исследователи [1–14] при изучении роста и развития мышечной ткани мускулы группировали, как правило, по анатомическим отделам туш, полагая, что темпы роста мускулатуры анатомических частей тела можно рассматривать как интенсивность роста функциональных мышечных групп. При этом авторы исходили из того, что сравнительное изучение роста и развития мускулатуры в анатомических отделах туш является весьма важным, поскольку развитость в них мускулов и их питательная ценность в некоторой мере соответствуют сортовой разрубке полутуш, применяемой для продажи говядины в розничной торговле.

Вместе с тем важно подчеркнуть, что каждый мускул обладает уникальными характеристиками роста, так как увеличение его массы и размеров на различных стадиях индивидуального развития определяется функциональной нагрузкой и контролируется генетическими механизмами, регулирующими формирование организма.

Цель исследований: изучение специфики роста и развития мускулатуры различных анатомических отделов туш у телок черно-пестрой породы и ее помесей.

Методика исследований

Research method

Научно-хозяйственный эксперимент по оценке роста, развития и мясной продуктивности телок черно-пестрой породы и их помесей с герефордской и шаролежской породами был проведен на базе Тульского НИИСХ – филиала ФИЦ «Немчиновка». Для исследований методом пар-аналогов с учетом происхождения, возраста и живой массы при рождении были сформированы 3 группы животных по 15 гол. в каждой. Контрольную группу (1) составили чистопородные черно-пестрые телки, тогда во вторую и третью группы вошли помеси 1/2 кровности, полученные от скрещивания черно-пестрых коров с быками герефордской и шаролежской пород соответственно. Продолжительность опыта составляла период от рождения до достижения животными 18-месячного возраста.

Кормление подопытного молодняка было организовано по интенсивному типу и рассчитано на получение среднесуточных приростов на уровне 800–850 г, что позволяло достичь к 18 месяцам живой массы 450–500 кг. Содержание животных осуществлялось в условиях стойловой системы: до 6-месячного возраста – групповое, в последующий период – привязное. Контроль за ростом живой массы осуществляли путем ежемесячного взвешивания.

Для получения исходных данных в хозяйстве был проведен вынужденный убой по одной телке из каждой группы сразу после рождения. Последующие контрольные убои выполнялись на мощностях Тульского мясокомбината: в возрасте 6 и 12 месяцев – по 3 гол. из группы, а по окончании опыта – по 5 гол. от каждой группы. При этом определяли предубойную массу, массу парной туши и внутреннего жира, убойный выход, а также морфологический состав туш.

С целью установления закономерностей возрастной динамики массы мышечной ткани выполняли послойное анатомическое препарирование и взвешивание (с точностью до 1 г) каждого мускула левой полутуши. Классификацию мышц проводили согласно методике А.И. Акаевского [15]. На основе абсолютных показателей массы мускулов рассчитывали их среднее значение для анатомических областей туши в разрезе групп, а также определяли относительную массу (в процентах от общей массы исследованной мускулатуры).

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Использование интенсивных технологий при выращивании и откорме телок способствовало проявлению наследственных особенностей каждой группы животных в получении высокого уровня среднесуточных приростов. Шаролезские помесные телки в течение опытного периода отличались наибольшими темпами увеличения массы тела. Так, величина абсолютной скорости роста у них в возрасте 6,12 и 18 месяцев составила, соответственно, 1041, 696 и 607 г, что на 23,48; 12,44 и 15,62% больше, чем у сверстниц контрольной группы. В указанные возрастные интервалы помесные телки с герефордской породой демонстрировали среднесуточные приросты на уровне 1025, 670 и 510 г соответственно. За весь 18-месячный период исследований средний абсолютный прирост живой массы по группам достиг 761, 797 и 866 г.

Высокий уровень кормления при выращивании и откорме телок способствовал получению тяжеловесных животных. Об интенсивности роста и уровне мясной продуктивности телок сравниваемых групп можно судить по данным таблицы 1.

Таблица 1

Показатели, характеризующие мясную продуктивность черно-пестрых и помесных телок

Table 1

Meat productivity parameters of Black-and-White and crossbred heifers

Показатели	Группы		
	1	2	3
6 месяцев			
Предубойная масса, кг	181,7	189,8	197,4**
Масса парной туши, кг	99,28	103,76	107,97*
Масса мускулатуры туш, г	67432	71856	74242
12 месяцев			
Предубойная масса, кг	334,7	358,8**	371,8***
Масса парной туши, кг	178,62	192,52*	210,90**
Масса мускулатуры туш, г	108380	119324	143374**
18 месяцев			
Предубойная масса, кг	433,5	452,6**	489,4***
Масса парной туши, кг	242,5	256,76**	282,72***
Масса мускулатуры туш, г	150396	159746	194454***

* $p < 0,05$.

** $p < 0,01$.

*** $p < 0,001$.

Из данных таблицы следует, что шаролезские помесные телки в возрасте 6, 12 и 18 месяцев превосходили черно-пестрых сверстниц по величине предубойной массы, соответственно, на 8,64; 11,08; 12,89% ($p < 0,01$ – $p < 0,001$), по массе парных туш – на 8,77; 18,07; 16,58% ($p < 0,05$ – $p < 0,001$). Герефордские помесные телки по этим показателям занимали промежуточное положение.

Влияние генотипа шаролезских помесных телок выразилось в более интенсивном росте скелетной мускулатуры. Статистический анализ выявил достоверные различия в массе мышечной ткани между группами. Помеси с шаролезской породой в возрасте 12 и 18 месяцев достоверно (при $p < 0,01$ и $P < 0,001$ соответственно) превзошли сверстниц материнской породы на 32,29 и 29,29%, что в абсолютных показателях составило 34994 и 44058 г. В 6-месячном возрасте разница (10,11%, или 6810 г) была статистически незначимой. Помеси с герефордской породой также показали более высокую общую массу мускулатуры во все возрастные периоды (на 6,56; 10,09; 6,22% в 6, 12 и 18 месяцев соответственно), однако эти различия не достигали уровня статистической значимости.

Изучение интенсивности роста скелетной мускулатуры на разных этапах постнатального онтогенеза обусловлено тем, что этот компонент туш является важным морфологическим показателем, отражающим конституциональные особенности и экстерьер животных, которые тесно связаны с уровнем их продуктивности. Кроме того, знание возрастных изменений мышечного компонента туш позволяет судить в определенной степени о качестве мяса.

Об интенсивности роста мускулатуры анатомических отделов туш судили по кратности увеличения ее массы у телок в определенные возрастные периоды относительно таковой у новорожденных телят.

При изучении характера и интенсивности роста мышц различных анатомических частей тела животных подопытных групп было установлено, что шаролезские помесные телки отличались более высокими темпами роста мускулатуры, но в то же время характер роста мускулов в одноименных мышечных комплексах животных различных генотипов был сходным. Чтобы избежать повтора при изложении характера роста мускулов телок различных групп, приведены данные шаролезских помесных телок.

В качестве критерия оценки темпов роста мускулов использовали коэффициенты роста общей массы скелетной мускулатуры туш. Об интенсивности и характере роста мускулов различных анатомических отделов судили на основании отклонений их коэффициентов роста от коэффициента роста общей мышечной массы туши.

Выше отмечено, что ряд исследователей при изучении роста и развития мышечной ткани мускулы группировал по анатомическим отделам туш, полагая, что мышцы анатомических частей тела можно рассматривать как функциональные мышечные группы. Однако следует отметить, что мышцы функциональных мышечных групп выполняют одну функцию. Так, мышечный комплекс брюшной стенки следует считать мышечной функциональной группой, поскольку все брюшные мускулы выполняют одну функцию – поддержание внутренних органов, желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), внутреннего жира. Мускулы других анатомических отделов туш, в частности, мышцы, связывающие туловище с грудной конечностью, в отличие от таковой у брюшной стенки выполняют различные функции: подвешивание и поддержание туловища, стремящегося опуститься вниз, участие в локомоторной функции, поднятие и опускание головы.

Мускулатура анатомических отделов туш и мускулы, входящие в их состав, по интенсивности роста были расположены в убывающем порядке, изложенном в таблице 2.

Таблица 2

**Интенсивность роста мускулатуры осевого отдела скелета туш
шаролеzkских помесных телок**

Table 2

Growth rate of axial skeleton musculature of Charolais crossbred heifer carcasses

Мускулатура	Возраст, мес.		
	6	12	18
Брюшного отдела	8,07	16,63	25,97
Косой брюшной наружный	10,06	20,69	31,35
Прямой брюшной	8,28	16,15	25,73
Косой брюшной внутренний	7,05	14,85	24,05
Поперечный брюшной	6,86	14,88	23,21
Связующие мускулы	5,27	10,27	15,11
Глубокий грудной	6,26	11,58	19,10
Широчайший	6,95	12,73	16,95
Зубчатый вентральный	5,37	10,19	15,23
Трапецевидный	4,89	8,90	14,00
Ромбовидный	4,90	9,02	13,44
Поверхностный грудной	4,05	6,40	12,79
Плече-атлантный	2,86	11,20	11,62
Грудино-плечеголовной	4,07	8,38	10,97
Грудной клетки	3,59	10,51	14,71
Межреберные	3,84	10,22	15,27
Другие мелкие мышцы	3,87	9,94	14,43
Позвоночного столба	5,47	10,23	14,48
Длиннейший спины	8,28	13,59	15,41
Длиннейшие шеи, головы и атланта	7,12	10,85	15,37
Остистый и полуостистый спины и шеи	4,84	7,87	15,19
Малый поясничный	4,17	8,98	14,12

Мускулатура	Возраст, мес.		
	6	12	18
Шейные короткие	4,20	10,75	13,63
Подвздошно-реберный	5,35	8,00	12,59
Длинные шеи и головы	4,32	8,55	11,90
Пластыревидный	3,55	8,35	11,31
Полуостистый головы	3,30	7,59	10,43
Квадратный поясничный	2,73	10,07	10,40
Осевая	5,34	11,15	16,19

Данные таблицы свидетельствуют о наиболее высокой интенсивности роста у мускулатуры брюшной стенки. К окончанию экспериментального периода масса данного мышечного комплекса возросла в 25,97 раза относительно исходных показателей, в то время как аналогичный показатель для всей мышечной массы туш составил лишь 16,08. Несмотря на общую функцию всех мышц этой группы, заключающуюся в поддержании внутренних органов, желудочно-кишечного тракта с его содержимым и внутреннего жира, между ними наблюдались существенные различия в скорости роста. Так, коэффициенты роста мышц косого брюшного наружного, прямого брюшного и косого брюшного внутреннего у 18-месячных телок составили 31,25; 25,73; 24,05 соответственно. Наименьшей интенсивностью роста отличался поперечный брюшной мускул.

Мощное развитие косого брюшного наружного мускула объясняется значительным возрастанием функциональной нагрузки вследствие большей поддерживающей поверхности этой мышцы. Так, наружная косая брюшная мышца начинается мощными зубцами на наружной поверхности 5–13 ребер, межреберных мышц и фасции разгибателей спины, образует мощный поверхностный слой брюшной стенки. Далее все зубцы объединяются в один общий пласт, который заканчивается на белой линии живота. По завершении эксперимента доля исследуемого мускула в общей массе мышечного комплекса достигла 30,77%. Прямая мышца живота по удельному весу незначительно (всего на 1,14%) отставала от наружной косой мышцы. Наименьший относительный показатель (17,82%) был зафиксирован у поперечной мышцы.

Интенсивность роста брюшных мускулов в значительной степени определяется увеличением функциональных нагрузок на них, возникающих при увеличении с возрастом телок массы внутренних органов, внутреннего жира, ЖКТ и его содержимого. Наибольшая интенсивность развития абдоминальных мускулов отмечена в первые 6 месяцев жизни, что коррелирует с фазой формирования рубцового пищеварения. Например, масса желудка, составлявшая при рождении 0,457 кг, к 6 месяцам возросла в 14,64 раза, а к 12 и 18 месяцам – в 25,65 и 31,34 раза соответственно. Согласно исследованиям [16] объем рубца у телят за период от рождения до 5 месяцев увеличивается с 0,73 л до 65 л, то есть в 89,04 раза.

Мускулатура, соединяющая туловище с грудной конечностью, занимает второе место по интенсивности роста после брюшных мускулов и второе место по массе и мощности после мускулатуры области бедра. Основной функцией связующих мускулов считается подвешивание и поддержание туловища между грудными конечностями. В то же время мускулы этого мышечного комплекса участвуют в локомоции, противодействуют гравитационному притяжению к земле туловища телок, поднимают и опускают голову, что способствует усилению функциональных нагрузок на них и усилению их массы и мощности. Например, зубчатый вентральный и широчайший спины мускулы принимают на себя не только массу туловища, противодействуя его провисанию, но и участвуют в протягивании туловища вперед между грудными конечностями. Значительная функциональная нагрузка на зубчатый вентральный мускул способствует увеличению его мощности и массы. Относительная масса его в этом мышечном комплексе в конце опытного периода составила 23,38%. Наиболее интенсивный рост глубокой грудной мышцы обусловлен активным ее участием в протягивании туловища вперед между грудными конечностями.

При определении интенсивности роста ромбовидного и трапециевидного мускулов было установлено, что темпы роста указанных мускулов у телок были значительно ниже таковых у бычков. Известно, что тестостерон и его производные существенно влияют на интенсивность роста мускулатуры, в мышечных клетках которой достаточно высокая концентрация рецепторов этого гормона. С увеличением содержания андрогенов в крови бычков в период становления и созревания половой функции интенсивность роста ромбовидного и трапециевидного мускулов, подверженных влиянию тестостерона, значительно возрастала. Так, если кратность увеличения массы трапециевидного и ромбовидного мускулов у телок в возрасте 18 месяцев составила, соответственно, 14,00 и 13,44, то у бычков этого же генотипа – 26,07 и 34,02. Менее интенсивный рост этих мускулов у телок, по-видимому, связан с тем, что в мышечных клетках этих мускулов отсутствуют рецепторы тестостерона. Кроме того, у телок андрогены продуцируются надпочечниками в ограниченном количестве.

Кратность увеличения поверхностного грудного, плече-атлантного и грудно-плечеголовного мускулов у телок была на 3,29–5,11 ед. меньше, чем таковая мышечного компонента туш.

Интенсивность роста мускулатуры грудной клетки определяется в основном межреберными мышцами, поскольку их доля в этом мышечном комплексе составляла 68,54%. Суммарная масса других 6 мелких мускулов составила 2236 г, или 31,46% от общей массы этого мышечного комплекса. Интенсивность роста мелких мускулов определяли, исходя из их суммарной массы, поскольку масса одного мускула была незначительной (372 г).

Таким образом, коэффициенты роста мускулатуры грудной клетки, межреберных мускулов и суммарной массы мелких мускулов в конце опытного периода составили 14,71; 15,27; 13,63 соответственно.

Мышечный комплекс позвоночного столба в общей массе скелетной мускулатуры занимает третье место. Основными функциями этого мышечного комплекса являются разгибание позвоночного столба, прогибание поясницы, укрепление позвоночного столба совместно с вентральными мускулами, поднятие шеи. Наиболее мощно развитым в этом анатомическом отделе является длиннейший мускул спины, который начинается на крестце и подвздошной кости и заканчивается на голове. Его удельная масса в мышечном комплексе позвоночного столба составила 44,60%. Важно отметить, что относительная масса этого мускула с возрастом телок изменяется незначительно, и это косвенно свидетельствует о постоянной востребованности его

функции. Интенсивность роста этого мускула у 18-месячных телок составила 15,41, и она близка к таковому мышечному компоненту туш.

Длиннейшие шеи, головы и атланта по темпам роста незначительно уступают таковым длиннейшего мускула спины. Кратность увеличения их массы у 18-месячных телок составила 15,37 и 15,19 соответственно.

Высокие темпы роста длиннейшего мускула спины, подвздошно-реберных мышц и полуостистых мышц спины и шеи обусловлены тем, что они выполняют значительную локомоторную функцию. В частности, эти мышцы разгибают спину, поскольку разгибание позвоночного столба является необходимым условием для совершения прыжка или скачкообразного движения при галопе. Разгибанию позвоночного столба противодействует гравитационное притяжение массы животного. Кроме того, упомянутым мышцам позвоночного столба совместно с разгибателями области бедра при осуществлении прыжка необходимо в течение какого-то времени удерживать в воздухе переднюю часть туловища.

Вентральные мышцы спины (малая поясничная и большая поясничная) совместно с разгибателями спины укрепляют позвоночный столб и противодействуют дорзальному выгибу позвоночника при действии реактивных сил, возникающих при соприкосновении грудных конечностей после прыжка с грунтом. При приземлении животного после прыжка формируемая реактивная сила имеет два направления: горизонтальная из них незначительна, и она тормозит движение животного вперед; другая, более мощная, направлена вертикально вверх, выполняя при этом амортизационную и пропульсивную функции. Вертикальная реактивная сила складывается с вертикальными составляющими усилий, возникающих при активном разгибании грудных конечностей. При этом движение тела животного с направления вперед и вниз, приданное толчком тазовых конечностей, меняется на направление вперед и вверх.

При определении темпов роста мышц обратило на себя внимание относительно низкая интенсивность роста пластыревидного и полуостистого мышц головы у телок. Так, если кратность увеличения указанных мускулов в порядке их перечисления у телок составила 11,33 и 10,43 соответственно, то у помесных шаролежских бычков – 43,17 и 23,20. (Сходные явления отмечены выше при анализе интенсивности роста ромбовидного и трапецевидного мускулов у телок и бычков.)

Оценка интенсивности роста мышечных комплексов периферического отдела скелета, представленная в таблице 3, показала, что величина этого показателя была наибольшей для мускулатуры тазового пояса (кратность увеличения – 15,47). Другие анатомические отделы периферического отдела скелета по темпам роста мышечной ткани были расположены в следующем убывающем порядке: область бедра (13,69), грудного пояса (13,25), области плеча (11,24), голени (10,45) и предплечья (8,81).

При анализе темпов роста мускулатуры анатомических отделов задних конечностей возникла необходимость комплексного изучения интенсивности роста мускулов тазового пояса, области бедра и голени, поскольку практически все мускулы указанных анатомических отделов синхронно выполняют одну и ту же функцию: распрямление тазовых конечностей в тазобедренном, коленном и скакательном суставах и придание пропульсивного толчка туловищу для движения его вперед. Так, тазовая конечность разгибается в тазобедренном суставе вследствие действия глубокого и среднего ягодичного мускулов, напрягателя широкой фасции бедра, двуглавого бедра, полуперепончатого, полусухожильного, стройного. Разгибание коленного сустава осуществляется за счет сокращения четырехглавой мышцы бедра, которая по массе является второй после двуглавой мышцы бедра. Функцию сгибания голеностопного сустава выполняют две головки икроножной мышцы.

Для распрямления тазовых конечностей и создания телу животного пропульсивного толчка мышечному комплексу тазовых конечностей необходимо, преодолевая гравитационное противодействие разгибанию спины, приподнимать и удерживать в воздухе в течение какого-то времени переднюю часть туловища. При этом разгибатели области бедра испытывают огромное напряжение, что способствует более интенсивному росту и увеличению их мощности.

В тазовом поясе наибольшая интенсивность роста характерна для крупных мышц, каковыми являются средний ягодичный и подвздошно-поясничный. Абсолютная и относительная масса других мышц в этом мышечном комплексе незначительна.

Мощное развитие мышц двуглавого и четырехглавого бедра, а также полуперепончатого привело к тому, что относительная масса мышечного комплекса области бедра в общей мышечной массе туш составила 23,83%, а удельная масса названных мышц в порядке их перечисления в этом анатомическом отделе – 28,74; 21,70; 18,59%. Особый интерес вызывают значительная масса четырехглавого мускула бедра и ее относительно низкие темпы роста. Эта мышца по абсолютной массе уступает только двуглавному бедру, а кратность увеличения ее массы составила 11,26 против 13,69 этого мышечного комплекса.

Таблица 3

Интенсивность роста мускулатуры периферического отдела скелета туш шаролеzkских помесей на разных этапах онтогенеза

Table 3

Growth rate of peripheral skeleton musculature in Charolais crossbred carcasses at different ontogenetic stages

Мускулатура	Возраст, мес.		
	6	12	18
Тазового пояса	6,73	12,36	15,47
Средний ягодичный	6,94	13,61	17,24
Пояснично-подвздошный	7,47	12,91	16,36
Глубокий ягодичный	4,36	6,94	9,23
Запиратели	4,72	6,41	8,97
Двойничный	3,37	5,83	7,86
Область бедра	6,21	10,89	13,69
Напрягатель фасции бедра	6,42	13,30	17,94
Полусухожильный	6,35	12,42	16,35
Двуглавый бедра	5,06	10,30	14,51
Полуперепончатый	6,42	12,41	13,48

Мускулатура	Возраст, мес.		
	6	12	18
Гребешковый	5,32	11,94	13,43
Приводящий	5,34	11,62	13,39
Стройный	5,55	11,17	12,75
Портняжный	5,14	10,27	12,14
Четырехглавый	4,11	9,78	11,26
Грудного пояса	5,25	10,21	13,25
Подлопаточный	5,64		16,11
Предостный	5,37	10,18	16,08
Дельтовидный	5,43	8,60	14,90
Заостный	5,29	10,54	13,64
Круглый большой	6,01	12,42	13,08
Каракоидный	4,03	6,65	10,46
Круглый малый	4,19	8,06	9,75
Область плеча	4,81	9,56	11,24
Трехглавый	4,89	9,97	13,56
Двуглавый	4,94	10,32	13,37
Напрягатель фасции предплечья	5,58	8,42	9,75
Плечевой	3,98	7,84	8,37
Локтевой	3,46	7,51	8,29
Голень	4,41	7,81	10,45
Икроножный	5,04	9,30	11,84
Другие мелкие мускулы	4,06	6,97	9,66
Предплечье	3,79	6,49	8,81
Периферическая	5,61	10,13	12,82
Мышечный компонент туш	5,49	10,60	14,37

Кратность увеличения мускулов напрягателя широкой фасции бедра, полусухожильного, двуглавого бедра и полуперепончатого составила, соответственно, 17,94; 16,35; 14,51; 13,48. Наименьшие темпы роста в этом анатомическом отделе были у мускулов стройного (12,75), портняжного (12,14) и четырехглавого (11,26).

Относительно высокие темпы роста крупных мускулов подлопаточного (16,11), предостного (16,08) и заостного (13,64) в значительной степени определили относительно высокие значения коэффициентов роста мышечного комплекса грудного пояса (13,25). В то же время в этом анатомическом отделе ряд мускулов (круглый малый, каракоидный) отличался низкими темпами роста.

Интенсивность роста мышц в средних и нижних звеньях периферического отдела скелета была значительно ниже таковой грудного пояса. Так, если коэффициенты роста мускулатуры грудного пояса составили 13,25, то таковые мышечной массы области плеча, голени и предплечья – 11,24; 10,45; 8,81 соответственно. Низкие темпы роста мускулатуры голени связаны с тем, что в этом анатомическом отделе достаточно развита только икроножная мышца, абсолютная масса которой к концу опытного периода достигла 1954 г, а ее относительная масса в этом мышечном комплексе составила 40,93%. Суммарная масса остальных 10 мускулов составила 2820 г, а масса одного мускула – в среднем 282 г. Все мелкие мускулы заключены в плотную соединительно-тканную оболочку, и они пронизаны тяжами из соединительной ткани. Коэффициенты роста суммарной массы мелких мускулов голени были незначительными (9,96). Кратность увеличения 11 мелких мускулов предплечья с общей массой 2440 г составила 8,81.

Результаты сравнительного анализа интенсивности роста мускулатуры показали, что различия в величине этого показателя между мышечной массой осевого и периферического отделов скелета у телок в первые полгода жизни были незначительными (рис. 1).

В последующие возрастные периоды более высокие темпы роста мышечных комплексов брюшной стенки, грудной клетки, позвоночного столба и связующих мускулов способствовали увеличению интенсивности роста осевой мускулатуры. Коэффициенты роста ее в возрасте 12 и 18 месяцев составили, соответственно, 11,15 и 16,19 против 10,13 и 12,82 мускулатуры периферического отдела скелета.

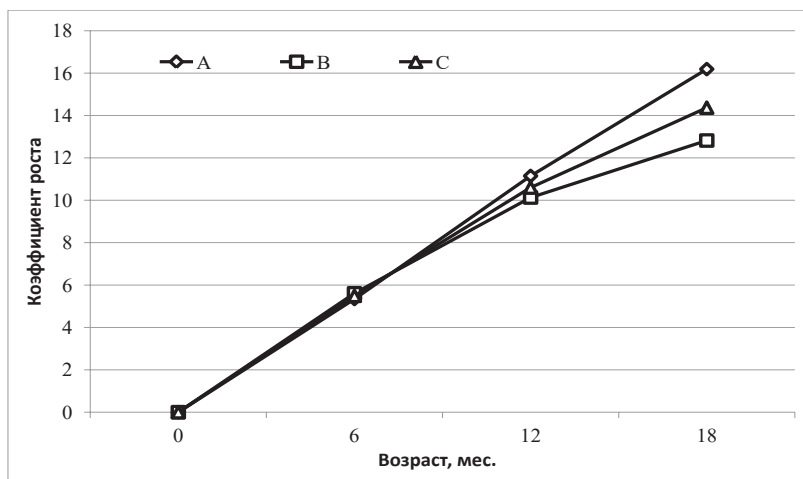


Рис. 1. Коэффициенты роста осевой (А), периферической (В) и мышечного компонента туш (С) помесных шаролезских телок

Figure 1. Growth coefficients of axial (A), peripheral (B), and muscular components of carcasses (C) in Charolais crossbred heifers

Сравнительный анализ темпов роста показал, что периферическая мускулатура развивается значительно менее интенсивно, чем общая мышечная масса туш. Исходя из этих данных интенсивность роста мускулов осевого отдела скелета позволяет отнести ее к мускулатуре с положительной аллометрией, а для мышечного комплекса периферического отдела скелета характерна отрицательная аллометрия.

Более интенсивный рост мускулатуры осевого отдела скелета сопряжен с перераспределением мышечной ткани туш, о чем свидетельствуют возрастные изменения относительной массы осевой и периферической мускулатуры (рис. 2).

Из данных рисунка 2 следует, что относительная масса периферической мускулатуры у новорожденных телят имела максимальную величину (53,95%), а осевой – минимальную (46,05%). Значительная удельная масса мышц конечностей новорожденных телят обусловлена тем, что для их выживания мускулатура периферического отдела скелета должна быть достаточно развитой. Предположительно более интенсивный рост мускулов конечностей телят в утробный и ранний постнатальный периоды онтогенеза запрограммирован генетической программой общего развития.

Удельная масса мускулатуры осевого отдела скелета, незначительно уменьшившись в первые 6 месяцев жизни, в последующие возрастные периоды закономерно возрастала при соответствующем уменьшении относительной массы периферической мускулатуры. В конце опытного периода относительная масса осевой и периферической мускулатуры составила 51,87 и 48,13% соответственно.

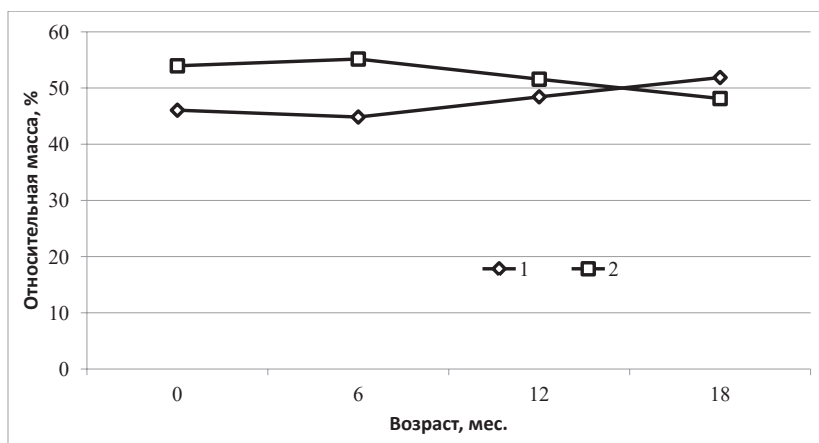


Рис. 2. Возрастная динамика относительной массы осевой (1) и периферической (2) мускулатуры помесных шароле-ских телок

Figure 2. Age dynamics of the relative mass of axial (1) and peripheral (2) musculature in Charolais crossbred heifers

Выводы Conclusions

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Мускулатуру брюшного отдела туш следует считать функциональной мышечной группой, поскольку все мускулы этого отдела выполняют одну функцию – поддержание внутренних органов, ЖКТ, внутреннего жира. В то же время между мускулами установлены значительные различия по массе и интенсивности их роста.

2. Мускулы мышечного комплекса, связывающего грудную конечность с туловищем, различаются по выполняемым ими функциям, интенсивности роста и массе. Основной функцией связующих мускулов считается подвешивание и поддержание туловища, стремящегося опуститься вниз, между грудными конечностями. Кроме того, они участвуют в локомоции – в частности, в протягивании туловища вперед между грудными конечностями.

3. Мощное развитие зубчатого вентрального и широчайшего мускулов спины объясняется их полифункциональностью. Эти мышцы не только противодействуют провисанию туловища, удерживая его массу, но также активно участвуют в проталкивании корпуса вперед между грудными конечностями во время движения.

4. В отличие от связующих мышц ряд мускулов тазового пояса (глубокий и средний ягодичные), области бедра (напрягатель широкой фасции бедра, двуглавый бедра, полуперепончатый, полусухожильный, четырехглавый бедра, стройный) и голени (две головки икроножного мускула) синхронно выполняют одну функцию – распрямление тазовых конечностей для придания пропульсивного толчка телу для движения его вперед.

5. Коэффициенты роста мускулатуры передних конечностей последовательно снижались от грудного пояса (13,25) к области плеча (11,24) и предплечья (8,81), а задних конечностей – от тазового пояса (15,47) к области бедра (13,65) и голени (10,45).

Список источников

1. Лукьянов В.Н., Прохоров И.П., Пикуль А.Н. Рост мускулатуры помесных бычков и факторы, его определяющие // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2015. № 1. С. 56–58. EDN: TSZARZ

2. Лукьянов В.Н. Морфологический состав туш и химические показатели мяса чистопородных и помесных бычков в разных условиях кормления // *Научное обозрение*. 2015. № 11. С. 10–17.

3. Лукьянов В.Н., Прохоров И.П. Особенности роста и развития мускулатуры туш бычков симментальской породы и ее помесей с абердин-ангусской и лимузинской // *Научная жизнь*. 2017. № 4. С. 47–57. EDN: ZGIUPZ

4. Молостова А.Ю., Карамаев С.В., Карамаева А.С. Естественно-анатомический и морфологический состав полутуши полукровного молодняка, полученного при реципрокном скрещивании калмыцкой и мандолонгской пород // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2023. № 1 (99). С. 261–265. EDN: BYXRXY

5. Шошина Ю.В. Особенности формирования мясной продуктивности симментальских бычков в условиях различных технологий выращивания и откорма: Дис. ... канд. с.-х. наук. Москва, 2023. 157 с. EDN: POWLNH

6. Geletu U.S., Usmael M.A., Mummed Y.Y., Ibrahim A.M. Quality of cattle meat and its compositional constituents. *Veterinary Medicine International*. 2021;2021(1):7340495. <https://doi.org/10.1155/2021/7340495>

7. Mwangi F.W., Blignaut D.J.C., Charmley E., Gardiner C.P. et al. Lipid metabolism, carcass characteristics and Longissimus dorsi muscle fatty acid composition of tropical crossbred beef cattle in response to *Desmanthus* spp. forage backgrounding. *Metabolites*. 2021;11(12):804. <https://doi.org/10.3390/metabo11120804>

8. Abebe B.K., Wang J., Guo J., Wang H. et al. A review of emerging technologies, nutritional practices, and management strategies to improve intramuscular fat composition in beef cattle. *Animal Biotechnology*. 2024;35(1):2388704. <https://doi.org/10.1080/10495398.2024.2388704>

9. Ge F., Li J., Gao H., Wang X. et al. Comparative analysis of carcass traits and meat quality in indigenous Chinese cattle breeds. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;124:105645. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105645>
10. Ramos J.M.L., Vargas J.A.C., Diniz E.A.L., Lacerda N.G. et al. Carcass traits and meat characteristics of grazing Nellore cattle submitted to different supplementation strategies in the tropics. *Tropical Animal Health and Production*. 2022;54(6):362. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03362-w>
11. Cantarero-Aparicio M.Á., Angón E., González-Esquivel C., Peña F. et al. Carcass and Meat Quality Traits in Female Lidia Cattle Slaughtered at Different Ages. *Animals*. 2024;14(6):850. <https://doi.org/10.3390/ani14060850>
12. Pinheiro R.S.B., Ramos P.R.R., de O. Roça R., Bezerra L.R. et al. Differences between cattle and buffalo in the water-soluble proteins of the Longissimus muscle as shown by electrophoretic techniques. *Animal Production Science*. 2020;60(14):1759-1768. <https://doi.org/10.1071/AN19239>
13. Tegegne F., Kebede D., Getaneh M., Adimasu E. et al. Carcass composition and sensory and chemical attributes of beef from local cattle breeds in North-West Amhara Region, Ethiopia. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 2024;9(1):1-12. <https://doi.org/10.20372/jaes.v9i1.9428>
14. Hoa V.-B., Song D.-H., Seol K.-H., Kang S.-M. et al. A comparative study on the carcass and meat chemical composition, and lipid-metabolism-related gene expression in Korean Hanwoo and brindle Chikso cattle. *Current Issues in Molecular Biology*. 2023;45(4):3279-3290. <https://doi.org/10.3390/cimb45040214>
15. Акаевский А.И. *Анатомия домашних животных*: Учебник. Москва: Колос, 1968. 608 с.
16. Свечин К.Б. *Индивидуальное развитие сельскохозяйственных животных*. Киев: Урожай, 1976. 286 с.

References

1. Lukyanov V.N., Prokhorov I.P., Pikul A.N. Muscular growth in cross-bred bull-calves and factors influencing such growth. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2015;(1):56-58. (In Russ.)
2. Luk'yanov V.N. Morphological composition of carcasses and chemical parameters of the meat of thoroughbred and mixed-breed bulls under different feeding conditions. *Nauchnoe obozrenie*. 2015;(11):10-17. (In Russ.)
3. Lukyanov V.N., Prokhorov I.P. On the issue of development of the theory and methodology of logistics management services in showrooms. *Scientific Life*. 2017;(4):47-57. (In Russ.)
4. Molostova A.Yu., Karamaev S.V., Karamaeva A.S. Natural anatomical and morphological composition of the half carcass half-blooded young animals obtained by reciprocal crossing of the Kalmyk and Mandolong breeds. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;(1(99)):261-265. (In Russ.)
5. Shoshina Yu.V. *Features of the formation of meat productivity of Simmental bulls under conditions of various growing and fattening technologies*: CSc (Ag) thesis. Moscow, Russia, 2023:157. (In Russ.)
6. Geletu U.S., Usmael M.A., Mummied Y.Y., Ibrahim A.M. Quality of cattle meat and its compositional constituents. *Veterinary Medicine International*. 2021;2021(1):7340495. <https://doi.org/10.1155/2021/7340495>
7. Mwangi F.W., Blignaut D.J.C., Charmley E., Gardiner C.P. et al. Lipid metabolism, carcass characteristics and Longissimus dorsi muscle fatty acid composition of tropical

crossbred beef cattle in response to *Desmanthus* spp. forage backgrounding. *Metabolites*. 2021;11(12):804. <https://doi.org/10.3390/metabo11120804>

8. Abebe B.K., Wang J., Guo J., Wang H. et al. A review of emerging technologies, nutritional practices, and management strategies to improve intramuscular fat composition in beef cattle. *Animal Biotechnology*. 2024;35(1):2388704. <https://doi.org/10.1080/10495398.2024.2388704>

9. Ge F., Li J., Gao H., Wang X. et al. Comparative analysis of carcass traits and meat quality in indigenous Chinese cattle breeds. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;124:105645. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105645>

10. Ramos J.M.L., Vargas J.A.C., Diniz E.A.L., Lacerda N.G. et al. Carcass traits and meat characteristics of grazing Nellore cattle submitted to different supplementation strategies in the tropics. *Tropical Animal Health and Production*. 2022;54(6):362. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03362-w>

11. Cantarero-Aparicio M.Á., Angón E., González-Esquivel C., Peña F. et al. Carcass and Meat Quality Traits in Female Lidia Cattle Slaughtered at Different Ages. *Animals*. 2024;14(6):850. <https://doi.org/10.3390/ani14060850>

12. Pinheiro R.S.B., Ramos P.R.R., de O. Roça R., Bezerra L.R. et al. Differences between cattle and buffalo in the water-soluble proteins of the Longissimus muscle as shown by electrophoretic techniques. *Animal Production Science*. 2020;60(14):1759-1768. <https://doi.org/10.1071/AN19239>

13. Tegegne F., Kebede D., Getaneh M., Adimasu E. et al. Carcass composition and sensory and chemical attributes of beef from local cattle breeds in North-West Amhara Region, Ethiopia. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 2024;9(1):1-12. <https://doi.org/10.20372/jaes.v9i1.9428>

14. Hoa V.-B., Song D.-H., Seol K.-H., Kang S.-M. et al. A comparative study on the carcass and meat chemical composition, and lipid-metabolism-related gene expression in Korean Hanwoo and brindle Chikso cattle. *Current Issues in Molecular Biology*. 2023;45(4):3279-3290. <https://doi.org/10.3390/cimb45040214>

15. Akaevskiy A.I. *Anatomy of domestic animals: a textbook*. Moscow, Russia: Kolos, 1968:608. (In Russ.)

16. Svechin K.B. *Individual development of farm animals*. Kyiv, Ukrainian SSR: Urozhay, 1976:286. (In Russ.)

Сведения об авторах

Махар Магомедович Эртуев, д-р с.-х. наук, научный сотрудник Центра разведения и реабилитации переднеазиатского леопарда, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сочинский национальный парк»; 354000, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Московская, 21; e-mail: mr.ertuev38@gmail.com

Иван Петрович Прохоров, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры частной зоотехнии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: iprohorov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-39-47-468X>

Григорий Сергеевич Шеховцев, ассистент кафедры частной зоотехнии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: shekhovtsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6281-9968>

Ольга Игнатьевна Соловьева, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры частной зоотехнии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: milk-center@rgau-msha.ru

Ольга Алексеевна Калмыкова, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры частной зоотехнии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: okalmykova@rgau-msha.ru

Information about the authors

Makhar M. Ertuev, DSc (Ag), Research Associate, Center for Breeding and Rehabilitation of the Persian Leopard, Sochi National Park; 21 Moskovskaya St., Sochi, Krasnodar Krai, 354000, Russian Federation; e-mail: mr.ertuev38@gmail.com

Ivan P. Prokhorov, DSc (Ag), Professor, Professor at the Department of Specialized Animal Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: iprohorov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-39-47-468X>

Grigoriy S. Shekhovtsev, Assistant at the Department of Specialized Animal Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: shekhovtsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6281-9968>

Olga I. Solovyova, DSc (Ag), Professor, Professor at the Department of Specialized Animal Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: milk-center@rgau-msha.ru

Olga A. Kalmykova, CSc (Ag), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Specialized Animal Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: okalmykova@rgau-msha.ru

ЭКОНОМИКА

**Проектирование цифрового двойника Тимирязевской сыроварни
с использованием технологии виртуальной реальности**

**Анастасия Валентиновна Бабкина[✉], Василий Владимирович Торопцев,
Александр Николаевич Мартеха, Ольга Сергеевна Пучкова**

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: babkina@rgau-msha.ru

Аннотация

Технология цифрового двойника в агропромышленном комплексе на сегодняшний день недостаточно распространена. Поэтому внедрение адекватной модели цифрового двойника позволит уменьшить затраты на проектирование производственных линий, а также выявить уязвимые места, которые могут возникнуть в процессе производства. Таким образом, целью научных исследований являлась разработка методики создания цифрового двойника линии по производству сыров на основе технологии виртуальной реальности. В соответствии с поставленной целью была предложена методика по проектированию линии с использованием технологии виртуальной реальности, представленная в виде трехступенчатой стратегии: распределение ролей для пользователей виртуальной реальности; распределение задач; проектирование системы (проектирование 3D-моделей оборудования, импорт модели, создание сцены, тестирование системы). Описаны объект исследований, имеющееся оборудование и используемое программное обеспечение. Представлены этапы 3D-моделирования, заключающиеся в создании геометрической модели, текстуры и 3D-визуализации. Отображены параметры, которые можно настроить за счет встроенных в платформу виртуальной реальности методов редактирования. На стадии создания сцены представлены задачи взаимодействия, которые выполняются во время обзора виртуальной реальности: «Смотреть и ходить», «Прикасаться и телепортироваться», «Захват», а также три дополнительные специфические функции: «Виртуальное меню», «Обучение с помощью озвучивания», «Анимация производственного процесса». Для оценки предлагаемого подхода проведено анкетирование пользователей, которое доказало необходимость применения цифрового двойника, созданного на основе технологии виртуальной реальности для проектирования линии по производству сыров. По результатам проведенных исследований были сделаны выводы, а также предложены дальнейшие направления развития.

Ключевые слова

Цифровой двойник, Индустрия 4.0, агропромышленный комплекс, виртуальная реальность, бизнес-процессы, 3D-моделирование

Благодарности

Проект выполнен в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075–15–2024–198 от 8 марта 2024 г.).

Для цитирования

Бабкина А.В., Торопцев В.В., Мартеха А.Н., Пучкова О.С. Проектирование цифрового двойника Тимирязевской сыроварни с использованием технологии виртуальной реальности // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 209–220.

Designing a digital twin of the Timiryazev Cheese Dairy using virtual reality technology

Anastasia V. Babkina✉, Vasily V. Toroptsev,
Alexander N. Martekha, Olga S. Puchkova

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉Corresponding author: babkina@rgau-msha.ru

Abstract

Digital twin technology is currently underutilized in the agro-industrial sector. Therefore, implementing an adequate digital twin model will enable a reduction in production line design costs and facilitate the identification of potential vulnerabilities that may arise during the manufacturing process. Consequently, the aim of this research is to develop a methodology for creating a digital twin of a cheese production line based on virtual reality technology. In alignment with the stated goal, the paper proposes a methodology for designing the production line using virtual reality technology, presented as a three-stage strategy: allocation of roles for virtual reality users, task assignment, and system design. The system design stage encompasses 3D equipment model design, model import, scene creation, and system testing. The object of the study, existing equipment, and utilized software are described. The stages of 3D modeling are presented, involving the creation of a geometric model, texture application, and 3D visualization. Parameters adjustable through the virtual reality platform's integrated editing methods are outlined. During the scene creation stage, interaction tasks performed during the virtual reality walkthrough are presented: “look and walk”, “touch and teleport”, and “grab”. Furthermore, three additional specific functions are introduced: “virtual menu”, “voice-over training”, and “production process animation”. To evaluate the proposed approach, a user survey was conducted, which confirmed the necessity of applying a digital twin, developed using virtual reality technology, for the design of cheese production lines. Conclusions were drawn from the conducted research, and further directions for development are proposed.

Keywords

Digital twin, Industry 4.0, agro-industrial sector, virtual reality, business processes, 3D modeling

Acknowledgments

This research was conducted within the framework of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030” (agreement No. 075–15–2024–198 dated March 08, 2024).

For citation

Babkina A.V., Toroptsev V.V., Martekha A.N., Puchkova O.S. Designing a digital twin of the Timiryazev Cheese Dairy using virtual reality technology. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 209–220.

Введение Introduction

Современная эпоха Индустрии 4.0 стимулирует создание «фабрик будущего», где физические объекты и цифровые технологии неразрывно связаны между собой для достижения поставленных целей: улучшения качества и производства новых видов продукции, изменения упаковки для быстрой адаптации к рыночным требованиям

в условиях растущей конкуренции. Это обеспечивает ускоренный вывод готовой продукции на рынок и гарантирует ее соответствие критериям качества. В решении этих сложных задач ключевую роль играют интегрированные производственные системы – совокупность машин и механизмов, специализированных для преобразования сырья в конечную продукцию с повышенной добавленной стоимостью [1]. Такие системы должны обеспечивать тесное взаимодействие физического и цифрового мира, демонстрируя при этом высокую производительность и экономическую эффективность с учетом ресурсоемкости (времени, пространства) и затрат на организационном уровне. Сложность данных систем обусловлена их многоуровневой структурой, гибкой конфигурацией, трудностями в эксплуатации и управлении, а также наличием множественных компонентов с разнообразными функциями, взаимосвязями и зависимостями [2]. Решить представленные проблемы можно за счет применения инновационного подхода – концепции цифрового двойника, базирующегося на технологии виртуальной реальности. Этот метод позволит осуществить полное моделирование и проверку производственной линии с помощью 3D-визуализации, комплексную валидацию всех компонентов системы, существенно сократить временные и материальные затраты на производство готовой продукции.

В последние годы наблюдается бурное развитие использования цифровых двойников на основе технологии виртуальной реальности (VR) для оптимизации производственных процессов [3, 4]. Данный подход позволяет пользователям полностью погружаться в искусственно созданные среды и манипулировать объектами так, будто они существуют в реальном мире. Широкое применение VR-технологии отмечается в автомобилестроении, биоинженерии, строительстве, пищевой промышленности [5, 6]. Особенно актуальными являются следующие направления исследования: обучение персонала, где VR обеспечивает интерактивное погружение в производственный процесс; техническое обслуживание, позволяющее проводить виртуальные тренировки без риска для оборудования; проектирование новых производственных линий, когда изменения в VR требуют меньших материальных затрат по сравнению с корректировками в реальной среде.

Внедрением технологии цифровых двойников в сельское хозяйство активно занимаются ученые и компании во всем мире. Например, компания Delaval представила цифровую систему для оценки состояния здоровья молочного скота, а греческая компания BeeZon разработала цифровой двойник пасеки, позволяющий отслеживать влияние климатических изменений на пчеловодство. Компания из Словении Narpha-Sea создала цифровой двойник урожая оливок, основанный на оптической технологии. Крупнейший американский производитель потребительской упаковки Aptar Group использует виртуальную реальность для обучения персонала решению задач производственного процесса – таким, как сборка, оптимизация рабочих зон и выявление потенциальных опасностей. В свою очередь, американская компания Northrop Grumman, специализирующаяся на производстве аэрокосмического и оборонного оборудования, применила виртуальное моделирование для разработки новых изделий, что позволило ускорить производственный процесс и уменьшить расходы на производство [7].

Таким образом, применение цифрового двойника с использованием технологии виртуальной реальности радикально трансформирует подходы к проектированию и управлению сложными производственными системами. Однако существуют барьеры, препятствующие внедрению VR-технологий в производственный процесс: нехватка высококвалифицированных ИТ-специалистов, а также отсутствие адекватных стандартов и процедур применения виртуальной реальности в пищевой промышленности.

Цель исследований: разработка цифрового двойника линии по переработке молочного сырья с использованием технологии виртуальной реальности.

Методика исследований

Research method

Для оптимизации процесса разработки и внедрения виртуальной реальности в производственный процесс необходимо применить трехступенчатую стратегию проектирования, которая включает в себя:

1. Распределение ролей для пользователей виртуальной реальности, как внутренних, так и внешних специалистов.
2. Распределение задач с целью создания точного и функционального цифрового двойника (табл.).
3. Реализацию трех этапов проектирования системы: создание 3D-моделей оборудования и интеграция их в программную среду виртуальной реальности; создание виртуальной сцены – разработка окружения, учитывающего все необходимые элементы и условия для взаимодействия пользователей; тестирование программного продукта с целью возможности погружения и активного использования двойника для обучения, проектирования или контроля производственных процессов [8, 9].

Таблица

Специалисты, участвующие в проектировании цифрового двойника с использованием технологии виртуальной реальности (составлено авторами)

Table

Specialists involved in designing the digital twin using virtual reality technology [compiled by the authors]

Роль	Задачи
Эксперт в области компетенций	Управление персоналом, определение целей в качестве руководителя отдела
Руководитель проекта	Управление ресурсами, временем, затратами, необходимыми для завершения проекта
Инженер-проектировщик	Принятие всех технических решений, обеспечение безопасного и эффективного выполнения работ
Менеджер по продажам	Подготовка и доработка коммерческих предложений о приобретении проекта
Технический эксперт	Координация работ проектировщиков с технической стороны проекта
Дизайнеры	Разработка 3D-моделей оборудования, отладка их представления в виртуальной реальности
Специалист по виртуальной реальности	Проектирование виртуальной среды с взаимодействием объектов, анимацией в соответствии с поставленными целями
Руководитель сборочного производства	Устранение неполадок при сборке проекта на этапе проектирования

На этапе проектирования CAD-моделей необходимо решить следующие задачи: спроектировать 3D-модели и экспортировать данные модели в требуемый формат (STL, FBX, OBJ).

Далее переходим к созданию виртуальной сцены, которая включает в себя: настройку параметров модели виртуальной среды; импортирование CAD-моделей в виртуальную среду; настройку цвета, текстуры и свойств материалов, а также их освещение; настройку кинематической анимации; назначение объектов взаимодействия и установление их взаимосвязей с контроллером.

После создания цифрового двойника проводим его тестирование: подготавливаем помещение и устройство для сеанса виртуальной реальности; выполняем VR-анализ проекта; выявляем возможные проблемы дизайна; анализируем результаты обзора виртуальной реальности.

В качестве объекта исследований была выбрана Тимирязевская сыроварня, которая занимает 3 помещения общей площадью в 95 м² и имеет следующее оборудование: котел для пастеризации; ванна для подогрева молока; сыроварня (пастеризатор); стол дренажный; стол для формирования сыра; весы; стеллажи (2 шт.); рефрижераторы (4 шт.); мойка двухсекционная; мойка трехсекционная; стол технологический; пресс пневматический; упаковщик сыра.

Для реализации проекта по проектированию цифрового двойника сыроварни с использованием технологии виртуальной реальности использовалось следующее программное обеспечение:

- 3D-моделирование – КОМПАС-3D;
- платформа виртуальной реальности – Unity3D.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Создание трехмерных моделей – процесс, который выполняется с помощью специального программного обеспечения [10]. Он нашел широкое применение в киноиндустрии, при разработке компьютерных игр, архитектурном проектировании, в инженерном деле и сфере здравоохранения. Следует отметить, что 3D-моделирование – это не только визуальное представление объектов, но и учет всех технических требований к деталям включая характеристики материалов и их поведение в среде виртуальной реальности.

В результате реализации проекта было спроектировано 15 моделей оборудования сыроварни: ванна для подогрева молока, сыроварня (пастеризатор) на 120 л, стол дренажный, стол для формирования сыра, весы, стеллажи (2 шт.), рефрижератор, мойка двухсекционная, мойка трехсекционная, стол технологический, пресс пневматический, упаковщик сыра, лира вертикальная, лира горизонтальная. Пример 3D-моделей пресса пневматического и сыроварни представлен на рисунке 1.

Разработанные модели были экспортированы в двух форматах (FBX и OBJ). Формат FBX использовался для CAD-моделей с анимацией, поскольку он сохраняет конфигурацию компонентов при наличии различных изменений объектов в процессе сеансов виртуальной реальности. Формат OBJ имеет относительно небольшие размеры файлов благодаря использованию двоичного кодирования, что положительно сказывается на скорости работы разрабатываемой системы [11].

При импорте моделей в среду виртуальной реальности потребовалась ручная настройка всех основных геометрических параметров (материалы, размер, положение, анимация, свет и камера) за счет встроенных в настройки платформы методов редактирования [12].

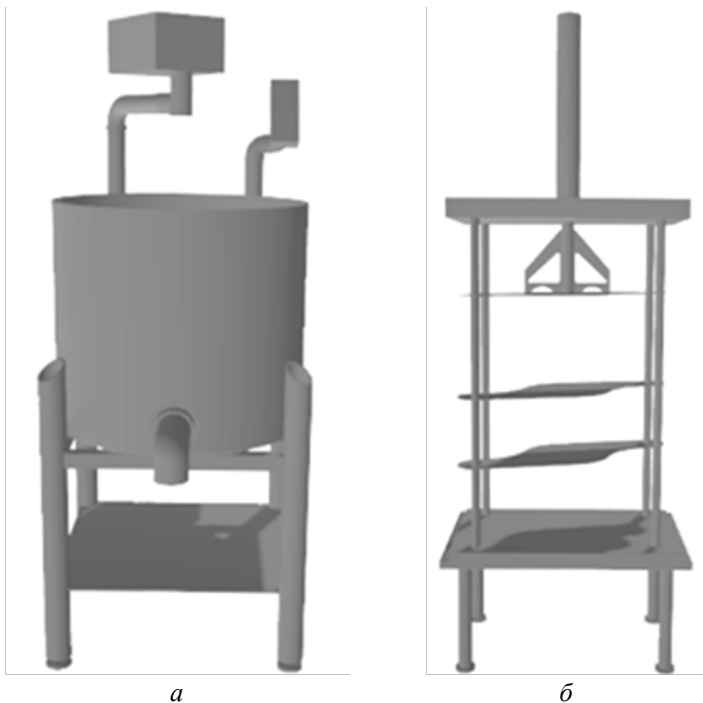


Рис. 1. Примеры 3D-моделей оборудования для Тимирязевской сыроварни (составлено авторами): а – сыроварня 120 л; б – пресс пневматический

Figure 1. Examples of 3D equipment models for the Timiryazev Cheese Dairy [compiled by the authors]: а – 120 L cheese dairy; б – pneumatic press

На первом этапе проектирования сцены цифрового двойника необходимо было сосредоточиться на передаче реалистичных ощущений, установив текстуру, материал, цвет и освещение в соответствии со спецификациями дизайна сыроварни. Необходимые материалы были размещены вручную по месту требования с помощью библиотек. В основном использовались отражающие металлические материалы (сталь, алюминий, медь и цинк) для оборудования, различные виды плитки для стен и пола, бетон для потолка, стекло для окон. На рисунке 2 представлен пример реализации сцены с материалами, тенями и искусственным освещением.

Далее специалист по виртуальной реальности определил основные взаимодействия: «Смотреть и ходить», «Прикасаться и телепортироваться», «Захват». С учетом сложности производственной линии особое внимание было уделено команде «Захват», которая позволяет пользователю воспринимать взаимосвязь с окружающей средой так, как если бы она была реальной. Взаимодействие захвата было основано на зоне столкновения, созданной на объекте. Как только контроллер входит в зону коллайдера, инструмент виртуальной реальности меняет свой цвет, что является знаком для осуществления команды «Захват». Все детали были сгруппированы таким образом, что ими можно манипулировать как единым объектом для упрощения физического моделирования и создания требуемых кинематических анимаций.

Также в виртуальную сцену включены 3 дополнительных специфических взаимодействия: виртуальное меню (рис. 3); обучение с помощью озвучивания; анимация производственного процесса.



Рис. 2. Реализация материалов, теней и искусственного освещения в VR-сцене сыроварни (составлено авторами)

Figure 2. Implementation of materials, shadows and artificial lighting in the VR scene of the cheese dairy [compiled by the authors]

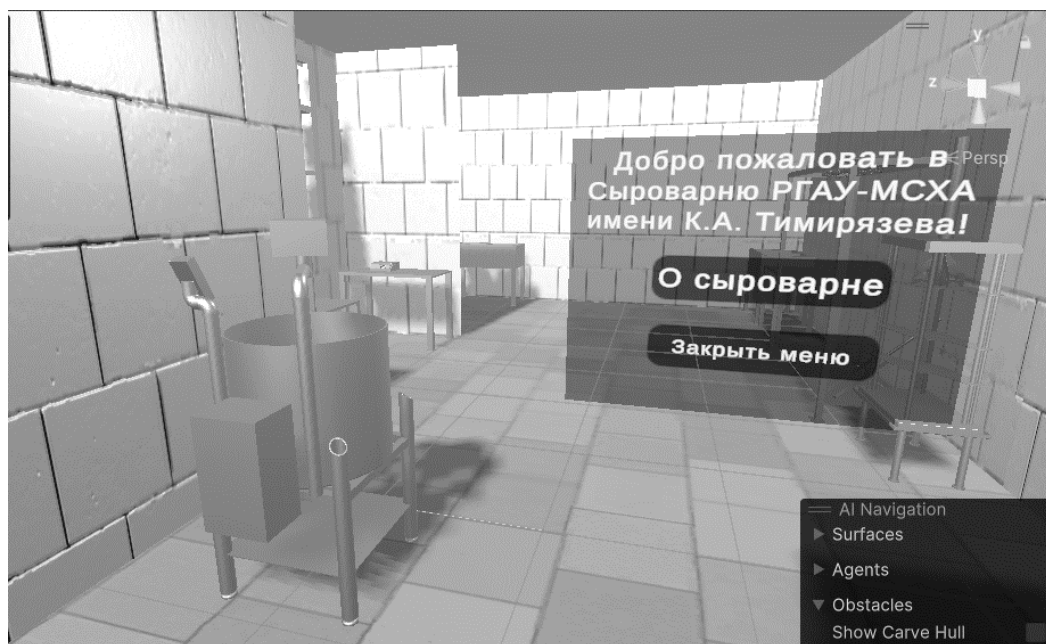


Рис. 3. Реализация функции виртуального меню в VR-сцене сыроварни (составлено авторами)

Figure 3. Implementation of the virtual menu function in the VR scene of the cheese dairy [compiled by the authors]

При запуске сеанса виртуальной реальности пользователь попадает в сыроварню, где на первом плане представлено виртуальное меню, благодаря которому он может познакомиться с историей создания сыроварни, а также закрыть главное меню и продолжить знакомство с производственным процессом.

Все оборудование, участвующее в цикле производства сыров, оснащено голосовым сопровождением, которое позволяет пользователю узнать о специфике оборудования и его роли в производственном процессе. Для реализации данной функции предварительно были записаны аудиофайлы в формате MP3 и импортированы в среду виртуальной реальности. Для воспроизведения файла необходимо объекту добавить компонент AudioManager, а также записать скрипт для событий, которые могут вызывать воспроизведение файла, описание логики и остановку воспроизведения.

Погрузить пользователя в процесс производства сыров позволяет функция анимации, которая была осуществлена с учетом физических законов: формы, размера и особенностей пастеризатора; скорости и распределения частиц жидкости с использованием различных цветов и прозрачности.

Полный функционал цифрового двойника линии по производству сыров представлен в работе [13].

После завершения VR-сцены нужно провести виртуальный обзор. Сначала необходимо подготовить помещение, предназначенное для сеансов виртуальной реальности, с большим пространством без препятствий (столы, стулья) для безопасности пользователя. Далее специалист по виртуальной реальности настраивает устройство виртуальной реальности. В нашем случае использовалось PICO 4 Ultra – автономное устройство, которое может запускать проекты в беспроводном режиме под управлением операционной системы Android. В нем используются внутренний датчик и камера на передней панели гарнитуры, благодаря чему можно определить границы зоны для сеанса. В сеансах виртуальной реальности участвовали около 25 чел. Средний возраст участников составил 35 лет и варьировал от 25 до 45 лет. Согласно результатам опроса участники выразили полное одобрение влияния виртуальной реальности на взаимодействие работников сыроварни. Подобное согласие наблюдалось и в отношении способности виртуальной реальности обнаруживать эргономические, логические и дизайнерские недочеты в процессе оценки проекта с использованием VR-оборудования. Более того, 75% респондентов отметили простоту взаимодействия с элементами системы в виртуальном пространстве, удобство использования устройства и понятность пользовательского интерфейса. В то же время большинство опрошенных не подтвердили головокружения после использования гарнитуры и ощущения дискомфорта при работе с виртуальной реальностью. Подробно с результатами анкетирования можно ознакомиться в работе [14].

Таким образом, опрос продемонстрировал, что технология виртуальной реальности является важным дополнением в процессе разработки новых продуктов, позволяет находить и эффективно решать проблемы, которые могут возникнуть в существующих производственных линиях. Следовательно, использование цифровых двойников в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности может значительно улучшить работу организаций, снижая затраты и повышая надежность производственной системы благодаря применению методов численного и системного моделирования.

Развитие цифровой экономики стимулирует внедрение цифровых бизнес-моделей, создавая условия для конкуренции, основанной на технических принципах и смарт-индустрии. Внедрение информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий, соответствующих принципам Индустрии 4.0, устраняет необходимость длительных и затратных физических испытаний при реализации проектов, обеспечивает быструю перестройку объектов в соответствии с новыми

требованиями, сокращает количество расчетных ошибок, в том числе связанных с человеческим фактором, и позволяет увеличить долю отечественного производства, сохраняя при этом высокотехнологические, эксплуатационные и другие параметры [15].

Выводы

Conclusions

Проектирование сложных производственных систем для агропромышленного комплекса все чаще требует использования инструментов для совместной работы, которые позволяют создавать инновационную продукцию и повышать эффективность производства при одновременном снижении рисков и повышении производительности.

Таким образом, в статье представлена методика создания цифрового двойника Тимирязевской сыроварни с применением технологии виртуальной реальности, доказавшая свою результативность с точки зрения эргономики и визуализации. По сравнению с традиционными 2D-методами виртуальная реальность способствовала оптимизации расположения оборудования, ускорению принятия проектных решений и улучшению взаимодействия сотрудников.

Исследования были дополнены тестированием системы, направленным на оценку нагрузки пользователей во время работы в виртуальной реальности и их отношения к данной технологии. Результаты опроса продемонстрировали положительную оценку виртуальной реальности, незначительную рабочую нагрузку даже для новых пользователей, удобство использования и простоту получения обратной связи. Это подтверждает целесообразность интеграции инструментов виртуальной реальности как в производственный процесс, так и в качестве образовательной технологии.

Полученные результаты нельзя считать окончательными – данная работа открывает перспективы для дальнейших исследований. С учетом того, что виртуальная реальность обеспечивает техническую поддержку при проектировании сложных производственных систем, есть интерес изучить возможность ее применения на этапах коммерческого предложения – например, для создания предварительных моделей, позволяющих на ранних стадиях визуализировать ожидаемые результаты и принимать ключевые решения. Другим важным аспектом является применение виртуальной реальности на таких этапах жизненного цикла системы, как обучение персонала и техническое обслуживание, а также интеграция с процессами оптимизации производства (компоновка оборудования и повышение производительности линии).

Список источников

1. Мартеха А.Н., Бабкина А.В., Торопцев В.В. и др. Цифровые двойники на основе виртуальной реальности как инструмент компоновки технологических комплексов // *XI Международная научно-техническая конференция «Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений» (Воронеж, 4-5 июля 2024 г.)*. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2024. С. 288–291. EDN: EPJKVM

2. Филюшина Е.В., Васильева В.А., Болдырев В.В., Тихоненко Д.В. Инструменты и методы управления ИТ-проектами для успешности их реализации // *Наука и бизнес: пути развития*. 2023. № 9 (147). С. 26–28. EDN: RUSCZP

3. Akpan I., Offodile O. The Role of Virtual Reality Simulation in Manufacturing in Industry 4.0. *Systems*. 2024;12(1):26. <https://doi.org/10.3390/systems12010026>

4. Ашмарина Т.И., Бирюкова Т.В., Водяников В.Т. и др. *Цифровая трансформация агропромышленного комплекса*: Монография. Москва: Мегapolis, 2022. 160 с. EDN: NQIZTT
5. Кислицкий М.М., Миронов Д.А., Лылов А.С. Цифровые двойники сельскохозяйственных машин и оборудования в системе обеспечения продовольственной безопасности: значение и перспективы // *Теория и практика мировой науки*. 2022. № 12. С. 27–29. EDN: NHXIAW
6. Konstantinova A., Ivchenko V., Bakhonka V. et al. Methodological Basis of Virtual Reality Technology Application in Industrial Design. *Science & Technique*. 2021;20:465–475. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-465-475>
7. Жолобова А.И., Ергунова О.Т. Использование цифровых двойников в сельском хозяйстве // *Вопросы отраслевой экономики*. 2023. № 2 (2). С. 31–39. <https://doi.org/10.24888/2949-2793-2023-2-31-39>
8. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 4. С. 14–25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>
9. Martínez-Gutiérrez A., Díez-González J., Verde P. et al. Convergence of Virtual Reality and Digital Twin Technologies to Enhance Digital Operators' Training in Industry 4.0. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023;180:103136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>
10. Землянов Г.С., Ермолаева В.В. 3D-моделирование // *Молодой ученый*. 2015. № 11 (91). С. 186–189. URL: <https://moluch.ru/archive/91/18642/> (дата обращения: 21.06.2025)
11. Завистовский Д.Н., Суханцов А.М., Чубаров Ф.Л. Применение технологий компьютерного проектирования и 3D-моделирования в сельском хозяйстве // *Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 110-летию со дня рождения И.С. Кауричева (Москва, 14 декабря 2023 г.)*. Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. С. 52–56. EDN: RMADKD
12. Mahmood K., Otto T., Chakraborty A. Layout Planning and Analysis of a Flexible Manufacturing System Based on 3D Simulation and Virtual Reality. *Procedia CIRP*. 2023;120:201–206. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>
13. Цифровой двойник линии по производству сыров на основе технологии виртуальной реальности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617417 Российская Федерация / А.В. Бабкина, А.Н. Мартеха, О.С. Пучкова, В.В. Торопцев. 2025. EDN: RGINQZ
14. Бабкина А.В., Мартеха А.Н., Торопцев В.В. и др. Создание цифрового двойника линии по производству сыров на основе технологии виртуальной реальности // *Техника и оборудование для села*. 2024. № 11 (329). С. 33–36. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-11-33-36>
15. Абрамов В.И., Кашироков А.С. Перспективы развития управления регионом с использованием цифровых двойников // *11-я Международная научно-практическая конференция «Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы и пути их решения» (Курск, 24-25 июня 2021 г.)*. Курск: Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Курский филиал, 2021. Т. 1. С. 11–19. EDN: CYVVOR

References

1. Martekha A.N., Babkina A.V., Toroptsev V.V. et al. Digital twins based on virtual reality as a tool for the layout of technological complexes. *XI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya 'Novoe v tekhnologii i tekhnike funktsionalnykh*

produktov pitaniya na osnove mediko-biologicheskikh vozzreniy.' July 04-05, 2024. Voronezh, Russia: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2024:288-291. (In Russ.)

2. Filyushina E.V., Vasileva V.A., Boldyrev V.V., Tikhonenko D.V. IT project management tools and techniques for successful project implementation. *Science and Business: Ways of Development*. 2023;(9(147)):26-28. (In Russ.)

3. Akpan I., Offodile O. The Role of Virtual Reality Simulation in Manu-facturing in Industry 4.0. *Systems*. 2024;12(1):26. <https://doi.org/10.3390/systems12010026>

4. Ashmarina T.I., Biryukova T.V., Vodyannikov V.T. et al. *Digital transformation of the agro-industrial sector: a monograph*. Moscow, Russia: Megapolis, 2022:160. (In Russ.)

5. Kisliitsky M.M., Mironov D.A., Lylov A.S. Digital twins of agricultural machinery and equipment in the food security system: significance and prospects. *Theory and Practice of the World Science*. 2022;(12):27-29. (In Russ.)

6. Konstantinova A., Ivchenko V., Bakhonka V. et al. Methodological Basis of Virtual Reality Technology Application in Industrial Design. *Science & Technique*. 2021;20:465-475. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-465-475>

7. Zholobova A.I., Ergunova O.T. The usage of digital twins in agriculture. *Voprosy otraslevoy ekonomiki*. 2023;(2(2)):31-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.24888/2949-2793-2023-2-31-39>

8. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Agricultural Engineering*. 2023;25(4):14-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>

9. Martínez-Gutiérrez A., Díez-González J., Verde P. et al. Convergence of Virtual Reality and Digital Twin Technologies to Enhance Digital Operators' Training in Industry 4.0. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023;180:103136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>

10. Zemlyanov G.S., Ermolaeva, V.V. 3D modeling. *Molodoy Ucheniy*. 2015;(11(91)):186-189. (In Russ.) URL: <https://moluch.ru/archive/91/18642/> (accessed: June 21, 2025).

11. Zavistovskiy D.N., Sukhantsov A.M., Chubarov F.L. Application of computer-aided design and 3D modeling technologies in agriculture. *Vserossiyskaya (natsionalnaya) nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennaya 110-letiyu so dnya rozhdeniya I.S. Kauricheva. December 14, 2023*. Moscow, Russia: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2024:52-56. (In Russ.)

12. Mahmood K., Otto T., Chakraborty A. Layout Planning and Analysis of a Flexible Manufacturing System Based on 3D Simulation and Virtual Reality. *Procedia CIRP*. 2023;120:201-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>

13. Certificate of state registration of a computer program No. 2025617417 (Russian Federation). Digital twin of a cheese production line based on virtual reality technology. Babkina A.V., Marteha A.N., Puchkova O.S., Toroptsev V.V., 2025. (In Russ.)

14. Babkina A.V., Martekha A.N., Toroptsev V.V. et al. Creating digital twin of the cheese production line using virtual reality technology. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;(11(329)):33-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-11-33-36>

15. Abramov V.I., Kashirokov A.S. Prospects for the development of regional management using digital twins. *II-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 'Upravleniye sotsialno-ekonomicheskim razvitiyem regionov: problemy i puti ikh resheniya.'* June 24-25, 2021. Kursk, Russia: Financial University under the Government of the Russian Federation, Kursk Branch, 2021;1:11-19. (In Russ.)

Сведения об авторах

Анастасия Валентиновна Бабкина, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: babkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5436-7348>

Василий Владимирович Торопцев, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: toroptsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

Александр Николаевич Мартеха, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: man6630@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Ольга Сергеевна Пучкова, канд. экон. наук, доцент кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: puchkova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0405-6082>

Information about the authors

Anastasia V. Babkina, CSc (Econ), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Informatics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: babkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5436-7348>

Vasily V. Toroptsev, CSc (Eng), Associate Professor at the Department of Processes and Apparatus for Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: toroptsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

Alexander N. Martekha, CSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Processes and Apparatus for Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: man6630@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Olga S. Puchkova, CSc (Econ), Associate Professor at the Department of Applied Informatics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: puchkova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0405-6082>

ЭКОНОМИКА

Концепция агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг

Николай Петрович Васильев[✉], Любовь Даниловна Протопопова,
Акулина Николаевна Крылова, Надежда Николаевна Никитина

Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М.Г. Сафронова –
обособленное подразделение Якутского научного центра Сибирского отделения РАН,
Якутск, Россия

✉ Автор, ответственный за переписку: vlnicolay@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке концепции цифрового агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг как неинвазивного и массового инструмента цифровизации сельского хозяйства, обоснованного на примере Республики Саха (Якутия). Исследования основываются на выделении особой роли аграрного сектора в социально-экономическом развитии сельских территорий региона. В Якутии около 1/3 населения проживает в сельской местности (32,4%), что выше, чем в среднем по России (25,1%) и в Дальневосточном федеральном округе (26,2%). Нетипичность выделяется среди районов Крайнего Севера и в приравненных к ним местностях (20,4%), где преимущественно наблюдается преобладающая концентрация городского населения. Однако в развитии сельского хозяйства и сельских территорий Якутии наблюдаются устойчивые тенденции, имеющие негативный характер воздействия: стагнация сельскохозяйственного производства, отток сельского населения, низкая заработная плата работников и сокращение занятых в сельском хозяйстве. Одним из инструментов минимизации этих негативных тенденций в условиях цифровизации является создание специализированной цифровой платформы. Агрегатор призван решить проблему информационной асимметрии на рынке сельскохозяйственных работ и услуг, обеспечивая эффективное совмещение спроса и предложения посредством цифровизации традиционных практик взаимопомощи, характерных для сельских сообществ. Представлены принципы функционирования агрегатора включая механизмы согласования спроса и предложения, интеграцию с порталом Госуслуг для верификации пользователей, систему безопасного проведения сделок и адаптацию к особенностям сельской местности. Особое значение имеет анализ социально-экономических условий сельских территорий Якутии, демонстрирующий необходимость подобного решения. Разработанная концепция агрегатора направлена на снижение транзакционных издержек, повышение эффективности использования ресурсов и создание дополнительных возможностей для сельского населения. В перспективе платформа может стать частью цифровой экосистемы сельского хозяйства региона.

Ключевые слова

Агрегатор услуг, сельское хозяйство, цифровизация, Республика Саха (Якутия), сельскохозяйственные работы, цифровая платформа, цифровая трансформация, кооперация

Для цитирования

Васильев Н.П., Протопопова Л.Д., Крылова А.Н., Никитина Н.Н. Концепция агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 221–233.

Agricultural services aggregator concept

Nikolai P. Vasiliev[✉], Lyubov D. Protopopova, Akulina N. Krylova, Nadezhda N. Nikitina

Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, Yakut Scientific Center, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

[✉]**Corresponding author:** v1nicolay@mail.ru

Abstract

This article is dedicated to the development of a conceptual framework for an agricultural services digital aggregator. It is presented as a non-invasive and scalable instrument for agricultural digitalization, substantiated by the case of the Republic of Sakha (Yakutia). The research is grounded in highlighting the particular role of the agrarian sector in the socio-economic development of the region's rural territories. In Yakutia, approximately one-third of the population resides in rural areas (32.4%), which is higher than the average across Russia (25.1%) and the Far Eastern Federal District (26.2%). This demographic distribution is notably atypical when compared to other regions of the Far North and equivalent territories (20.4%), where a predominant urban population concentration is typically observed. However, the development of agriculture and rural territories in Yakutia is characterized by persistent negative trends, including stagnation in agricultural production, out-migration of the rural population, low wages for workers, and declining employment in agriculture. One promising instrument for mitigating these adverse trends within the context of digitalization is the creation of a specialized digital platform. The aggregator is designed to address the problem of informational asymmetry in the agricultural services market, facilitating the efficient matching of supply and demand through the digitalization of traditional mutual assistance practices inherent to rural communities. The principles of the aggregator's operation are presented, encompassing mechanisms for demand-supply alignment, integration with the State Services portal for user verification, a secure transaction processing system, and adaptation to the specific characteristics of rural areas. Particular emphasis is placed on the analysis of the socio-economic conditions of Yakutia's rural territories, which underscores the imperative for such a solution. The developed aggregator concept aims to reduce transaction costs, enhance resource utilization efficiency, and generate additional opportunities for the rural population. In the long term, the platform has the potential to become an integral component of the region's digital agricultural ecosystem.

Keywords

Services aggregator, agriculture, digitalization, Republic of Sakha (Yakutia), agricultural operations, digital platform, digital transformation, cooperation

For citation

Vasiliev N.P., Protopopova L.D., Krylova A.N., Nikitina N.N. Agricultural services aggregator concept. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 221–233.

Введение Introduction

В условиях глобальной цифровой трансформации, охватившей все сферы экономики, сельское хозяйство России остается одной из наименее цифровизированных отраслей. При этом исследования отечественных авторов показывают, что

именно аграрный сектор обладает высоким потенциалом для внедрения цифровых технологий [1–3]. Они демонстрируют, что умные технологии успешно внедряются в крупных агрохолдингах, где масштаб производства оправдывает многолетние инвестиции в их разработку и интеграцию [4]. Однако для малых и средних хозяйств такие решения часто недоступны по причине высоких затрат на внедрение, отсутствия инфраструктуры и короткого горизонта планирования [5], что аналогично с выводами зарубежных авторов. В отличие от крупных предприятий эти хозяйства фокусируются на операционных задачах, когда задержки или ошибки могут привести к критическим потерям.

Парадоксально, но форсированная цифровизация в условиях слаборазвитой инфраструктуры может принести больше вреда, чем пользы. Тем не менее адаптация к цифровым технологиям неизбежна и необходима для устойчивого развития отрасли. В этом контексте ключевым решением становится внедрение неинвазивных цифровых инструментов – решений, которые не требуют модификации производственных процессов, но оптимизируют взаимодействие участников рынка. Ярким примером служат цифровые торговые площадки (маркетплейсы), позволяющие малым сельхозпроизводителям реализовывать продукцию без значительных затрат на маркетинг [6]. Аналогичный подход может быть применен для координации спроса и предложения на сельскохозяйственные работы и услуги, особенно в условиях фрагментированного рынка.

Целью исследований являлась разработка концепции агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг – цифровой платформы, которая устраняет информационную асимметрию и соединяет участников рынка в режиме реального времени. В отличие от сложных инвазивных систем агрегатор не требует изменения производственных процессов или дорогостоящего оборудования. Его ключевые преимущества заключаются в следующем:

- снижение транзакционных издержек для малых хозяйств;
- оперативное закрытие дефицита ресурсов (рабочая сила, техника);
- монетизация простаивающих активов.

На примере Республики Саха (Якутия) представлено, как подобная платформа может компенсировать вызовы, связанные с территориальной разобщенностью, сезонностью и низкой плотностью населения. Актуальность исследований обусловлена необходимостью сохранения сельских территорий и повышения эффективности аграрного сектора в экстремальных климатических условиях с применением цифровых технологий.

Цель исследований: разработка концепции агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг – цифровой платформы, которая устраняет информационную асимметрию и соединяет участников рынка в режиме реального времени.

Методика исследований

Research method

Методологическую основу работы составили анализ статистических данных Росстата и ее территориального органа по РС (Я), отчет Правительства РС (Я), данные Министерства сельского хозяйства и продовольственной политики РС (Я) и научных публикаций. Использованы методы: сравнительного анализа, аналогий и абстрактно-логического моделирования.

Сравнительный анализ использован для сопоставления социально-экономических показателей развития сельского хозяйства и сельских территорий Якутии с другими регионами России, что позволило выявить региональную специфику.

Метод аналогий применен для адаптации успешных практик из смежных и обособленных областей к условиям сельского хозяйства, что дает возможность перенять проверенные технологические и бизнес-модели из других секторов экономики. Абстрактно-логическое моделирование применено для системного и комплексного проектирования концепции агрегатора с учетом выявленных региональных особенностей. Комбинация методов обусловлена необходимостью учета специфики региона, минимизации рисков внедрения через адаптацию проверенных решений и обеспечения системности.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Республика Саха (Якутия) представляет собой уникальный регион с точки зрения сельскохозяйственного производства. Как крупнейший субъект Российской Федерации площадью более 3 млн км², она характеризуется экстремальными климатическими условиями и сложной системой расселения. Административно-территориальное деление Республики отражает эту специфику: 34 муниципальных района (из которых 13 относятся к Арктической зоне РФ), 361 сельское поселение и 582 сельских населенных пункта при общей плотности населения 0,32 чел/км².

Особенно выражена территориальная дисперсность в арктических районах, где на 52,2% территории проживает лишь 6,4% населения с плотностью 0,05 чел/км². Такая пространственная организация создает существенные барьеры для развития аграрного сектора: изолированные сельские поселения сталкиваются с ограниченным доступом к инфраструктуре и сложностями координации между хозяйствами.

При этом Якутия демонстрирует парадоксальную для регионов Крайнего Севера и отнесенным к ним местностям особенность – высокую долю сельского населения (32,4%), что превышает как среднероссийский показатель (25,1%), так и уровень Дальневосточного федерального округа (26,2%). Более того, среди всех районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей, где сельское население составляет в среднем лишь 20,4%, Якутия выделяется наибольшей абсолютной численностью сельских жителей – 324,7 тыс. чел.

Такая демографическая структура формирует особый, «очаговый» характер сельскохозяйственного производства, когда относительно высокая концентрация населения в отдельных наслеге (сельских административных единицах) сочетается с огромными незаселенными пространствами [7]. Это создает одновременно и потенциал для развития локальных аграрных сообществ, и существенные трудности для создания единой системы сельхозпроизводства.

Благодаря высокой доле сельского населения, аграрный сектор сохраняет стратегическое значение для Республики Саха (Якутия) несмотря на скромный вклад в валовой региональный продукт. Удельный вес сельского хозяйства составляет лишь 1%. Республика является лидером по объему ВРП среди субъектов Дальневосточного федерального округа с общим объемом в 2,23 трлн руб. (2023 г.). Однако эта цифра не отражает реальную социально-экономическую роль отрасли для региона.

Объем сельскохозяйственной продукции в 2023 г. достиг 33,8 млрд руб., демонстрируя при этом уникальную структуру (рис. 1). В отличие от среднероссийской структуры, где доминируют сельскохозяйственные организации (средняя доля по РФ – 59,9%), в Якутии почти половина продукции (46,4%, или 15,7 млрд руб.) производится хозяйствами населения. На 10% выше доля крестьянских (фермерских) хозяйств и ИП – 24,2% (8,2 млрд руб.), а на сельхозорганизации приходится 29,4% (11,5 млрд руб.).

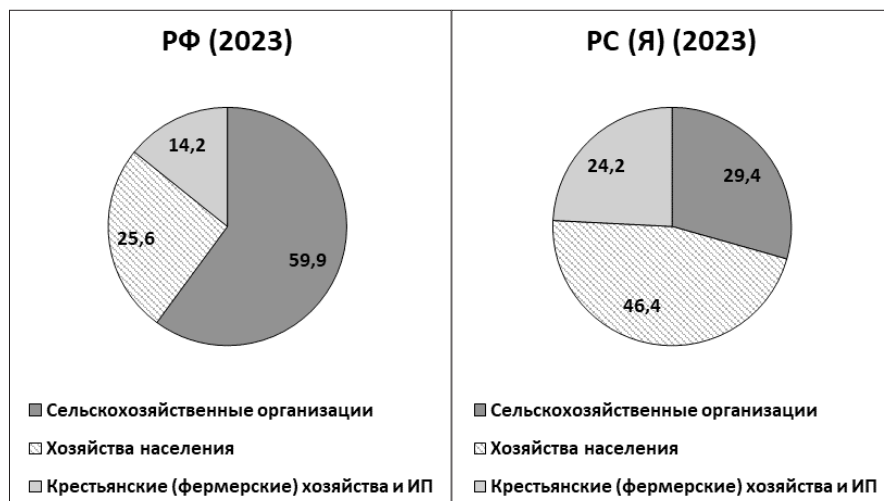


Рис. 1. Структура продукции сельского хозяйства в РФ и РС (Я) на 2023 год, %
(составлено авторами на основе данных Росстата)

Figure 1. Structure of agricultural production in the Russian Federation and the Republic of Sakha (Yakutia) in 2023, % [compiled by the authors based on Rosstat data]

Специфическая структура обусловлена исторически сложившейся системой жизнеобеспечения в экстремальных условиях и важной социальной функцией личных хозяйств в обеспечении продовольственной безопасности семей, а также ограниченными возможностями для крупного товарного производства в большинстве районов.

Состояние отрасли характеризуется неполным уровнем самообеспечения основными видами сельскохозяйственной продукции. Сельское хозяйство выполняет не только экономическую, но и важнейшие социальные функции:

- обеспечивает занятость сельского населения;
- способствует сохранению традиционного уклада жизни;
- поддерживает демографическую стабильность в сельских поселениях;
- удерживает цены завозных продуктов на приемлемом уровне [8].

За последние годы в Республике Саха (Якутия) сформировался комплекс взаимосвязанных проблем, оказывающих негативное влияние на развитие сельского хозяйства и сельских территорий. Анализ динамики за период 2012–2023 гг. свидетельствует о выраженных кризисных явлениях в отрасли.

Производственные показатели демонстрируют стагнацию: индекс физического объема сельскохозяйственного производства за 12 лет вырос всего на 1,9%. Особую тревогу вызывает значительное сокращение поголовья скота: на 26,1% для КРС (включая 21,9% для коров) и на 45,0% для свиней. В растениеводстве ситуация не лучше: посевные площади картофеля сократились на 26,1%, овощей – на 33,9%, что привело к падению валовых сборов на 1,4% и 21,2% соответственно.

Демографическая ситуация в сельской местности характеризуется устойчивым оттоком населения, составившим 3,2% (–10,9 тыс. чел.) за анализируемый период. Это особенно тревожно на фоне общего роста численности населения Республики на 4,7%. Занятость в сельском хозяйстве сократилась на 32,6%, а доля работников отрасли в общей структуре занятости уменьшилась с 8,5 до 5,4%.

Парадоксально, но при значительном росте номинальной заработной платы в 4,5 раза (до 62,2 тыс. руб. в 2023 г.) ее уровень остается самым низким среди

всех видов экономической деятельности и почти вдвое уступает средней по региону (110,2 тыс. руб.). Несмотря на то, что разрыв с общероссийскими показателями сократился (с отставания на 4,6% в 2012 г. до опережения на 14,9% в 2023 г.), внутри-региональная дифференциация доходов продолжает оставаться существенной.

Перечисленные тенденции тесно взаимосвязаны и оказывают комплексное негативное воздействие как на отрасль сельского хозяйства, так и на социально-экономическое развитие сельских территорий в целом. Сокращение производства ведет к снижению доходности, что в свою очередь провоцирует отток населения и сокращение трудовых ресурсов, создавая замкнутый круг ослабления аграрного сектора.

Для преодоления этих негативных процессов необходимо максимально задействовать все имеющиеся ресурсы и преимущества региона. Особое значение в современных условиях приобретает развитие цифровой инфраструктуры сельских территорий, которая может стать катализатором позитивных изменений. Цифровизация позволяет:

- снижать транзакционные издержки;
- оптимизировать использование ограниченных ресурсов;
- расширять доступ к рынкам сбыта [9].

Одновременно требуются меры:

- по повышению доходности сельскохозяйственной деятельности;
- по созданию привлекательных условий для жизни и работы в сельской местности;
- по сохранению и модернизации социальной инфраструктуры села.

Все предлагаемые решения должны учитывать уникальные особенности Якутии, где сельское хозяйство исторически выполняет не только экономические, но и важнейшие социальные функции, являясь основой жизнеобеспечения и сохранения традиционного уклада жизни в экстремальных северных условиях.

Современное состояние цифровизации в Республике Саха (Якутия) создает благоприятные условия для внедрения инновационных решений в сельское хозяйство. По данным статистического бюллетеня Территориального органа Росстата по РС (Я) «Сведения об информационном обществе», на конец 2023 г. в Якутии из 330,6 тыс. ед. домашних хозяйств имели доступ в Интернет 92,3%, преимущественно через смартфоны – 90,5%. Всего пользовались Интернетом 94,9% населения (в возрасте 15–74 лет), причем 88,4% делали это ежедневно. Уровень проникновения смартфонов достиг 97,6% населения, в том числе в сельской местности – 95,2%.

Анализ цифровой активности населения показывает, что 40% жителей Республики использовали Интернет для заказа товаров и услуг, причем в сельской местности этот показатель составил 34,4%. Для получения государственных и муниципальных услуг из числа взаимодействовавших с этими органами (85,7%) Интернетом пользовались 85,1% граждан включая 78,1% сельского населения. Около 90% жителей Якутии зарегистрированы на Едином портале государственных и муниципальных услуг.

По данным отчета Правительства РС(Я), за 2024 г. в Республике достигнуты значительные успехи в развитии цифровой инфраструктуры: полностью «оцифровано» 13 районов, к высокоскоростной оптоволоконной связи подключено 390 населенных пунктов (93,2% населения), а сотовая связь 3G/4G доступна в 342 населенных пунктах (92,4% населения).

Эти показатели свидетельствуют о том, что охват населения, имеющего доступ к сети Интернет, является достаточно высоким, в том числе в сельских территориях, и это создает необходимые условия для проведения неинвазивной цифровизации.

Сложившаяся ситуация с цифровой инфраструктурой позволяет рассматривать Якутию как регион с уникальными возможностями для внедрения специализированных решений в аграрном секторе.

Основные преимущества текущего состояния цифровизации включают в себя:

- высокую распространенность мобильных устройств;
- широкий охват интернет-связью;
- активно формирующуюся культуру использования цифровых сервисов среди сельского населения.

Достигнутый уровень цифровизации создает условия для внедрения цифровых решений, ориентированных на региональную специфику. Это позволяет разрабатывать платформенные инструменты, способные минимизировать последствия территориальной разобщенности и повышать эффективность использования ограниченных ресурсов.

Особую актуальность в данном контексте приобретают агрегаторные решения, сочетающие технологическую доступность с адресным преодолением отраслевых проблем.

Агрегатор сельскохозяйственных работ и услуг представляет собой цифровую платформу, объединяющую мобильное приложение и веб-портал, предназначенную для координации взаимодействия участников аграрного сектора Республики Саха (Якутия). В условиях территориальной разобщенности и низкой плотности населения платформа призвана решить ключевую проблему эффективного совмещения спроса и предложения на сельскохозяйственные работы и услуги путем цифровизации традиционных практик взаимопомощи, характерных для сельских сообществ.

Особенностью платформы является ее универсальность: один и тот же пользователь может выступать в роли как заказчика, так и исполнителя, в зависимости от текущих потребностей и имеющихся ресурсов. Основные категории участников включают в себя владельцев личных подсобных хозяйств, самозанятых, индивидуальных предпринимателей, крестьянские (фермерские) хозяйства, сельскохозяйственные организации, а также владельцев специализированной техники и сезонных работников. При этом традиционное разделение на «исполнителей» и «заказчиков» носит ситуативный характер: фермер, имеющий избыток рабочей силы, но испытывающий нехватку техники, может одновременно размещать предложения о найме и искать необходимые услуги. Такой подход максимально отражает реальные практики взаимопомощи, сложившиеся в сельской местности.

Главная идея платформы заключается в создании саморегулируемого механизма взаимодействия, позволяющего участникам сельскохозяйственной деятельности оперативно находить друг друга и заключать сделки (рис. 2). При этом особое внимание уделяется простоте и доступности решения, когда базовый функционал агрегатора строится по аналогии с успешно зарекомендовавшими себя сервисами типа InDrive (Drivee), изначально разработанного в Якутии. Однако в отличие от универсальных агрегаторов услуг предлагаемое решение обладает выраженной отраслевой спецификой.

Платформа ориентирована на достижение социально-экономических целей:

- стимулирование развития сельских территорий за счет создания дополнительных доходных возможностей;
- повышение деловой активности в агропромышленном комплексе через легализацию теневого рынка сезонных работ;
- сокращение безработицы в сельской местности;
- формирование устойчивых связей между участниками аграрного сообщества.

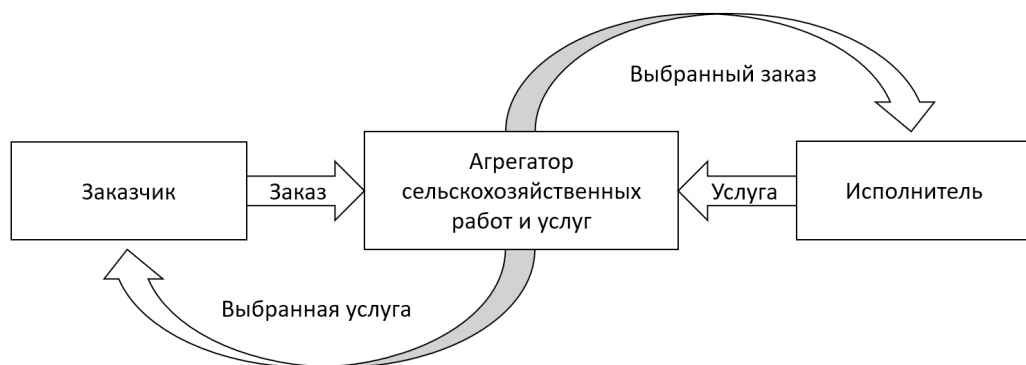


Рис. 2. Схема функционирования агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг (составлено авторами)

Figure 2. Functional scheme of the agricultural services aggregator [compiled by the authors]

Технологическая реализация должна иметь:

- минималистичный интерфейс для пользователей с разным уровнем цифровой грамотности;
- возможность работы в офлайн-режиме с последующей синхронизацией данных;
- интеграцию с порталом Госуслуг для верификации участников.

Важной концептуальной особенностью является ориентация на существующую цифровую инфраструктуру региона и массовую распространенность смартфонов, что делает решение доступным для большинства потенциальных пользователей даже в отдаленных районах. Например, фермер из Мегино-Кангаласского улуса может через приложение найти владельца культиватора в своем селе, нанять студентов на уборку урожая или сдать в аренду простаивающую морозильную камеру, реализуя, таким образом, принципы ресурсной кооперации в цифровой среде.

Для обеспечения безопасности и прозрачности сделок платформа должна предусматривать:

1. Авторизацию через Госуслуги, что упростит регистрацию (учитывая высокую долю зарегистрированных пользователей в Якутии) и повысит доверие к сервису.
2. Юридически значимые сделки – автоматическую генерацию электронных договоров, актов приема-передачи и чеков. Это позволит участникам компенсировать расходы через господдержку (если такие программы будут предусмотрены).
3. Систему безопасных сделок (аналог эскроу) – резервирование средств заказчика до подтверждения выполнения работ, что снизит риски недобросовестности.

Агрегатор охватывает 4 ключевых формата взаимодействия:

1. Постоянный или временный найм работников (аналог цифровой биржи труда для аграрного сектора). Аграрная специализация платформы упростит поиск и позволит более оперативно найти работника или работодателя. Поиск через сервис Хедхантер (Headhunter) обойдется существенно дороже.
2. Сезонные работы с гибким календарем (например, уборка урожая, кормозаготовка).
3. Специализированные единовременные услуги (вспашка, транспортировка, аренда техники).
4. Срочные заказы (аварийные ситуации, оперативная помощь).

Особую актуальность имеют услуги, связанные с услугами и (или) работами с техникой, так как малые хозяйства редко могут позволить себе дорогостоящее

оборудование. Агрегатор позволяет монетизировать простаивающие ресурсы (например, трактор в ЛПХ) и снижать издержки за счет кооперации.

Пилотное тестирование можно провести в одном из 13 полностью оцифрованных районов. С точки зрения многих аспектов наиболее подходящим является МР «Мегино-Кангаласский улус» – центральный сельскохозяйственный район, лидер по продукции сельского хозяйства и по многим другим показателям среди муниципальных районов. В 2023 г. объем продукции сельского хозяйства составил 2,9 млрд руб., или 8,7% от всей продукции Республики; развиты все направления сельского хозяйства за исключением северного домашнего оленеводства. Выбор района также обусловлен тем, что структура продукции приближена к общереспубликанской, доминируют хозяйства населения (59,4%), больше 1/4 приходится на К(Ф)Х и ИП (27,9%), мала доля сельскохозяйственных организаций (12,8%).

Территория составляет 11,7 тыс. км² – это самый маленький по площади район в Республике, но один из самых густонаселенных: 32,9 тыс. чел., в том числе 27,6 тыс. чел. – сельское население (83,9%). По административно-территориальному устройству она подразделена на максимальное количество муниципальных образований в Якутии (31), в том числе одно городское поселение и 30 наслегов (сельских поселений), всего 35 сельских населенных пунктов.

По данным Министерства сельского хозяйства и продовольственной политики РС (Я), на 2023 г. в Мегино-Кангаласском улусе количество ЛПХ превышало 1,3 тыс. ед., практически 10% от их общего количества по Республике, К(Ф)Х и ИП – 195. Действовало 11 сельхозорганизаций, 18 сельхозпотребкооперативов и одна обслуживающая организация. Район имеет максимальное разнообразие форм хозяйствования.

Внедрение платформы может:

- снизить барьеры для ведения ЛПХ за счет доступности услуг;
- легализовать теневой рынок сезонных работ;
- повысить доходность малых хозяйств через кооперацию;
- укрепить доверие к цифровым решениям среди сельского населения.

Разработка и внедрение цифрового агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг в условиях Республики Саха (Якутия) сопряжены с рядом технологических, экономических и социально-организационных рисков, которые необходимо учитывать для обеспечения устойчивости платформы.

К основному технологическому риску можно отнести нестабильность и недоступность связи в части районов. Несмотря на высокий охват Интернетом в целом по Республике, в арктических районах и некоторых сельских поселениях сохраняются проблемы, связанные с качеством связи (низкая скорость, частые разрывы) или с ее отсутствием. Это может ограничивать использование платформы в реальном времени. Однако цифровая инфраструктура РС (Я) постоянно развивается, охват возрастает довольно быстрыми темпами, и если качество связи будет повышаться подобными темпами, то риск снизится. Также стоит отметить, какими темпами развиваются технологии глобально, с развитием они становятся более доступными и, возможно, появятся аналоги или станут доступными такие технологии, как Starlink, которые позволяют охватить удаленные и труднодоступные территории.

В качестве другого технологического риска можно отметить низкую цифровую грамотность среди старшего поколения, которое является частью целевой аудитории. Этот риск можно смягчить на этапе разработки, создав более понятный и упрощенный интерфейс, а также организацией обучения через органы местного самоуправления.

К основным экономическим рискам можно отнести ограниченную платежеспособность сельского населения и сезонность спроса. Однако реализация проекта

предполагает борьбу с этими рисками. В несезонный период в сельских территориях существует множество бытовых задач, которые может решить подобный агрегатор, начиная с заготовки дров и льда.

К социально-организационным рискам можно отнести недостаток доверия к цифровым платформам и юридические сложности. С учетом того, что культура использования цифровых инструментов повышается (рост использования сервиса заказов, агрегаторов такси, государственных и муниципальных услуг) и предполагается авторизация через Госуслуги, данный риск саморегулируется. Юридические сложности – более существенный риск, так как некоторые услуги могут потребовать соблюдения норм. Чтобы минимизировать риски, необходима соответствующая институциональная поддержка.

Для реализации подобного проекта в условиях Якутии, учитывая социально ориентированную цель и мультизадачный (межотраслевой) характер, институциональную поддержку могут оказать исполнительные органы власти – в частности, профильные министерства и их подведомственные учреждения:

- Министерство сельского хозяйства и продовольственной политики РС (Я);
- Министерство инноваций, цифрового развития и инфокоммуникационных технологий РС (Я);
- Министерство предпринимательства, торговли и туризма РС (Я);
- Министерство труда и социального развития РС (Я).

Это также обусловлено обеспечением безопасности личных данных пользователей, так как предполагается авторизация через Госуслуги. Агрегатор можно включить в качестве одного из проектов в области сельского хозяйства в Стратегии в области цифровой трансформации отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления РС (Я). В дальнейшей перспективе предполагаемое цифровое решение может стать частью цифровой экосистемы сельского хозяйства РС (Я) [10].

Выводы **Conclusions**

Проведенные исследования подтвердили актуальность создания цифрового агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг для Республики Саха (Якутия). Разработанная концепция платформы учитывает ключевые особенности региона: экстремальные климатические условия, низкую плотность населения, территориальную разобщенность и преобладание малых форм хозяйствования. Предложенное решение направлено на цифровизацию традиционных практик взаимопомощи через простой и доступный инструмент координации.

Агрегатор призван решить несколько важных задач: снижение транзакционных издержек для малых хозяйств, оперативное восполнение дефицита ресурсов (рабочей силы и техники), а также монетизацию простаивающих активов. Пилотное внедрение в Мегино-Кангаласском улусе, как наиболее репрезентативном районе, позволит протестировать работоспособность концепции перед масштабированием на другие территории.

Перспективы развития проекта связаны с интеграцией в цифровую экосистему сельского хозяйства региона, возможностью адаптации платформы для других регионов и постепенным расширением функционала. Важным преимуществом решения является его ориентация на существующие практики взаимодействия сельхозпроизводителей при минимальных требованиях к технологической инфраструктуре.

Список источников

1. Алтухов А.И., Дудин М.Н., Анищенко А.Н. Глобальная цифровизация как организационно-экономическая основа инновационного развития агропромышленного комплекса РФ // *Проблемы рыночной экономики*. 2019. № 2. С. 17–27. <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2019-2-17-27>
2. Trukhachev V., Bobrishev A., Khokhlova E. et al. Personnel Training for the Agricultural Sector in Terms of Digital Transformation of the Economy: Trends, Prospects and Limitations. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(1):2145-2155. EDN: WUHBRA
3. Бронская Ю.К., Васильева А.С., Гусманов И.У. и др. *Концептуальные основы развития национальной инновационной системы России: структурно-технологическая модернизация отечественной экономики, социально-экономические и технологические факторы развития*: Монография. Самара: НИЦ ПНК, 2025. 268 с. EDN: PBUJ CZ
4. Оборин М.С. Цифровые инновационные технологии в сельском хозяйстве // *Аграрный вестник Урала*. 2022. № 5 (220). С. 82–92. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-220-05-82-92>
5. Косточка Г.Ю. Цифровизация в агропромышленном комплексе: новые горизонты для повышения эффективности // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2024. № 11. С. 330–337. EDN: PIGDNH
6. Евсюкова Т.Г. Цифровые платформы как форма сбыта сельскохозяйственной продукции // *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2020. № 2 (59). С. 106–111. <https://doi.org/10.33938/202-106>
7. Алтухов А.И. Современные проблемы пространственного развития сельского хозяйства страны и возможные подходы к их решению // *Экономика сельского хозяйства России*. 2021. № 11. С. 2–12. <https://doi.org/10.32651/2111-2>
8. Тарасов М.Е., Малышева М.С., Тарасова-Сивцева О.М. Проблемы развития сельского хозяйства в Республике Саха (Якутия) // *Вестник АГАТУ*. 2024. № 2 (14). С. 122–132. EDN: JLARLI
9. Асанова Н.А., Исачкова Л.Н., Хут С.Ю. Устойчивое развитие потребительской кооперации как инновационная модель развития сельских территорий в условиях цифровизации экономики // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2021. № 37 (5). С. 27–34. <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2021-537-27-34>
10. Васильев Н.П., Протопопова Л.Д., Даянова Г.И., Крылова А.Н. и др. Формирование единой цифровой платформы сельского хозяйства региона / Н.П. Васильев, Л.Д. Протопопова, Г.И. Даянова, А.Н. Крылова, Н.Н. Никитина // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2024. № 1 (397). С. 53–56. https://doi.org/10.55186/25876740_2024_67_1_53

References

1. Altukhov A.I., Dudin M.N., Anishchenko A.N. Global digitalization as an organizational and economic basis for the innovative development of the agroindustrial complex of the Russian Federation. *Market Economy Problems*. 2019;(2):17-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2019-2-17-27>
2. Trukhachev V., Bobrishev A., Khokhlova E. et al. Personnel Training for the Agricultural Sector in Terms of Digital Transformation of the Economy: Trends, Prospects and Limitations. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(1):2145-2155.

3. Bronskaya Yu.K., Vasileva A.S., Gusmanov I.U. et al. *Conceptual foundations of the development of the national innovation system of Russia: structural and technological modernization of the domestic economy, socio-economic and technological factors of development: a monograph*. Samara, Russia: NITs PNK, 2025:268. (In Russ.)
4. Oborin M.S. Digital innovative technologies in agriculture. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2022;(5(220)):82-92. (In Russ.) <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-220-05-82-92>
5. Kostochka G.Yu. Digitalization in the agro-industrial complex: new horizons for improving efficiency. *Actual Issues of the Modern Economy*. 2024;(11):330-337. (In Russ.)
6. Evsyukova T.G. Digital platforms as a form of sales of agricultural products. *Ekonomika, trud, upravlenie v selskom khozyaystve*. 2020;(2(59)):106-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.33938/202-106>
7. Altukhov A.I. Modern problems of spatial development of agriculture of the country and possible approaches to their decision. *Economics of Agriculture of Russia*. 2021;(11):2-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.32651/2111-2>
8. Tarasov M.E., Malisheva M.S., Tarasova-Sivtseva O.M. Problems of agrarian sector development in Republic of Sakha (Yakutia). *Vestnik of ASAU*. 2024;(2(14)):122-132. (In Russ.)
9. Asanova N.A., Isachkova L.N., Khut S.Yu. Sustainable development of consumer products cooperation as an innovative model rural development in the context of digitalization of the economy. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*. 2021;(37(5)):27-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2309-4788-2021-537-27-34>
10. Vasiliev N.P., Protopopova L.D., Dayanova G.I., Krylova A.N. et al. Formation of a unified digital platform for the region's agriculture. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal*. 2024;(1(397)):53-56. (In Russ.) https://doi.org/10.55186/25876740_2024_67_1_53

Сведения об авторах

Николай Петрович Васильев, научный сотрудник отдела социально-экономического развития села, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М.Г. Сафронова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; 677001, Российская Федерация, г. Якутск, ул. Бестужева-Марлинского, 23, корпус 1; e-mail: vnicolay@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2954-463X>

Любовь Даниловна Протопопова, старший научный сотрудник, заведующий отделом социально-экономического развития села, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М.Г. Сафронова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; 677001, Российская Федерация, г. Якутск, ул. Бестужева-Марлинского, 23, корп. 1; e-mail: protopopovald@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9234-8666>

Акулина Николаевна Крылова, младший научный сотрудник отдела социально-экономического развития села, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М.Г. Сафронова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; 677001, Российская Федерация, г. Якутск, ул. Бестужева-Марлинского, 23, корп. 1; e-mail: akulina.krylova.80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5300-3203>

Надежда Николаевна Никитина, младший научный сотрудник отдела социально-экономического развития села, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М.Г. Сафронова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; 677001, Российская Федерация, г. Якутск, ул. Бестужева-Марлинского, 23, корп. 1; e-mail: niki_nadejda85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5626-9437>

Information about the authors

Nikolai P. Vasiliev, Research Associate at the Department of Social and Economic Development of the Village, Yakut Scientific Research Institute of Agriculture; 23/1 Bestuzheva-Marlinskogo St., Yakutsk, 677001, Russian Federation; e-mail: vlnicolay@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2954-463X>

Lyubov D. Protopopova, Senior Research Associate, Head of the Department of Socio-Economic Development of the Village, Yakut Scientific Research Institute of Agriculture; 23/1 Bestuzheva-Marlinskogo St., Yakutsk, 677001, Russian Federation; e-mail: protopopovald@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9234-8666>

Akulina N. Krylova, Junior Research Associate at Department of Socio-Economic Development of the Village, Yakut Scientific Research Institute of Agriculture; 23/1 Bestuzheva-Marlinskogo St., Yakutsk, 677001, Russian Federation; e-mail: akulina.krylova.80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5300-3203>

Nadezhda N. Nikitina, Junior Research Associate at the Department of Social and Economic Development of the Village Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, Yakut Scientific Research Institute of Agriculture; 23/1 Bestuzheva-Marlinskogo St., Yakutsk, 677001, Russian Federation; e-mail: niki_nadejda85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5626-9437>

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ТИМИРЯЗЕВКИ

<i>Пржевальский Н.М., Токмаков Г.П.</i> К 95-летию профессора Игоря Иоганновича Грандберга (1930–2011)	5
--	---

АГРОХИМИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ

<i>Доня Д.В., Устинова Ю.В., Просин М.В., Хамитов Р.С., Хамитова С.М., Мырксина Ю.А.</i> Возможность применения реологических исследований при определении структурно-механических свойств почвы.....	14
<i>Занилов А.Х., Леишенов А.М., Конова С.Р.</i> Экономическое и климатическое обоснование приема биоактивации почвы для развития органического земледелия в Кабардино-Балкарской Республике	25

БОТАНИКА, ПЛОДОВОДСТВО

<i>Григорьева Л.В., Кузнецова Т.А., Зубков А.В.</i> Влияние препарата Изабион на компоненты продуктивности растений малины ремонтантного типа плодоношения	39
<i>Самощенко Е.Г., Фесютин И.А., Соловьев А.В., Буланов А.Е., Акимов С.В.</i> Аэрозольный способ применения регулятора корнеобразования при зеленом черенковании подвоев косточковых культур	52

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

<i>Алжарамани Н., Монахос С.Г.</i> Технология протопластов и соматическая гибридизация в семействе Аріасеae	68
---	----

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

<i>Волкова Г.В., Яхник Я.В., Кустадинчев А.Д.</i> Эффективность применения биологических фунгицидов против корневой гнили ячменя озимого на юге России.....	79
<i>Демидова А.П., Белошапкина О.О., Корякина О.В.</i> Основные инфекционные болезни злаковых трав, используемых для создания спортивных газонов, и методы борьбы с ними (обзор).....	92
<i>Попов С.Я., Смирнов А.Н.</i> Сохранность возбудителей болезней томата и сопутствующих микроорганизмов на шпалерах после трехлетней перезимовки	114
<i>Тараканов Р.И., Медведева В.В., Евсеев П.В., Савоськина О.А., Чебаненко С.И., Джалилов Ф.С.</i> Белая гниль сои: особенности патогенеза, биологические свойства патогена и меры защиты	127

ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

<i>Воронина О.А., Игнатьева Л.П., Зайцев С.Ю.</i> Оценка компонентного состава молока коров симментальской породы в связи с питательной ценностью кормов.....	149
<i>Дюльгер Г.П., Лазарев Д.И., Акчурин С.В., Акчурина И.В., Бычков В.С., Свистунов Д.В.</i> Трансплантация in vivo эмбрионов в коневодстве: исторические данные и современное состояние.....	160
<i>Ильина Л.А., Малахов И.Г., Заикин В.А., Лаптев Г.Ю., Морозов В.Ю., Скляров С.П.</i> Влияние штаммов <i>Enterococcus faecium</i> и <i>Bacillus subtilis</i> на микробиоту и питательность силоса из злаково-бобовой травосмеси.....	174
<i>Эртуев М.М., Прохоров И.П., Шеховцев Г.С., Соловьева О.И., Калмыкова О.А.</i> Влияние гравитации, гормонов, функциональных нагрузок на дифференцированный рост мускулов телок.....	192

ЭКОНОМИКА

<i>Бабкина А.В., Торопцев В.В., Мартеха А.Н., Пучкова О.С.</i> Проектирование цифрового двойника Тимирязевской сыроварни с использованием технологии виртуальной реальности.....	209
<i>Васильев Н.П., Протопопова Л.Д., Крылова А.Н., Никитина Н.Н.</i> Концепция агрегатора сельскохозяйственных работ и услуг.....	221

CONTENTS

SCIENTISTS OF TIMIRYAZEV ACADEMY

<i>Przhevalskiy N.M., Tokmakov G.P.</i> On the 95th anniversary of Professor Igor I. Grandberg (1930–2011)	5
---	---

AGROCHEMISTRY, SOIL SCIENCE, ECOLOGY

<i>Donya D.V., Ustinova Yu.V., Prosin M.V., Khamitov R.S., Khamitova S.M., Myrksina Yu.A.</i> Potential applications of rheological studies in determining soil structural-mechanical properties	14
<i>Zanilov A.Kh., Leshkenov A.M., Konova S.R.</i> Economic and climatic justification for soil bioactivation practices to develop organic farming in the Kabardino-Balkarian Republic.....	25

BOTANY, POMICULTURE

<i>Grigorieva L.V., Kuznetsova T.A., Zubkov A.V.</i> Effect of Isabion on productivity components of remontant raspberries	39
<i>Samoshenkov E.G., Fesyutin I.A., Solovyov A.V., Bulanov A.E., Akimova S.V.</i> Aerosol application of a rooting regulator for herbaceous cuttings of stone fruit rootstocks.....	52

GENETICS, BIOTECHNOLOGY, BREEDING AND SEED PRODUCTION

<i>Aljaramany N., Monakhos S.G.</i> Protoplast technology and somatic hybridization in the Apiaceae family	68
---	----

AGRONOMY, CROP PRODUCTION, PLANT PROTECTION

<i>Volkova G.V., Yakhnik Ya.V., Kustadinchev A.D.</i> Efficacy of biological fungicides against winter barley root rot in the south of Russia	79
<i>Demidova A.P., Beloshapkina O.O., Koryakina O.V.</i> Main infectious diseases of grasses used in sports turf and their control: a review	92
<i>Popov S.Ya., Smirnov A.N.</i> Persistence of tomato pathogens and associated microorganisms on trellises after three years of overwintering	114
<i>Tarakanov R.I., Medvedeva V.V., Evseev P.V., Savoskina O.A., Chebanenko S.I., Dzhalilov F.S.-U.</i> Soybean white mold: pathogenesis features, biological properties of the pathogen, and control methods	127

LIVESTOCK BREEDING, BIOLOGY AND VETERINARY MEDICINE

<i>Voronina O.A., Ignatieva L.P., Zaitsev S.Yu.</i> Evaluation of Simmental cow milk component composition in relation to feed nutritional value.....	149
<i>Dyulger G.P., Lazarev D.I., Akchurin S.V., Akchurina I.V., Bychkov V.S., Svistounov D.V.</i> <i>In vivo</i> embryo transfer in horse breeding: historical data and current status.....	160
<i>Ilina L.A., Malakhov I.G., Zaikin V.A., Laptev G.Yu., Morozov V.Yu., Sklyarov S.P.</i> Effect of <i>Enterococcus faecium</i> and <i>Bacillus subtilis</i> strains on the microbiota and nutritional value of grass-legume silage	174
<i>Ertuev M.M., Prokhorov I.P., Shekhovtsev G.S., Solovyova O.I., Kalmykova O.A.</i> Effect of gravity, hormones, and functional loads on the differentiated muscle growth of heifers.....	192

ECONOMICS

<i>Babkina A.V., Toroptsev V.V., Martekha A.N., Puchkova O.S.</i> Designing a digital twin of the Timiryazev Cheese Dairy using virtual reality technology.....	209
<i>Vasiliev N.P., Protopopova L.D., Krylova A.N., Nikitina N.N.</i> Agricultural services aggregator concept	221

Журнал «ИЗВЕСТИЯ ТИМИРЯЗЕВСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ»

e-mail: izvtsha@rgau-msha.ru

тел.: (499) 976–07–48

Подписано в печать 19.01.2025 г. Формат 70×100/16 Бумага офсетная
Гарнитура шрифта «Times New Roman» Печать офсетная. 14,87 печ. л.
Тираж 500 экз.

Отпечатано в ООО «ЭйПиСиПублишинг»
127550, г. Москва, Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8
Тел.: (499) 976–51–84