Индекс 70390

Известия ТСХА. 2025. № 2

ИЗВЕСТИЯ ТСХА 2026 2

ИЗВЕСТИЯ

ТИМИРЯЗЕВСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ

2

Москва 2026

ISSN 0021-342X

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
2
март–апрель

Москва
Издательство РГАУ-МСХА
2026

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. Шувариков;**
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, 2026
© Издательство РГАУ-МСХА, 2026

ISSN 0021-342X

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

2

March–April

Moscow
Publishing house of Russian Timiryazev State Agrarian University
2026

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. Grikshas,** 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 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

© Federal State Budget Establishment of Higher Education –
Russian Timiryazev State Agrarian University, 2026
© Publishing House of Russian Timiryazev Agrarian University, 2026

Научная статья
УДК 94(470+571):63:378(091)
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-5-19

УЧЕНЫЕ ТИМИРЯЗЕВКИ

Тимирязевская академия в историческом пространстве России: преемственность поколений и трансформация научных школ

Владимир Иванович Трухачев, Александр Борисович Оришев✉, Руслан Асланович Тлепцок

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

✉**Автор, ответственный за переписку:** Orishev71@mail.ru

Аннотация

Цель представленных исследований заключается в комплексном историческом анализе эволюции Тимирязевской академии (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) с момента ее основания в 1865 г. по настоящее время, выявлении закономерностей преемственности научных и образовательных традиций, а также в обобщении опыта адаптации аграрного образования к политическим, социальным и экономическим вызовам различных эпох включая репрессии, войны, реформы и кризисы. Методологическую основу работы составили принципы историзма и системности, реализованные через проблемно-хронологический, историко-генетический, сравнительно-исторический и институциональный подходы, а также критический анализ архивных источников из фондов ГАРФ, РГАЭ, ЦИАМ, ЦАМО и Музея истории ТСХА, что позволило реконструировать достоверную картину прошлого, свободную от конъюнктурных наслоений предшествующей историографии. В результате исследований впервые в исторической литературе представлена целостная реконструкция 160-летнего пути вуза: от либеральной Петровской земледельческой и лесной академии через жесткую регламентацию Московского сельскохозяйственного института, советские преобразования, военный подвиг и выживание в 1990-е годы до современного статуса национального достояния и инновационного лидера. Установлено, что ключевым фактором устойчивости академии стала преемственность научных школ, позволившая сохранить фундамент агрономической мысли вопреки репрессиям и идеологическому давлению, а также выявлена стратегическая триединая функция вуза на всех этапах: обеспечение продовольственной безопасности, подготовка кадров для обороны и модернизация агропромышленного комплекса. Значимость исследований определяется восполнением пробела в историографии, связанного с отсутствием обобщающих работ, охватывающих дореволюционный, советский и постсоветский периоды в единстве. Материалы статьи могут быть использованы при подготовке трудов по истории аграрного образования, в музейной и просветительской деятельности, а также при формировании стратегий развития аграрных вузов с учетом исторического опыта адаптации к кризисам, что особенно актуально в контексте современных задач обеспечения научно-технологической независимости и продовольственного суверенитета России.

Ключевые слова

Тимирязевская академия, история аграрного образования, научные школы, продовольственная безопасность, преемственность поколений, аграрная наука, исторический опыт

Благодарности
Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25–28–00498).

Для цитирования
Трухачев В.И., Оришев А.Б., Тлепцок Р.А. Тимирязевская академия в историческом пространстве России: преемственность поколений и трансформация научных школ // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 5–19.

SCIENTISTS OF TIMIRYAZEV ACADEMY

Timiryazev Academy in the historical space of Russia: continuity of generations and the transformation of scientific schools

Vladimir I. Trukhachev, Aleksandr B. Orishev✉, Ruslan A. Tleptsok

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

✉**Corresponding author:** Orishev71@mail.ru

Abstract
The study aims to conduct a comprehensive historical analysis of the evolution of the Timiryazev Academy (Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy) from its foundation in 1865 to the present day, to identify patterns of continuity in scientific and educational traditions, as well as to summarize the experience of adapting agricultural education to the political, social, and economic challenges of different eras, including repressions, wars, reforms, and crises. The methodological framework of the study is based on the principles of historicism and systemic analysis, implemented through problem-chronological, historical-genetic, comparative-historical, and institutional approaches. A critical analysis of archival sources from the collections of the State Archive of the Russian Federation (GARF), the Russian State Archive of the Economy (RGAE), the Central Historical Archive of Moscow (TsIAM), the Central Archive of the Ministry of Defence (TsAMO), and the History Museum of the Timiryazev Academy has enabled the reconstruction of a reliable historical narrative, free from the contextual layers of previous historiography. The study presents, for the first time in historical literature, a holistic reconstruction of the 160-year journey of the university – from the liberal Petrovskaya Agricultural and Forestry Academy, through the strict regulation of the Moscow Agricultural Institute, Soviet transformations, wartime heroism, and survival in the 1990s, to its current status as a national treasure and innovation leader. It establishes that the key factor in the academy's sustainability has been the continuity of scientific schools, which has preserved the foundations of agronomic thought despite repressions and ideological pressure. Additionally, the study has identified the university's strategic triune function at all stages: ensuring food security, training personnel for national defence, and modernizing the agro-industrial sector. The significance of the study lies in filling a gap in historiography, where no comprehensive works have previously covered the pre-revolutionary, Soviet, and post-Soviet periods as a unified whole. The materials of the article can be used in preparing works on the history of agricultural education, in museum and educational activities, and in developing strategies for the advancement of agricultural universities, taking into account the historical experience of crisis adaptation. This is particularly relevant in the context of contemporary challenges related to ensuring Russia's scientific and technological independence and food sovereignty.

Keywords
Timiryazev Academy, history of agricultural education, scientific schools, food security, continuity of generations, agricultural science, historical experience

Acknowledgments
The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 25–28–00498).

For citation
Trukhachev V.I., Orishev A.B., Tleptsok R.A. Timiryazev Academy in the historical space of Russia: continuity of generations and the transformation of scientific schools. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):5–19.

Введение
Introduction

Актуальность темы обусловлена ключевой ролью Тимирязевской академии в обеспечении продовольственного суверенитета и научно-технологической независимости России, что особенно значимо в условиях современных геополитических вызовов и санкционного давления. Являясь не просто старейшим аграрным вузом, а фундаментальным явлением российской истории, академия накопила уникальный опыт подготовки кадров и научных открытий, который напрямую влияет на способность страны решать проблемы импортозамещения и развития сельских территорий. Исследование ее исторического вклада позволяет проследить преемственность поколений ученых и сформулировать стратегические приоритеты, необходимые для модернизации агропромышленного комплекса, что делает анализ прошлого и будущего этого учреждения важнейшим условием для устойчивого развития России.

В 2025 г. Тимирязевская академия отметила свой 160-летний юбилей. Столь богатая история не могла остаться незамеченной: на протяжении десятилетий академия служит объектом пристального изучения для многих поколений исследователей. В обширной литературе можно выделить несколько блоков.

Первый блок – это юбилейные издания. К юбилеям академии, как правило, приурочивался выпуск работ, подводивших итоги очередного исторического этапа. Подобные труды носят преимущественно научно-популярный характер. Типичным для них является освещение исключительно позитивных сторон и триумфов, тогда как различные трудности и коллизии, как правило, остаются за рамками повествования. Опуская обзор юбилейных работ, скажем о том, что последнее подобное издание вышло к 160-летию вуза [1].

Второй блок – литература, посвященная анализу деятельности конкретных факультетов и кафедр академии [2-4]. В этом блоке отдельную нишу занимают работы, фокусирующиеся на изучении конкретных направлений исследовательской работы, проводившихся в вузе [5-7].

Третий блок – биографические исследования, объектом которых являются выдающиеся деятели академии: К.А. Тимирязев [8, 9], В.Р. Вильямс [10], И.А. Стебут [11], И.А. Каблуков [12]. Начиная с 1990-х гг. в центр внимания исследователей все чаще ставились судьбы репрессированных ученых Тимирязевки: Н.И. Вавилова [13], Н.Д. Кондратьева [14], А.В. Чаянова [15] и др.

Нельзя не отметить, что многие работы, не исключая и биографических исследований, создавались под влиянием текущей конъюнктуры: в обзорных трудах зачастую неоправданно гипертрофировались успехи недавнего прошлого,

тогда как заслуги предшествующих поколений ученых и преподавателей занимали второй план.

Накануне 160-летнего юбилея одним из авторов настоящей статьи была предпринята попытка обобщить советский период истории РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева [16]. Однако времена Петровской академии, МСХИ, постсоветский период остались вне внимания. Настоящая работа предполагает восполнить этот пробел. При этом новизна исследований заключается не только в расширении хронологических рамок, но и во введении в научный оборот ранее не опубликованных архивных материалов.

Цель исследований: на основе комплексного исторического анализа проследить эволюцию Тимирязевской академии (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) с момента основания в 1865 г. по настоящее время, выявить закономерности преемственности научных и образовательных традиций, определить роль вуза в обеспечении продовольственной безопасности и научно-технологической независимости России, а также обобщить исторический опыт адаптации аграрного образования к вызовам различных эпох (политические репрессии, войны, реформы, экономические кризисы).

Методика исследований
Research method

Методологической основой исследований явились принципы историзма, объективности и системности, позволившие рассмотреть эволюцию Тимирязевской академии в контексте общественно-политического развития России. Достоверность и научная обоснованность выводов обеспечиваются применением комплекса взаимодополняющих методов исторического познания, среди которых центральное место занимает источниковедческий анализ. Эмпирическую базу исследований составили как опубликованные, так и впервые вводимые в научный оборот архивные материалы, репрезентирующие различные аспекты деятельности академии. Принципиальное значение имело обращение к фондам ведомственного архива – Музея истории Тимирязевской академии (МИ ТСХА АФ), где сосредоточены документы, отражающие внутреннюю жизнь вуза, кадровый состав и повседневность учебного процесса. Расширение источниковой базы за счет материалов федеральных архивов позволило реконструировать институциональный контекст и управленческие решения вышестоящих инстанций. В работе использованы документы Центрального архива Министерства обороны (ЦАМО), где отложились сведения об участии тимирязевцев в боевых действиях, а также материалы Санкт-Петербургского филиала Архива Российской академии наук, Государственного архива Российской Федерации (ГАРФ), Центрального исторического архива Москвы (ЦИАМ), содержащие пласты научной переписки и отчетов. Существенный массив информации, касающийся хозяйственно-экономической деятельности академии в различные исторические периоды, был извлечен из фондов Российского государственного архива экономики (РГАЭ). Комплексное привлечение перечисленных источников, их критическая перекрестная верификация позволили обеспечить репрезентативность источниковой базы и минимизировать субъективность интерпретаций. Проблемно-хронологический метод позволил структурировать материал по ключевым этапам развития вуза; историко-генетический метод применялся для анализа причинно-следственных связей между государственной политикой и трансформацией учебного процесса; сравнительно-исторический метод позволил сопоставить эффективность деятельности академии в различные эпохи; метод историографического анализа обеспечил

критическое осмысление литературы и выявление конъюнктурных наслоений; использование биографического метода через судьбы выдающихся ученых позволило проследить преемственность научных традиций; ретроспективный метод направил исследование на реконструкцию целостной картины прошлого, а институциональный анализ позволил изучить эволюцию организационной структуры академии в ответ на вызовы времени.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Петровская земледельческая и лесная академия (*1865-1894*). История Тимирязевской академии берет свое начало в эпоху реформ Александра II, когда перед Россией остро встал вопрос о модернизации сельского хозяйства после отмены крепостного права. 3 декабря 1865 г. состоялось торжественное открытие Петровской земледельческой и лесной академии – уникального для своего времени учебного заведения, созданного на базе Петровского-Разумовского имения, приобретенного казной у наследников графа К.Г. Разумовского. Выбор места был символичен: усадьба с ее живописными окрестностями и сохранившимся парком должна была стать идеальным пространством для соединения теории с сельскохозяйственной практикой.

Учреждение академии стало ответом на осознание правительством того факта, что без квалифицированных специалистов, способных вести хозяйство на рациональных началах, невозможен прогресс аграрного сектора. Первоначально академия задумывалась как элитарное закрытое заведение, однако уже в первые годы своего существования она обрела черты, резко отличавшие ее от казенных университетов того времени. Здесь отсутствовали обязательные программы и жесткая регламентация посещения лекций. Студенты могли свободно выбирать курсы, а основой обучения стали не догматическое заучивание, а экспериментальная работа и живое общение с наставниками.

Организатором академии стал ее первый директор – выдающийся ботаник и агроном Николай Иванович Железнов. Именно ему принадлежала идея создания при академии образцовых учебно-вспомогательных учреждений: опытного поля, фермы, метеорологической станции, ботанического сада и оранжереи. Будучи хорошо знакомым с организацией учебного процесса в вузах Европы, он большое внимание уделял библиотечному делу [17].

Профессорско-преподавательский состав был небольшим: всего 25 чел. Однако поражал его качественный состав, представленный ведущими учеными того времени. Достаточно привести перечень имен, составивших интеллектуальный фундамент нового учебного заведения: В.Е. Графф (лесоразведение), В.К. Делла-Вос (сельскохозяйственное машиностроение), П.А. Ильенков (агрохимия), А.П. Людоговский (аграрная экономика), И.А. Стебут (агрономия), А.П. Степанов (зоотехния), Я.Я. Цветков (ботаника), И.Н. Чернопятов (ветеринария), Э.Б. Шене (лесоводство), М.П. Щепкин (аграрное право и экономика). Во многом благодаря работе в Петровской академии стал известен в научных кругах К.А. Тимирязев, тогда еще молодой профессор. Именно здесь он ставил классические опыты по фотосинтезу, используя уникальные возможности парников и теплиц.

Однако со временем либеральный дух академии вступил в противоречие с охранительной политикой самодержавия. Петровка стала местом сосредоточения вольнодумной молодежи, здесь возникали студенческие кружки, читалась запрещенная литература. Это не могло не вызвать беспокойства властей. В 1889 г.

в ней было ликвидировано Лесное отделение, а в 1894 г. было принято решение о ее закрытии.

В отличие от предшественников, видевших только одну причину закрытия академии – политическую, назовем еще одну причину кардинального решения властей: низкая результативность по количеству выпускников. 20-30 человек, ежегодно выпускавшихся из академии, – это явно не та цифра, на которую рассчитывало правительство. По-видимому, такая статистика стала следствием либерального первого устава академии, когда большая часть студентов являлась по факту вольными слушателями.

Московский сельскохозяйственный институт (*1894-1917*). Закрытие Петровской академии в 1894 г. обернулось созданием на ее фундаменте нового учебного заведения – Московского сельскохозяйственного института. Учрежденный 6 июня 1894 г. по инициативе министра земледелия А.С. Ермолова, институт должен был готовить квалифицированные кадры для сельского хозяйства под жестким государственным контролем, в противовес либеральным порядкам прежней Петровки.

Институт задумывался как закрытое сословное заведение со строжайшей регламентацией жизни. Студентам запрещались любые сходки, коллективные прошения, участие в кружках и создание собственных библиотек. Обязательное проживание в общежитии сопровождалось ограничением отлучек в Москву и даже предписанием отдавать честь начальству. На лекциях присутствовала специальная инспекция.

Первоначально принимали только землевладельцев, но вскоре разрешили зачисление крестьянам, имевшим наделы. Переломным стал 1906 г., когда директор В.Р. Вильямс впервые допустил к обучению женщин, за что получил официальное замечание от властей. Высокий уровень преподавания обеспечивали выдающиеся ученые В.Р. Вильямс, Н.Я. Демьянов, И.А. Каблуков, Д.Н. Прянишников. В институте впервые создавались профильные кафедры, активно развивалась исследовательская работа студентов [18].

Несмотря на жесткий надзор, институт стал временем расцвета аграрной науки и педагогики. Здесь окончательно оформились научные школы мирового уровня, заложившие фундамент советского агрономического образования. Весной 1917 г. институту вернули историческое название – Петровская сельскохозяйственная академия, восстановив преемственность с традициями вольнолюбивой Петровки. Самыми известными выпускниками того периода стали генетик Н.И. Вавилов и экономист А.В. Чаянов.

Тимирязевка в первые десятилетия советской власти (*1917-1932*). После утверждения советской власти перед Петровской академией встала задача подготовки кадров для социалистического переустройства села. Несмотря на то, что большинство профессоров придерживались эсеровских взглядов, такие ученые, как В.Р. Вильямс, А.А. Калантар и Е.А. Богданов, поддержали большевиков, а Д.Н. Прянишников вскоре также перешел на их сторону. К.А. Тимирязев не только выступил в поддержку новой власти, но и направил В.И. Ленину свою книгу «Наука и демократия», что в 1923 г. ознаменовалось присвоением академии его имени.

Коллективу предстояло перестроить учебный процесс и провести «пролетаризацию» студенчества. Однако реформы сопровождались внутренней борьбой: в 1918-1919 гг. младшие преподаватели и студенты добивались участия в управлении вузом. Стабилизация наступила лишь в 1921 г. с восстановлением ректорского поста и факультетской системы. Новый ректор В.Р. Вильямс инициировал отчисление студентов из привилегированных слоев и открыл рабфак, который, несмотря на скепсис части академического сообщества, начал работу в декабре 1920 г. под руководством

профессора С.А. Зернова [19]. В эти годы вводились политические дисциплины, углублялась специализация, а срок обучения после неудачного трехлетнего эксперимента вернули к четырехлетнему.

Лидирующие позиции академии в системе аграрного образования обеспечивались качественным составом профессорско-преподавательской корпорации, в которой органично сочетались представители дореволюционной научной школы и исследователи нового поколения.

Фундамент естественнонаучного направления закладывался трудами Н.Я. Демьянова – основоположника отечественной агрохимической школы, и Н.Н. Худякова, чьи исследования в области сельскохозяйственной микробиологии получили мировое признание. Параллельно формировалась плеяда молодых ученых, чьи труды приобрели статус научных школ мирового уровня: Н.И. Вавилов (учение о центрах происхождения культурных растений), Н.Д. Кондратьев (теория больших циклов конъюнктуры), А.В. Чаянов (теория семейно-трудового крестьянского хозяйства).

Консолидация в стенах одного вуза исследователей, работавших на стыке естественных и общественных наук, создала уникальную синергетическую среду, позволившую рассматривать аграрную проблематику как комплексную междисциплинарную задачу.

После ухода В.Р. Вильямса в 1925 г. академию возглавляли Н.И. Муралов, И.С. Шулов и М.Е. Шефлер. В 1931 г. началась реорганизация: вуз разделили на несколько институтов, и правопреемником стал Московский институт растениеводства имени Тимирязева, затем преобразованный в Зерновой институт. Последним руководителем этого периода стал А.Н. Кузюрин, известный борьбой с «контрреволюционными теориями» репрессированных ученых. Дробление академии и преследование ее научной элиты нанесли серьезный ущерб отечественному аграрному образованию.

Десятилетие реорганизаций: *от института к главному аграрному вузу страны* (*1932-1940*). К началу 1930-х гг. в советской высшей школе обозначился кризис педагогических экспериментов предшествующего десятилетия ввиду их несоответствия задачам интенсификации народного хозяйства и растущим запросам агропромышленного комплекса. В Тимирязевской академии данный вектор трансформации выразился в отказе от бригадно-лабораторного метода, продемонстрировавшего неэффективность в части фундаментальной теоретической подготовки. Произошла реставрация классических форм организации учебного процесса с усилением роли лекций и лабораторного практикума. Одновременно были восстановлены контрольно-оценочные процедуры: введены обязательная экзаменационная сессия и институт дипломных работ. Указанные меры знаменовали возвращение к фундаментальным основаниям университетского образования и заложили основу для подготовки высококвалифицированных кадров агрономического профиля.

В 1932 г. на базе нескольких слившихся вузов был создан Сельскохозяйственный институт имени Тимирязева, который спустя 4 года вновь стал академией (СХАТ) [20]. В этот период открылись Полевая опытная станция и новые учебные хозяйства, росло число кафедр и преподавателей (со 182 до 292 чел.). Количество студентов колебалось от 2 до 2,5 тыс.

Во второй половине 1930-х гг. в контексте нарастания внешнеполитической напряженности в академии была развернута работа по усилению мобилизационной готовности студентов. Важным шагом стало учреждение в 1936 г. кафедры физической культуры, на которую возлагались задачи военно-прикладной подготовки будущих

специалистов. Параллельно в 1938 г. произошла реорганизация системы довузовской подготовки: упраздненный рабочий факультет (рабфак) передал свои функции подготовительным курсам, что отражало общесоюзную тенденцию унификации довузовского образования.

В октябре 1939 г. вуз переименовали в Московскую сельскохозяйственную академию (МСХА) и утвердили новый устав. Директорами в разное время были А.А. Бурдуков, А.И. Жагар, С.Г. Колеснев, Г.М. Овсянников, Ф.П. Платонов.

Кульминацией стало награждение академии орденом Ленина 20 февраля 1940 г. и присвоение ее территории статуса заповедника. Десятилетие завершилось осознанием необходимости единого главного аграрного вуза вместо множества разрозненных мелких учреждений.

Подвиг ученых и студентов: *Тимирязевская академия в 1941-1945 гг.* В историографии Великой Отечественной войны особое место занимает изучение вклада высших учебных заведений в обороноспособность страны и достижение Победы. Академия в тот период представляла собой пример консолидации научно-педагогического коллектива и обучающихся в условиях военного времени.

С началом боевых действий в академии наблюдалась беспрецедентная мобилизационная активность. В первые месяцы войны свыше 300 представителей академии: преподавателей, сотрудников и студентов – добровольно направились в действующую армию, что количественно превысило показатели плановой мобилизации. Значительная часть добровольцев влилась в состав дивизий народного ополчения; первый сформированный отряд отбыл на передовую 17 июля 1941 г.

Высокий уровень боевой подготовки и личных качеств воспитанников ТСХА подтверждается тем обстоятельством, что 12 представителей академии были удостоены звания Героя Советского Союза. Среди них – Б.А. Рунов, чье подразделение в мае 1945 г. осуществило пленение 700 солдат вермахта [21]. Отдельного комментария заслуживает персона В.В. Михайлина, впоследствии адмирала, чьи заслуги перед страной были отмечены высшей наградой уже в послевоенный период, что свидетельствует о преемственности боевых традиций и многогранности вклада тимирязевцев в обороноспособность государства.

Помимо участия в боевых действиях, с июля 1941 г. академия была включена в систему обороны Москвы. Материально-техническая база и кадровый потенциал ТСХА использовались для укрепления подступов к столице, что позволяет рассматривать академию не только как образовательное учреждение, но и как важный элемент оборонительной инфраструктуры. В подвалах главного корпуса разместился штаб ПВО, третий корпус стал резервным штабом обороны столицы. В других зданиях работали лаборатории, выпускавшие капсюли для мин и танковые прицелы. Общежития превратились в крупнейший госпиталь, где лечились маршалы К.К. Рокоссовский и А.И. Еременко.

Война изменила научные приоритеты: исследования были направлены на обеспечение фронта и тыла продовольствием, а промышленности – сельскохозяйственным сырьем: академик П.М. Жуковский вывел устойчивую к болезням пшеницу, П.И. Лисицын – новые сорта клевера. Благодаря усилиям ученых производство картофеля выросло в 5 раз.

В период временного размещения части учебно-научных подразделений в Самарканде коллектив Тимирязевской академии развернул масштабную научно-производственную деятельность, направленную на укрепление продовольственной базы региона. Под руководством академика Д.Н. Прянишникова профессорско-преподавательским составом были выявлены и обоснованы резервы интенсификации хлопководства – ведущей отрасли сельского хозяйства Узбекской ССР. Практическая

реализация научных рекомендаций сопровождалась значительным трудовым участием: совокупная выработка тимирязевцев превысила 100 тыс. человеко-дней. Важным направлением работы стала агрономическая диверсификация: внедрение культуры сахарной свеклы и развитие овощеводства, что позволило частично компенсировать дефицит продовольствия [22].

Параллельно с деятельностью в эвакуации головной вуз, оставшийся в Москве, обеспечивал непрерывность образовательного процесса. Несмотря на сложную оперативную обстановку, в академии проводились плановые занятия и осуществлялась аттестация научных кадров включая защиту диссертационных исследований [23].

Ключевую роль в сохранении академии как целостного научно-образовательного института сыграл ректор В.С. Немчинов, осуществлявший руководство в течение всего военного периода. В условиях острого дефицита ресурсов, мобилизации кадров и перебоев с материально-техническим снабжением им были приняты меры, позволившие не только поддерживать учебный процесс, но и обеспечить минимально необходимые бытовые условия для сотрудников, что способствовало сохранению кадрового потенциала [24].

Между целиной и угрозой закрытия: *послевоенная история Тимирязевки* (*1945-1964*). В послевоенный период Тимирязевская академия готовила агрономов, зоотехников, преподавателей и научные кадры. Активно работали курсы повышения квалификации, где с 1945 по 1965 гг. обучились свыше 15,5 тыс. чел. Срок обучения увеличили до 5 лет, усилили производственную практику: на младших курсах она занимала 30% времени, на старших – 35%.

Академия внесла большой вклад в освоение целины. Сам проект возник после докладной выпускника Тимирязевки – министра И.А. Бенедиктова. В 1954 г. освоение целины стало главной научной темой [25].

В 1960 г. академия объединилась с Институтами механизации и водного хозяйства, но через 3 года часть факультетов выделилась в самостоятельные вузы. С 1963 г. студентов начали обучать профессии механизаторов, ввели такие новые дисциплины, как использование атомной энергии, применение изотопов.

Серьезным потрясением стала августовская сессия ВАСХНИЛ 1948 г., после которой ректор В.С. Немчинов лишился должности за поддержку генетиков. В науке воцарилась монополия Т.Д. Лысенко – руководителя научного направления, вошедшего в историю как «мичуринская биология» [26], а академию возглавил В.Н. Столетов.

В 1950-е гг. Н.С. Хрущев планировал вывести академию из Москвы, что означало бы ее фактическое закрытие. Ректор Г.М. Лоза мужественно противостоял этим планам. Только после отставки Н.С. Хрущева в 1964 г. угроза миновала.

Тимирязевская академия в эпоху развитого социализма и перестройки (*1965-1991*). В 1965 г., в ознаменование 100-летнего юбилея, Тимирязевская сельскохозяйственная академия была удостоена ордена Трудового Красного Знамени. Данная государственная награда явилась официальным признанием многолетнего вклада вуза в развитие аграрного сектора и подготовку высококвалифицированных специалистов. В контексте усиления государственной поддержки агропромышленного комплекса академия заняла позиции системообразующего центра кадрового обеспечения совхозно-колхозной системы, реализуя масштабные образовательные программы.

Параллельно с решением внутригосударственных задач наблюдалась интенсификация внешнеполитических контактов. В 1960-1970 гг. вуз осуществлял планомерный обмен научными и учебными делегациями преимущественно

с социалистическими государствами Восточной Европы, что способствовало унификации образовательных стандартов в рамках СЭВ.

Качественно новый этап организационной эволюции академии наступил в 1977 г. с присвоением ей статуса учебно-научного центра. Это повлекло за собой структурную диверсификацию: было инициировано создание филиала в г. Калуге, расширен спектр реализуемых специальностей за счет внедрения биотехнологии, экологии и аграрной экономики. География международного сотрудничества претерпела существенную трансформацию: помимо традиционных связей с вузами Азии и Африки, были установлены устойчивые контакты с научными учреждениями США, ФРГ и Нидерландов, что свидетельствовало о включении академии в глобальный научно-образовательный контекст. Однако период интенсивного роста сопровождался определенными организационно-хозяйственными диспропорциями. В частности, имели место случаи несоответствия бюджетного финансирования и возможностей его освоения: при выделении средств на капитальный ремонт и реконструкцию материально-технической базы наблюдался дефицит подрядных организаций, способных выполнить работы в установленные сроки.

С началом перестройки и последующим кризисом административно-командной системы произошла ломка сложившихся механизмов функционирования аграрного сектора. Тем не менее академия продемонстрировала высокую институциональную устойчивость, адаптировав образовательные программы и научную тематику к реалиям рыночной экономики. Способность к сохранению кадрового потенциала и преемственности образовательного процесса в означенный период во многом обусловлена деятельностью ректоров: И.С. Шатилова (1963-1971), П.П. Вавилова (1971-1978) и М.И. Синюкова (1978-1993), обеспечивших поступательное развитие вуза в условиях смены экономических парадигм.

Тимирязевская академия в постсоветский период (*1991-2019*). Распад СССР стал серьезным испытанием для Тимирязевской академии. Резкое сокращение финансирования, падение престижа аграрных профессий и необходимость выживания в новых экономических условиях определили жизнь вуза на долгие годы. Однако именно в этот период были заложены основы для последующей трансформации академии в современный университетский комплекс.

Первое постсоветское десятилетие академия провела в борьбе за существование. Зарплаты преподавателей задерживались, корпуса ветшали, опытные поля приходили в запустение. Тем не менее коллектив сумел сохранить ядро научных школ и профессуры.

С улучшением экономической ситуации в стране началось возвращение государства в аграрное образование. Важной вехой в новейшей истории Тимирязевской академии стал 2005 г., ознаменовавшийся сменой организационно-правового статуса и номинации вуза. Учебное заведение было переименовано в Российский государственный аграрный университет – Московскую сельскохозяйственную академию имени К.А. Тимирязева (РГАУ-МСХА), что отражало процессы диверсификации образовательных программ и расширения академических функций.

Принципиально значимым событием, определившим особое положение университета в национальной системе образования, стал Указ Президента Российской Федерации (2008 г.), согласно которому вуз был инкорпорирован в Государственный свод особо ценных объектов культурного наследия народов России. Данный правовой акт закрепил за университетом статус учреждения, имеющего исключительное значение для сохранения и развития отечественной аграрной науки и образования.

В 2009 г. произошла консолидация международного авторитета РГАУ-МСХА: вуз был наделен функциями базовой организации государств – участников Содружества Независимых Государств (СНГ) по подготовке, повышению квалификации и переподготовке кадров в сфере аграрного образования. Присвоение данного статуса явилось официальным признанием лидирующих позиций университета на постсоветском образовательном пространстве и расширило его компетенции в области координации межгосударственных образовательных инициатив. В 2017 г. был подписан меморандум о сотрудничестве с ФАО ООН, а вуз стал базовой организацией Минсельхоза России. Однако годы реформ сопровождались острыми внутренними противоречиями. В 2016 г. возникла угроза изъятия 101 га опытных полей под застройку – земли удалось отстоять лишь после вмешательства Президента и общественного резонанса.

Тимирязевка: *инновационный рывок длиною в 7 лет.* Прорыв для Тимирязевской академии наметился 7 лет назад, когда с назначением на должность ректора В.И. Трухачева в 2019 г. был взят курс на превращение вуза в первый аграрный исследовательский университет России. За относительно небольшой период вуз совершил рывок от выживания к инновационному лидерству, став базовой организацией Минсельхоза, Федеральным центром компетенций и победителем программы «Приоритет-2030».

Структурные преобразования заменили факультеты на институты, повысив гибкость управления. Создан пояс инновационных лабораторий: от генетики до искусственного интеллекта в АПК, открытых совместно с Россельхозбанком, Росагролизингом и другими партнерами. Объем НИОКР вырос в 4,3 раза (до 1,1 млрд руб.), появилось более 60 селекционных достижений. Публикационная активность повысилась в 1,5 раза, индексы Хирша достигли рекордных значений (РИНЦ – 169, Scopus – 47). Поддержку получили 1400 молодых ученых, эффективность аспирантуры достигла 42%.

Модернизирована инфраструктура: обновлены 200 аудиторий, отреставрированы исторические корпуса, открыты обновленная Библиотека имени Железнова и «Точка кипения ТИМИРЯЗЕВКА». Оцифрован Почвенно-агрономический музей имени Вильямса.

Международная деятельность переориентировалась на страны Азии, Африки и Латинской Америки: было заключено более 100 соглашений с 22 государствами, студенты представляют 86 стран. Университет вошел в рейтинги QS, укрепил сотрудничество с ФАО. Итогом стало награждение академии орденом «За доблестный труд» к 160-летию, подтвердившее возвращение к девизу основателей: «Сделать лучше, чем везде!»

Таким образом, достигнутые показатели позволяют говорить о завершении этапа постадаптационного восстановления и переходе вуза к модели исследовательского университета, что соответствует общемировым трендам развития аграрного образования.

Выводы
Conclusions

Тимирязевская академия за свою 160-летнюю историю стала не просто старейшим аграрным вузом, а подлинным отражением судьбы России, пройдя путь от либеральной Петровки времен Александра II через жесткую регламентацию, революции, репрессии, военный героизм и выживание в 1990-е гг. до статуса национального достояния. Ключевым фактором этой уникальной устойчивости стала

преемственность научных школ, которая, несмотря на идеологическое давление и потерю выдающихся ученых в периоды репрессий, позволила сохранить фундамент отечественной агрономической мысли. На всех этапах вуз выполнял стратегическую триединую функцию: обеспечивал продовольственную безопасность страны, готовил кадры для обороны и являлся локомотивом модернизации сельского хозяйства.

Исследования подчеркивают, что способность академии к адаптации (перестройка структуры, переориентация международных связей на Восток и Юг) и отстаивание своей территориальной идентичности (спасение опытных полей) являются системными свойствами этого учебного заведения. Современный этап, ознаменовавшийся инновационным рывком после 2019 г., ростом НИОКР и возвращением к девизу основателей «Сделать лучше, чем везде!», доказывает, что инвестиции в аграрную науку остаются главным условием суверенитета России, а сама Тимирязевка, будучи особо ценным объектом культурного наследия, продолжает играть роль фундаментального явления в истории страны.

Список источников

1. Бердышев В.Е., Шитикова А.В., Акчурин С.В.., Макаров С.С. и др. *Тимирязевская академия: мы формируем будущее*. Москва: ООО «Принтлето», 2025. 240 с.

2. Гайсин Р.С. Кафедре политической экономии Тимирязевки – 150 лет // *Вопросы политической экономии*. 2015. № 2. С. 127–137. EDN: YKSJSF

3. Наумов В.Д., Каменных Н.Л. Тимирязевская школа почвоведов // *Агрохимический вестник*. 2023. № 1. С. 87–94. https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-014

4. Нефедов Б.А., Беспалова В.Г., Моторин О.А. К 20-летию кафедры «Менеджмент и маркетинг инженерно-технических систем» экономического факультета РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Управление рисками в АПК*. 2015. № 2. С. 78–85. https://doi.org/10.53988/24136573-2015-02-07

5. Беленков А.И. Опыт возделывания ячменя в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2020. № 4 (52). С. 10–16. https://doi.org/10.35694/YARCX.2020.52.4.002

6. Маловичко Л.В., Зубков А.В., Диков А.В. Влияние некоторых массовых видов птиц на урожай плодово-ягодных культур в Мичуринском саду РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Тимирязевский биологический журнал.* 2023. № 3. С. 43–50. https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-3-43-50

7. Каррум Р., Гриценко В.В. Характеристика заселения вредителями коллекции эндемичных видов пшеницы РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2025. Т. 10, № 2. С. 35–40. https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-2-35-40

8. Зайцева Н.Л. К.А. Тимирязев – великий ученый и гражданин // *Природа.* 2025. № 8 (1320). С. 51–62. https://doi.org/10.7868/S0032874X25080067

9. Mamedov A.A., Orishev A.B., Grigoryev S.L., Kotusov D.V. et al. Examining the Civic Position, Political Views and Educational Activities of Timiriazev in the Field of English Language Education. *Journal of Research in Applied Linguistics.* 2023;14(3):472-476.

10. Наумов В.Д., Каменных Н.Л. Академик, В.Р. Вильямс и его вклад в генетическое и агрономическое почвоведение // *Агрохимический вестник.* 2023. № 6. С. 89–96. https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-6-017

11. Гончаров Н.П. Роль «отца всех агрономов России» И.А. Стебута в становлении отечественного сельскохозяйственного образования и науки

// *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020. Т. 6, № 3. С. 126–150. https://doi.org/10.18699/Letters2020-6-16

12. Григорьев Н.Д. Химик, практик, учитель… Иван Алексеевич Каблуков (1857-1942) // *Мир транспорта*. 2022. Т. 20, № 1. С. 113–119. https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-1-13

13. Трускинов Э.В. Н.И. Вавилов как организатор науки // *Биосфера.* 2019. Т. 11, № 4. С. 227–232. https://doi.org/10.24855/biosfera.v11i4.515

14. Соболев В.С. Становление: Н.Д. Кондратьев и его учителя: к 125-летию со дня рождения выдающегося экономиста // *Вестник Российской академии наук*. 2017. Т. 87, № 6. С. 555–559. https://doi.org/10.7868/S0869587317060081

15. Кузнецов И.А., Гришин Е.С. А.В. Чаянов – исследователь трехполья. Предисловие публикаторов // Крестьяноведение. 2019. Т. 4, № 2. С. 57–61. https://doi.org/10.22394/2500-1809-2019-4-2-57-61

16. Оришев А.Б., Миронюк С.А., Позднякова А.С. Роль Московской сельскохозяйственной академии в формировании и развитии советской аграрной науки и высшего сельскохозяйственного образования // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «История России»*. 2025. Т. 24, № 4. С. 591–602. https://doi.org/10.22363/2312-8674-2025-24-4-591-602

17. СПФ АРАН. Ф. 4. Оп. 4. Д. 212.

18. ЦИАМ. Ф. 228. Оп. 2.

19. ГАРФ. Ф. А-2306. Оп. 1. Д. 2854.

20. РГАЭ. Ф. 7486. Оп. 19. Д. 168.

21. ЦАМО. Ф. 33. Оп. 793756. Д. 41.

22. РГАЭ. Ф. 203. Оп. 1. Д. 68.

23. ГАРФ. Ф. Р-8080. Оп. 1. Д. 988.

24. МИ ТСХА АФ. Ф. 110.

25. РГАЭ. Ф. 784. Оп. 1. Д. 57а.

26. Roll-Hansen N. The Lysenko effect: undermining the autonomy of science. *Endeavour.* 2005;29(4):143-147. https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2005.10.003

References

1. Berdyshev V.E., Shitikova A.V., Akchurin S.V., Makarov S.S. et al. *Timiryazev Academy*: *We are shaping the future*. Moscow, Russia: Printleto, 2025:240. (In Russ.)

2. Gaysin R.S. The Timiryazev University Department of Political Economy is 150 years old. *Voprosy politicheskoy ekonomiy.* 2015;(2):127-137. (In Russ.)

3. Naumov V.D., Kamennykh N.L. Timiryazev school of soil scientists. *Agrochemical Herald*. 2023;(1):87-94. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-014

4. Nefedov B.A., Bespalova V.G., Motorin O.A. On the 20th anniversary of department “Engineering and Technical Systems Management”, Faculty of Economics RSAU – MAA named after K.A. Timiryazev. *Agricultural Risk Management*. 2015;(2):78-85. (In Russ.) https://doi.org/10.53988/24136573-2015-02-07

5. Belenkov A.I. The experience of barley cultivation in the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. *Vestnik APK Verkhnevolzhya.* 2020;(4(52)):10-16. (In Russ.) https://doi.org/10.35694/YARCX.2020.52.4.002

6. Malovichko L.V., Zubkov A.V., Dikov A.V. Effect of some common bird species on yield of fruit and berry crops in the michurinskiy garden of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Timiryazev Biological Journal*. 2023;(3):43-50. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-3-43-50

7. Karrum R., Gritsenko V.V. Characteristics of pest infestation of the collection of endemic wheat species of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Bulletin Samara State Agricultural Academy.* 2025:10(2):35-40. (In Russ.) https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-2-35-40

8. Zaitseva N.L. K.A. Timiryazev is a great scientist and citizen. *Priroda.* 2025;(8(1 320)):51-62. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0032874X25080067

9. Mamedov A.A., Orishev A.B., Grigoryev S.L., Kotusov D.V. et al. Examining the Civic Position, Political Views and Educational Activities of Timiriazev in the Field of English Language Education. *Journal of Research in Applied Linguistics.* 2023;14(3):472-476.

10. Naumov V.D., Kamennykh N.L. Academician, V.R. Williams and his contribution to genetic and agronomic soil science. *Agrochemical Bulletin*. 2023;(6):89-96. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-6-017

11. Goncharov N.P. Contribution of the "father of all russian agronomists" I.A. Stebut to the development of the national agricutural education and science. *Letters to Vavilov Journal of Genetics and Breeding.* 2020;6(3):126-150. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-6-017

12. Grigoriev N.D. Chemist, practitioner, teacher… Ivan Alekseevich Kablukov (1857-1942). *World of Transport and Transportation*. 2022;20(1):113-119. (In Russ.) https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-1-13

13. Truskinov E.V. N.I. Vavilov as an organizer of science. *Biosfera*. 2019;11(4):227-232. (In Russ.) https://doi.org/10.24855/biosfera.v11i4.515

14. Sobolev V.S. Formation: N.D. Kondratiev and his teachers. On the 125th anniversary of the outstanding economist's birthday. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2017;87(6):555-559. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0869587317060081

15. Kuznetsov I.A., Grishin E.S. A.V. Chayanov as a researcher of the three-field system: a publishers' preface. *Russian Peasant Studies*. 2019;4(2):57-61. (In Russ.) https://doi.org/10.22394/2500-1809-2019-4-2-57-61

16. Orishev A.B., Mironyuk S.A., Pozdnyakova A.S. Role of Moscow Agricultural Academy in formation and development of soviet agricultural science and higher agricultural education. *RUDN Journal of Russian History.* 2025;24(4):591-602. (In Russ.) https://doi.org/10.22363/2312-8674-2025-24-4-591-602

17. St. Petersburg branch of the Archives of the Russian Academy of Sciences. Fund 4. List of files 4. File 212. (In Russ.)

18. Central Historical Archive of Moscow. Fund 228. List of files 2. (In Russ.)

19. State Archive of the Russian Federation. Fund A-2306. List of files 1. File 2854. (In Russ.)

20. Russian State Archive of Economy. Fund 7486. List of files 19. File 168. (In Russ.)

21. Central Archives of the Ministry of Defense. Fund 33. List of files 793756. File 41. (In Russ.)

22. Russian State Archive of Economy. Fund 203. List of files 1. File 68. (In Russ.)

23. State Archive of the Russian Federation. Fund R-8080. List of files 1. File 988. (In Russ.)

24. History Museum of the Timiryazev Academy. Fund 110. (In Russ.)

25. Russian State Archive of Economics. Fund 784. List of files 1. File 57a. (In Russ.)

26. Roll-Hansen N. The Lysenko effect: undermining the autonomy of science. *Endeavour.* 2005;29(4):143-147. https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2005.10.003

Сведения об авторах

Трухачев Владимир Иванович, академик РАН, д-р экон. наук, профессор, д-р с.-х. наук, профессор, ректор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: rector@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-4650-1893

Оришев Александр Борисович, д-р ист. наук, доцент, заведующий кафедрой истории, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: Orishev71@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1953-9543

Тлепцок Руслан Асланович, д-р ист. наук, профессор кафедры истории, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: bum102@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0001-1443-0701

Information about the authors

Vladimir I. Trukhachev, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Econ), Professor, DSc (Ag), Professor, Rector, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: rector@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-4650-1893

Aleksandr B. Orishev, DSc (Hist), Associate Professor, Head of the Department of History, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: Orishev71@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1953-9543

Ruslan A. Tleptsok, DSc (Hist), Professor at the Department of History, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: bum102@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0001-1443-0701

Научная статья
УДК 631.4
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-20-31

АГРОХИМИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ

Влияние подвижности почвенных коллоидов на водоудерживающую способность почв

Горепекин Иван Владимирович✉, Федотов Геннадий Николаевич, Сухарев Алексей Игоревич, Грачева Татьяна Александровна

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** gorepekiniv@my.msu.ru

Аннотация
Коллоидная составляющая почв влияет на многие почвенные свойства, в том числе на водоудерживающую способность. Для отражения структуры коллоидной составляющей в 30–50-е гг. XX в. был введен термин «пленки-гели». Диагностическим свойством гелей как коллоидных систем является способность к коагуляции и пептизации, то есть к процессам, которые определяют подвижность коллоидных частиц. Целью исследований являлась проверка влияния подвижности почвенных гелей и их компонентов на водоудерживающую способность почв. Исследования проведены на образцах серой лесной почвы и чернозема выщелоченного. Водоудерживающую способность почв определяли методом равновесного центрифугирования, а подвижность коллоидных частиц – путем оценки оптической плотности вытяжек из почв. По результатам опытов установлено, что высушивание почв достоверно снижает водоудерживающую способность почв по сравнению со свежеотобранными образцами. Добавление раствора аммиачной воды к воздушно-сухим образцам позволяет увеличить отрицательный заряд гуминовых веществ в почвах и их подвижность, что подтверждается увеличением оптической плотности вытяжек из почв с повышением концентрации аммиачной воды. Параллельно с увеличением подвижности гуминовых вещества возрастает водоудерживающая способность почв. Полученные результаты позволяют предположить, что увеличивать водоудерживание можно за счет внесения не только дополнительных водоудерживающих компонентов, но и веществ, способствующих блокировке почвенных капилляров.

Ключевые слова
коагуляция, пептизация, заряд коллоидов в почвах, почвенные гели

Благодарности
Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема №122011800459–3 «Почвенные биомаркеры: идентификация, устойчивость, активность, возможность использования для мониторинга»).

Для цитирования
Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Сухарев А.И., Грачева Т.А. Влияние подвижности почвенных коллоидов на водоудерживающую способность почв // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 20–31.

Effect of soil colloid mobility on soil water retentivity

Ivan V. Gorepekin✉, Gennadiy N. Fedotov, Alexey I. Suharev, Tatiana A. Gracheva

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

✉**Corresponding author:** gorepekiniv@my.msu.ru

Abstract
The colloidal component of soils affects many soil properties, including water retentivity. To reflect the structure of the colloidal component, the term “gel films” was introduced in the 1930s-1950s. A diagnostic property of gels as colloidal systems is their ability to coagulate and peptize – processes that determine the mobility of colloidal particles. The study aimed to investigate the effect of soil gel mobility and their components on soil water retentivity. The research was conducted on samples of grey forest soil and leached chernozem. Soil water retentivity was determined using the equilibrium centrifugation method, while the mobility of colloidal particles was assessed by measuring the optical density of soil extracts. The experimental results showed that soil drying significantly reduces its water retentivity compared to freshly sampled soil. Adding an ammonia water solution to air-dry samples increases the negative charge of humic substances in the soil and enhances their mobility. This is confirmed by an increase in the optical density of soil extracts as the ammonia water solution concentration rises. As the mobility of humic substances increases, soil water retentivity enhances. The findings suggest that water retentivity can be increased not only by adding water-retaining components, but also by using substances that help block soil capillaries.

Keywords
coagulation, peptization, colloid charge in soils, soil gels

Acknowledgments
The study was carried out within the framework of the state assignment of the Lomonosov Moscow State University (topic No. 122011800459–3 “Soil biomarkers: identification, stability, activity, possibility of use for monitoring”).

For citation
Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Suharev A.I., Gracheva T.A. Effect of soil colloid mobility on soil water retentivity. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):20–31.

Введение
Introduction

Коллоидная составляющая определяет свойства почв – поглотительную способность [1], обусловливающую содержание питательных веществ и закрепление поллютантов [2, 3], водоудерживающую способность почв [4, 5], их структурные характеристики [6] и другие почвенные свойства. Поэтому коллоидную составляющую почв и ее проявления в свойствах изучают в различных разделах почвоведения: агрохимии [7, 8], химии и физике почв [4, 9, 10], микроморфологии [11-13] и т.д.

Размеры коллоидов и фракции ила в российской и международной классификациях пересекаются. Так, верхняя граница илистой фракции равна 1 мкм, а в международном – 2 мкм [14]. При этом верхняя граница коллоидной составляющей

в зарубежной литературе проходит на уровне 1 мкм, то есть соответствует илу в российской классификации [14]. Поэтому для отражения сходства этих фракций в дальнейшей работе мы будем использовать термин илисто-коллоидной фракции.

О роли илисто-коллоидной составляющей почв в водоудерживании говорит ряд экспериментальных фактов:

1. Искусственное отделение коллоидной фракции и ее органических компонентов снижает водоудерживающую способность почв до 40% для дерново-подзолистых почв и до 70% для черноземов [15].

2. Кутаны – лабильная часть почвенной плазмы [1], обладающая высокой способностью к набуханию, – ее гигроскопичность более чем в 2,5 раза выше, чем у внутрипедной массы. Повышенную гигроскопичность принято объяснять более высоким содержанием частиц гранулометрической фракции ила [16].

3. Органическое вещество в почвах находится преимущественно в коллоидной форме и способно как непосредственно удерживать воду в силу высокой дисперсности, так и взаимодействовать с неколлоидными минералами с образованием «рыхлых» органоминеральных структур [17].

Описанные свойства: повышенная гигроскопичность, расположение коллоидов на поверхностях более крупных педов, а также органоминеральная природа – позволяют обобщить строение коллоидной составляющей термином «пленки-гели».

Термин «пленки-гели» сформировался в 30-50-е гг. XX в. в работах А.Ф. Тюлина, который исследовал химические особенности поверхности почвенных коллоидов и их взаимодействие с жидкой фазой почв [18]. Диагностическим свойством гелей как коллоидных систем является способность к коагуляции и пептизации [19], при которых меняется подвижность коллоидов. Применительно к почвенным свойствам это означает, что pH и влажность образцов могут влиять на водоудерживающую способность почв.

Цель исследований: проверка влияния подвижности почвенных гелей и их компонентов на водоудерживающую способность почв.

Методика исследований
Research method

Объекты исследований. Эксперименты проведены на образцах гумусово-аккумулятивных горизонтов среднесуглинистой серой лесной почвы с содержанием гумуса 2,4% и тяжелосуглинистого чернозема выщелоченного с содержанием гумуса 5,6%. В опытах использовали как свежеотобранные образцы, так и образцы, высушенные до воздушно-сухого состояния.

Методы исследований. Водоудерживающая способность почв. Основную гидрофизическую характеристику (ОГХ) определяли методом центрифугирования [21], при котором удаление воды из почвенного образца происходит под действием центробежных сил. Они возникают при вращении центрифуги и выражаются числом ускорений свободного падения (g). После центрифугирования определяли влажность почвенного образца, получая пары значений «Потенциал почвенной влаги – влажность образца» для построения ОГХ.

[1] В микроморфологии илисто-коллоидную составляющую называют почвенной плазмой. Основанием для такой группировки служит сходный размер частиц. Плазму формируют частицы размером 1-2 мкм [20] (примеч. авт.).

Оптическая плотность почвенных вытяжек. Для приготовления вытяжек для определения оптической плотности к воздушно-сухому образцу чернозема выщелоченного добавляли воду или растворы аммиачной воды: 0.05 н; 0.1 н; 0.2 н – до достижения влажности 45%, выдерживали влажный образец в течение суток. После этого из образцов готовили водные вытяжки из расчета: абсолютно сухая почва: вода, равное 1:5. Затем суспензию помещали на час в ротатор, после чего полученную суспензию центрифугировали в течение 10 мин при 5000 оборотах в минуту. Измерение оптической плотности производили на фотоколориметре КФК-3 при длине волны 465 нм и длине светопоглощающего слоя 3 см.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Результаты исследований. На первом этапе исследований было изучено влияние высушивания почв до воздушно-сухого состояния на их водоудерживающую способность. Результаты опытов представлены на рисунках 1 и 2.

По результатам опытов можно сделать вывод о том, что во всем изученном диапазоне потенциала почвенной влаги pF воздушно-сухие образцы серой лесной почвы и чернозема выщелоченного удерживают меньшие количества воды по сравнению со свежеотобранными образцами.

На следующем этапе исследований было изучено влияние условий увлажнения на водоудерживающую способность чернозема выщелоченного. Были изучены следующие варианты образцов:

1. Воздушно-сухой образец с добавлением дистиллированной воды до влажности 45% – влажности свежеотобранного образца.
2. Воздушно-сухой образец с добавлением 0,2 н водного раствора аммиачной воды до влажности 45%.
3. Свежеотобранный образец с влажностью 45%.

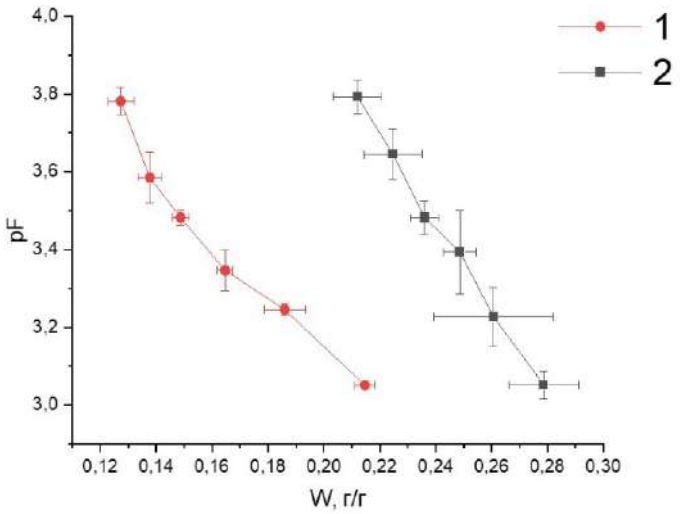

Рис. 1. Влияние высушивания на водоудерживающую способность серой лесной почвы. Цифрами обозначены: 1. Высушенная до воздушно-сухого состояния и увлажненная дистиллированной водой почва; 2. Свежеотобранная почва

Figure 1. Effect of drying on water retentivity of gray forest soil. The numbers indicate: 1. Soil dried to an air-dry state and moistened with distilled water; 2. Freshly sampled soil

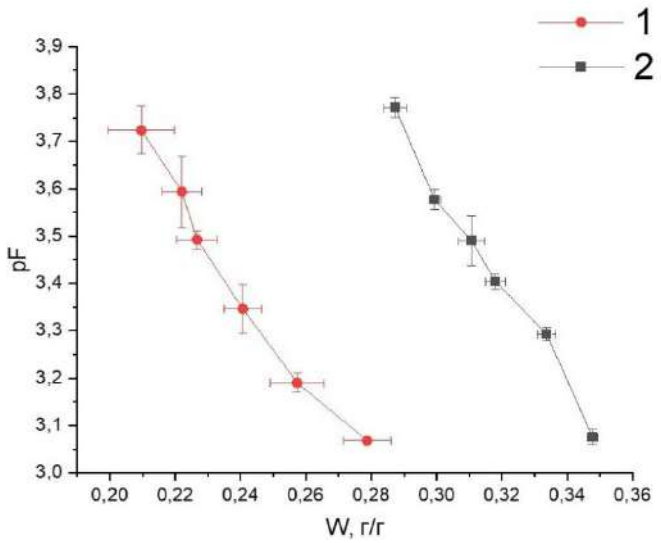

Рис. 2. Влияние высушивания на водоудерживающую способность чернозема выщелоченного. Цифрами обозначены:
1. Высушенная до воздушно-сухого состояния и увлажненная дистиллированной водой почва;
2. Свежеотобранная почва

Figure 2. Effect of drying on the water retentivity of leached chernozem. The numbers indicate:
1. Soil dried to an air-dry state and moistened with distilled water; 2. Freshly sampled soil

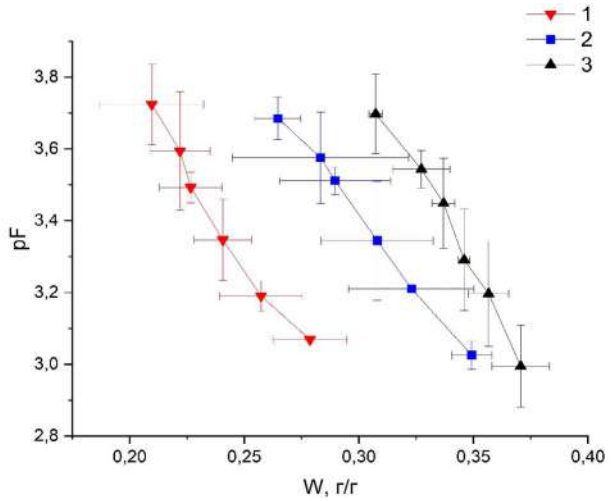

Рис. 3. Влияние условий увлажнения на водоудерживающую способность чернозема выщелоченного. Цифрами обозначены:
1. Воздушно-сухой чернозем выщелоченный с добавлением дистиллированной воды до влажности образца 45%;
2. Воздушно-сухой чернозем выщелоченный с добавлением 0,2 н водного раствора аммиака до влажности образца 45%;
3. Свежеотобранный образец чернозема выщелоченного влажностью 45%

Figure 3. Effect of moisture conditions on the water retentivity of leached chernozem. The numbers indicate: 1. Air-dry leached chernozem with distilled water added to reach a sample moisture content of 45%; 2. Air-dry leached chernozem with 0.2 n of an ammonia water solution added to reach a sample moisture content of 45%; 3. Freshly sampled leached chernozem with a moisture content of 45%

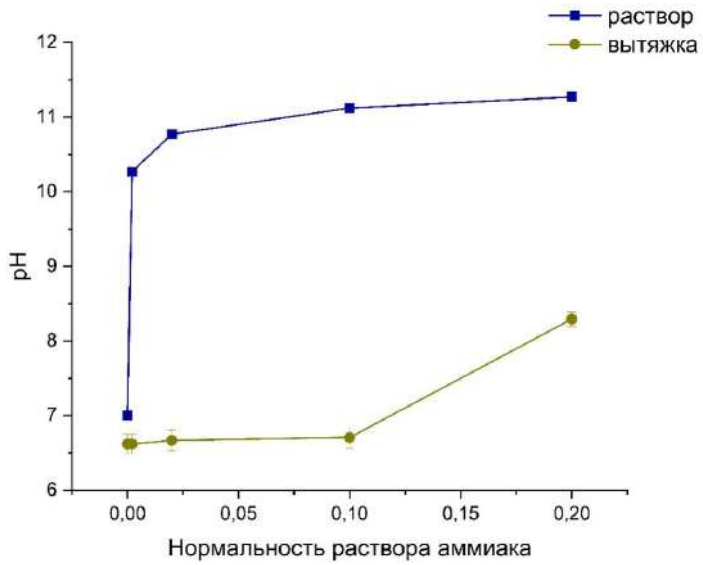

Рис. 4. Изменение pH аммиачной воды различной нормальности и влияние аммиачной воды на pH водных вытяжек чернозема выщелоченного

Figure 4. Changes in the pH of ammonia water of various normality and the effect of ammonia water on the pH of aqueous extracts from leached chernozem

Результаты проведенных опытов свидетельствуют о том, что водоудерживающая способность образцов чернозема выщелоченного возрастает в ряду: воздушно-сухой образец с добавлением дистиллированной воды – воздушно-сухой образец с добавлением 0,2 н раствора аммиачной воды – свежеотобранный образец, то есть свежеотобранный образец характеризуется наибольшей водоудерживающей способностью.

На следующем этапе работы было изучено, как соотносятся между собой pH аммиачной воды, добавляемой в почву, и значения pH почвенного раствора. Результаты опытов показывают, что при добавлении в почву аммиачная воды значительно теряет свою эффективность. Только значение концентрации аммиачной воды 0,2 н достоверно повышает значение pH почвенной вытяжки с 6,67 до 8,29.

Было изучено также влияние добавления различных концентраций аммиачной воды к образцам чернозема выщелоченного на оптическую плотность водных вытяжек, характеризующих подвижность органического вещества. Результаты опытов представлены в таблице.

Представленные в таблице результаты свидетельствуют о том, что с повышением концентрации аммиачной воды в растворе, который добавляли к черноземy выщелоченному до достижения влажности 45%, возрастает оптическая плотность вытяжек из почв. Добавление к черноземy выщелоченному 0,2 н раствора аммиачной воды обеспечивает почти 5-кратное увеличение оптической плотности по сравнению с дистиллированной водой: 1,617 против 0,343.

Обсуждение результатов. Выше отмечено, что коагуляция и пептизация коллоидов в почвах могут зависеть от влажности образцов и значения их pH. Результаты опытов по высушиванию почв (рис. 1, 2) свидетельствуют о том, что водоудерживающая способность воздушно-сухих образцов достоверно ниже, чем свежеотобранных. Полученные результаты согласуются с данными о том, что гуминовые вещества, входящие в состав почвенных гелей, при выделении из воздушно-сухих почв имеют большие размеры, чем при выделении из свежеотобранных образцов (рис. 5) [22].

Кроме того, в литературе также отмечается, что высушивание почв способствует гидрофобизации поверхности почвенных частиц и усиливает органоминеральные взаимодействие [23]. Гидрофобизация и уменьшение объема гелей при коагуляции в ходе высушивания способны затруднять смачивание почв и удержание ими воды при повторном увлажнении.

Таблица 1

Влияние условий увлажнения на оптическую плотность водных вытяжек из чернозема выщелоченного, предварительно выдержанного при влажности 45%, полученной добавлением воды или растворов аммиачной воды

Table 1

Effect of moisture conditions on the optical density of aqueous extracts from leached chernozem, previously maintained at a moisture content of 45%, obtained by adding water or ammonia water solutions

Вариант опыта	Оптическая плотность
Дистиллированная вода	0,343
0,05 н раствора аммиачной воды	0,461
0,1 н раствора аммиачной воды	1,165
0,2 н раствора аммиачной воды	1,617

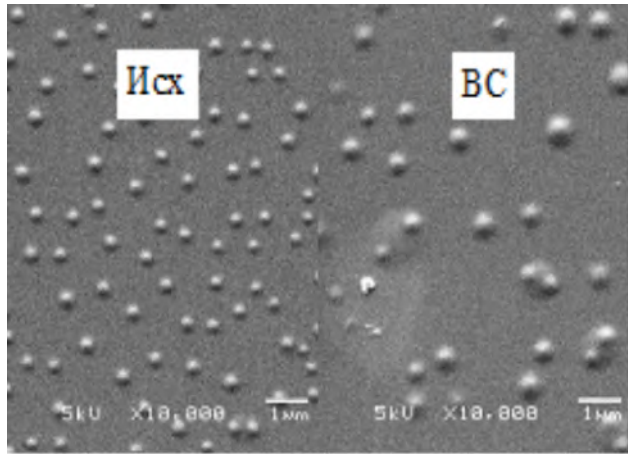

Рис. 5. Надмолекулярные образования гуминовых веществ, выделенные из дерново-подзолистой почвы: Исх – исходной (свежеотобранной); ВС – воздушно-сухой. Цитируется по Федотов и др., 2024 [23]

Figure 5. Supramolecular formations of humic substances extracted from sod-podzolic soil: "Исх" – original (freshly sampled), "ВС" – air-dry. Cited after Fedotov et al., 2024 [23]

Исследования по влиянию способа увлажнения на водоудерживающую способность почв показывают (рис. 2), что простого увлажнения почв дистиллированной водой недостаточно для восстановления их водоудерживающей способности. Для вязкости почвенных паст ранее была обнаружена аналогичная закономерность [23].

Из результатов проведенных опытов следует, что способность почв к удерживанию воды повышается только при использовании пептизирующего агента – раствора аммиачной воды (рис. 3), которая увеличивает отрицательный заряд гуминовых веществ и тем самым способствует их разделению и повышению подвижности. Об увеличении подвижности гуминовых веществ свидетельствуют данные оптической плотности (табл.), которая возрастает при повышении концентрации добавляемой к почве аммиачной воды, то есть увеличение подвижности гуминовых веществ сопровождается повышением водоудерживающей способности почв. Это означает, что наряду с термодинамической водоудерживающей способностью почв, которая определяется величиной энергии связи воды с твердой фазы почвы [24], может действовать и кинетический фактор – частичная закупорка порового пространства почв мигрирующими гуминовыми веществами и фрагментами органоминеральных почвенных гелей. В результате действия кинетического фактора в почве может сохраняться не только прочно связанная, но и свободная вода. Такой подход позволяет увеличивать водоудерживание за счет внесения не только дополнительных водоудерживающих компонентов, но веществ, способствующих блокировке почвенных капилляров. Однако последнее предположение требует дополнительной экспериментальной проверки.

Выводы

Conclusions

1. На образцах серой лесной почвы и чернозема выщелоченного показано, что свежеотобранные образцы достоверно лучше удерживают воду по сравнению с воздушно-сухими образцами.

2. Добавление раствора 0,2 н аммиачной воды повышает водоудерживающую способность образцов воздушно-сухих почв. Это говорит о том, что использование пептизирующих добавок может быть резервом для повышения водоудерживающей способности почв.

3. Оптическая плотность выделяемых из почв вытяжек возрастает с увеличением концентрации аммиачной воды, то есть отрицательно заряженные коллоиды – в частности, гуминовые вещества, увеличивают свою подвижность.

Список источников

1. Khaledian Y., Brevik E.C., Pereira P., Cerdà A. et al. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. *Catena.* 2017;158:194-200. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.002

2. Ge N., Wei X., Wang X., Liu X. et al. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau. *Catena.* 2019;172:148-157. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.021

3. Wang J., Han Z., Zhang C., Wang M. et al. Effects of soil colloids on adsorption and migration of benzo (a) pyrene on contaminated sites under runoff infiltration processes. *Environmental Pollution.* 2024;353:124150. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124150

4. Смагин А.В. К термодинамической теории водоудерживающей способности и дисперсности почв // *Почвоведение.* 2018. № 7. С. 836–851. https://doi.org/10.1134/S0032180X18070092

5. Wang C., Li S.Y., He X.J., Chen Q. et al. Improved prediction of water retention characteristic based on soil gradation and clay fraction. *Geoderma.* 2021;404:115293. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115293

6. Филиппова О.И., Холодов В.А., Сафронова Н.А., Юдина А.В. и др. Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России // *Почвоведение.* 2019. № 3. С. 335–347. https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031

7. Zhang Q., Yu G., Zhou Q., Li J. et al. Eco-friendly interpenetrating network hydrogels integrated with natural soil colloid as a green and sustainable modifier for slow release of agrochemicals. *Journal of Cleaner Production.* 2020;269:122060. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122060

8. Calero J., Plaza I., Ontiveros A., Aranda V. et al. Effects of organic agriculture in structure and organic carbon adsorption at colloidal scale in marginal olive groves, characterized by the extended DLVO model. *Frontiers in Environmental Science.* 2022;10:805668. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.805668

9. Сыщиков Д.В., Агурова И.В. Изменение поглотительной способности почв деградированных агроэкосистем Донбасса // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева.* 2023. № 117. С. 101–117. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-101-117

10. Zeng L., Li X., Jiang F., Yin M. et al. The effect of kaolinite on ferrihydrite colloid migration in soil: molecular-scale mechanism study. *Environmental Science*: *Nano.* 2023;10:2754-2766. https://doi.org/10.1039/D3EN00333G

11. Турсина Т.В., Соколов И.А. Макро- и микроморфологическая диагностика генезиса ферраллитных тропических почв Лаоса // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева.* 2008. № 62. С. 22–35. EDN: KUYSAR

12. Абакумов Е.В., Гагарина Э.И., Сапега В.Ф., Власов Д.Ю. Микроморфологическая характеристика мелкозема и скелета почв Западной Антарктики (районы расположения российских станций) // *Почвоведение.* 2013. № 12. С. 1464–1464. https://doi.org/10.7868/S0032180X13120022

13. Карпова Д.В., Балабко П.Н., Чижикова Н.П., Бескин Л.В., Колобова Н.А. и др. Микроморфология и минералогия серых лесных почв Владимирского ополья // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева.* 2018. № 94. С. 101–123. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-101-123

14. Юдина А.В., Фомин Д.С., Котельникова А.Д., Милановский Е.Ю. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // *Почвоведение.* 2018. № 11. Pp. 1340-1362. https://doi.org/10.1134/S0032180X18110096

15. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Башина А.С., Кириченко А.В. Количественная оценка энергии водоудерживания и дисперсности почвенных коллоидов по данным их дифференциальной сушки // *Экологический Вестник Северного Кавказа.* 2015. Т. 11, № 4. С. 43–53. EDN: UWRVDB

16. Бронникова М.А. Кутаны дерново-подзолистых почв как источник почвенно-генетической информации: Дис. … канд. биол. наук. Москва, 2000. 258 с. EDN: QDGYZF

17. Шеин Е.В., Позднякова А.Д., Шваров А.П., Ильин Л.И. и др. Гидрофизические свойства высокозольных низинных торфяных почв // *Почвоведение.* 2018. № 10. С. 1259–1264. https://doi.org/10.1134/S0032180X18100118

18. Тюлин А.Ф. *Органоминеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания растений*. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.

19. Воюцкий С.С. *Курс коллоидной химии.* М.: Химия, 1975. 512 с.

20. Гагарина Э.И. *Микроморфологический метод исследования почв.* СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2004. 156 с. EDN: QKWHRR

21. *Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв*: *Методическое руководство*. М.: Изд-во МГУ, 2001. 200 с.

22. Kaiser M., Kleber M., Berhe A.A. How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: an assessment to improve data interpretation and inference. *Soil Biology and Biochemistry.* 2015;80:324-340. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.018

23. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Ушкова Д.А., Горепекин И.В. и др. Восстановление свойств органоминеральных гелей в высушенных образцах почв // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2024. Т. 517, № 1. С. 849–858. https://doi.org/10.31857/S2686739724070198

24. Шеин Е.В. *Курс физики почв.* М.: Изд-во Московского университета, 2005. 430 с. EDN: RBBKE

References

1. Khaledian Y., Brevik E.C., Pereira P., Cerdà A. et al. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. *Catena.* 2017;158:194-200. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.002

2. Ge N., Wei X., Wang X., Liu X. et al. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau. *Catena.* 2019;172:148-157. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.021

3. Wang J., Han Z., Zhang C., Wang M. et al. Effects of soil colloids on adsorption and migration of benzo (a) pyrene on contaminated sites under runoff infiltration processes. *Environmental Pollution.* 2024;353:124150. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124150

4. Smagin A.V. About thermodynamic theory of water retention capacity and dispersity of soils. *Pochvovedenie*. 2018;(7):836-851. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1064229318070098

5. Wang C., Li S.Y., He X.J., Chen Q. et al. Improved prediction of water retention characteristic based on soil gradation and clay fraction. *Geoderma.* 2021;404:115293. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115293

6. Filippova O.I., Kholodov V.A., Safronova N.A., Yudina A.V. et al. Particle-size, microaggregate-size, and aggregate-size distributions in humus horizons of the zonal sequence of soils in European Russia. *Pochvovedenie* 2019;(3):335-347. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1064229319030037

7. Zhang Q., Yu G., Zhou Q., Li J. et al. Eco-friendly interpenetrating network hydrogels integrated with natural soil colloid as a green and sustainable modifier for slow release of agrochemicals. *Journal of Cleaner Production.* 2020;269:122060. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122060

8. Calero J., Plaza I., Ontiveros A., Aranda V. et al. Effects of organic agriculture in structure and organic carbon adsorption at colloidal scale in marginal olive groves, characterized by the extended DLVO model. *Frontiers in Environmental Science.* 2022;10:805668. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.805668

9. Syshchykov D.V., Agurova I.V. Changes in the absorptive capacity of soils of Donbass degraded agroecosystems. *Dokuchaev Soil Bulletin.* 2023;(117):101-117. (In Russ.) https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-101-117

10. Zeng L., Li X., Jiang F., Yin M. et al. The effect of kaolinite on ferrihydrite colloid migration in soil: molecular-scale mechanism study. *Environmental Science*: *Nano.* 2023;10:2754-2766. https://doi.org/10.1039/D3EN00333G

11. Tursina T.V., Sokolov I.A. Macro-and micromorphological diagnostics of the genesis of ferrallite tropical soils in Laos. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2008;(62):22-35. (In Russ.)

12. Abakumov E.V., Gagarina E.I., Sapega V.F., Vlasov D.Yu. Micromorphological features of the fine earth and skeletal fractions of soils of West Antarctica in the areas of Russian Antarctic stations. *Pochvovedenie.* 2013;(46):1464-1464. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1064229313120028

13. Karpova D.V., Balabko P.N., Chizhikova N.P., Beskin L.V. et al. The micromorphology and mineralogy of gray forest soils in Vladimir opolye. *Dokuchaev Soil Bulletin.* 2018;(94):101-123. (In Russ.) https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-94-101-123

14. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Y. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: a review. *Pochvovedenie.* 2018;(11):1340-1362. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1064229318110091

15. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Bashina A.S., Kirichenko A.V. Quantitative evaluation of water retention energy and dispersion of soil colloids according to their differential drying. *The North Caucasus Ecological Herald.* 2015;11(4):43-53. (In Russ.)

16. Bronnikova M.A. *Cutans of sod-podzolic soils as a source of soil-genetic information*: CSc (Bio) thesis. Moscow, Russia, 2000:258. (In Russ.)

17. Shein E.V., Pozdnyakova A.D., Shvarov A.P., Il'in L.I. et al. Hydrophysical properties of the high-ash lowmoor peat soils. *Pochvovedenie*. 2018;(10):1259-1264. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1064229318100113

18. Tyulin A.F. *Organo-mineral colloids in the soil, their genesis and importance for the root nutrition of plants.* Moscow, USSR: izd-vo AN SSSR, 1958:52. (In Russ.)

19. Voyutskiy S.S. *The course of colloidal chemistry.* Moscow, USSR: Khimiya, 1975:512. (In Russ.)

20. Gagarina E.I. *Micromorphological method of soil research.* St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg State University, 2004:156. (In Russ.)

21. *Field and laboratory methods for studying the physical properties and regimes of soils*: a methodological guide. Sheina E.V. (Ed). Moscow, Russia: Moscow State University, 2001:200. (In Russ.)

22. Kaiser M., Kleber M., Berhe A.A. How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: an assessment to improve data interpretation and inference. *Soil Biology and Biochemistry.* 2015;80:324-340. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.018

23. Fedotov G.N., Shoba S.A., Ushkova D.A., Gorepekin I.V. et al. Recovery of organomineral gel properties in dried soil samples. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle.* 2024;517(1):849-858. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1028334X24601755

24. Shein E.V. *Soil physics course.* Moscow, Russia: Moscow State University, 2005:430. (In Russ.)

Сведения об авторах

Иван Владимирович Горепекин, канд. биол. наук, научный сотрудник, факультет почвоведения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12; e-mail: gorepekiniv@my.msu.ru; https://orcid.org/0009-0000-1016-1906

Федотов Геннадий Николаевич, д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник, факультет почвоведения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12; e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8910-3433

Сухарев Алексей Игоревич, студент, факультет почвоведения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12; e-mail: suharevai@my.msu.ru; https://orcid.org/0000-0002-7596-423X

Грачева Татьяна Александровна, канд. биол. наук, старший преподаватель, факультет почвоведения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12; e-mail: tanyadunaeva12@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-6476-8048

Information about the authors

Ivan V. Gorepekin, CSc (Bio), Research Associate, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University; 1, Bldg. 12, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; e-mail: gorepekiniv@my.msu.ru; https://orcid.org/0009-0000-1016-1906

Gennadiy N. Fedotov, DSc (Bio), Leading Research Associate, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University; 1, Bldg. 12, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8910-3433

Alexey I. Suharev, student, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University; 1, Bldg. 12, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; e-mail: suharevai@my.msu.ru; https://orcid.org/0000-0002-7596-423X

Tatiana A. Gracheva, CSc (Bio), Senior Lecturer, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University; 1 Bldg. 12, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; e-mail: tanyadunaeva12@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-6476-8048

Научная статья
УДК 633.34:631.5
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-32-44

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Продукционный процесс сортов сои в зависимости от предпосевной обработки семян

Алан Юрьевич Алборов[1], Лариса Жураповна Басиева[2], Асланбек Хасанович Козырев[3]✉, Валентина Батырбековна Цугкиева[4], Элеонора Александровна Цагараева[5]

[1]Горский государственный аграрный университет, Владикавказ, Россия
[2]Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Владикавказского научного центра РАН, с. Михайловское, Россия

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

Аннотация
С целью научного обоснования приемов возделывания перспективных сортов сои и совершенствования компонентов адаптивной технологии ее возделывания проведены полевые эксперименты в условиях черноземов выщелоченных предгорной зоны РСО-Алания, характеризующейся как лесостепь с умеренно влажным климатом. Объектом исследований служили скороспелые сорта сои Барс и Ирбис. Для предпосевной обработки семян применяли: ризоторфин (штамм 643б), микроэлементы (Mo, Mn, Se), регуляторы роста (эпин, пектин). В ходе исследований применялись классические методы организации опытов, фенологических наблюдений и статистической обработки получаемой информации. Установлено, что предпосевная обработка семян сои препаратами «Эпин» и «Пектин» создает благоприятные условия для развития бобоворизобиального симбиоза и способствует формированию симбиотического аппарата на 19,7…50,4% больше, чем при использовании только традиционного инокулята. При совместном применении с ризоторфином масса активных клубеньков достигала 384,8…403,5 кг/га по препарату «Эпин» и 354,8…358,6 кг/га по препарату «Пектин», что на 49…62 и 33…50% соответственно лучше показателей контрольных вариантов. Наибольшая ассимилирующая поверхность листьев была сформирована в агроценозах сои с использованием на фоне ризоторфина препаратов пектина (43,1…46,1 тыс. м²/га), и особенно – эпина (49,1…50,6 тыс. м²/га). Эффект от применения пектина составил 22,3…23,8%, от эпина – 35,0…42,5%. Сорт Барс выгодно отличался размерами фотосинтетического потенциала, превышающими показатели сорта Ирбис на 22,8…31,2%. Максимальная симбиотическая и фотосинтетическая активность посевов в варианте «Ризоторфин + эпин» обеспечила формирование урожая семян в 2,35…2,46 т/га, что на 36,7…42,4% выгодно отличает его от контрольных вариантов. Среди сортотипов сои значительное преимущество проявил сорт Барс, показавший на 4,7…10,3% большую семенную продуктивность.

Ключевые слова
соя, ризоторфин, регулятор роста, микроэлементы, симбиотическая активность, фотосинтез, урожайность

Для цитирования
Алборов А.Ю., Басиева Л.Ж., Козырев А.Х., Цугкиева В.Б. и др. Продукционный процесс сортов сои в зависимости от предпосевной обработки семян // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 32–44.

Production process of soybean varieties depending on the pre-sowing seed treatment

Alan Yu. Alborov[1], Larisa Zh. Basieva[2], Aslanbek Kh. Kozyrev[3]✉, Valentina B. Tsugkieva[4], Eleonora A. Tsagaraeva[5]

[1]Gorsky State Agrarian University, Vladikavkaz, Russia
[2]North Caucasian Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture – Branch of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Mikhaylovskoe Vlg., Russia

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

Abstract
Field experiments were conducted in the leached chernozem soils of the foothill zone of the Republic of North Ossetia–Alania (characterized as a forest-steppe with a moderately humid climate) to scientifically substantiate cultivation techniques for promising soybean varieties and improve components of adaptive cultivation technology. The research objects were early-ripening soybean varieties Bars and Irbis. For pre-sowing seed treatment, the following were used: rizotorphin (strain 643b), microelements (Mo, Mn, Se), and growth regulators (Epin, Pectin). Classic methods of experiment design, phenological observations, and statistical data processing were applied during the study. It was found that pre-sowing soybean seed treatment with Epin and Pectin creates favourable conditions for the development of legume-rhizobial symbiosis and contributes to the formation of a symbiotic apparatus by 19.7–50.4% more compared to traditional inoculant alone. When combined with Rizotorfin, the mass of active nodules reached 384.8–403.5 kg/ha with Epin and 354.8–358.6 kg/ha with Pectin, surpassing control variants by 49–62% and 33–50%, respectively. The largest assimilating leaf surface was formed in soybean agrocenoses using Pectin (43.1–46.1 thousand m²/ha) and especially Epin (49.1–50.6 thousand m²/ha) against the background of Rizotorphin. The effect of Pectin application was 22.3–23.8%, and that of Epin – 35.0–42.5%. The Bars variety demonstrated a photosynthetic potential 22.8–31.2% higher than the Irbis variety. Maximum symbiotic and photosynthetic activities of crops in the Rizotorphin + Epin treatment ensured the formation of 2.35–2.46 t/ha of seed yield, outperforming control variants by 36.7–42.4%. Among the soybean cultivars, the Bars variety showed a significant advantage, achieving 4.7–10.3% higher seed productivity.

Keywords
soybean, Rhizotorphine, growth regulator, trace elements, symbiotic activity, photosynthesis, yield

For citation
Alborov A.Yu., Basieva L.Zh., Kozyrev A.Kh., Tsugkieva V.B. et al. Production process of soybean varieties depending on the pre-sowing seed treatment. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):32–44.

Введение
Introduction

Повышение эффективности производства зерновых бобовых культур является важным звеном в решении проблемы импортозамещения в различных сферах АПК России. Ценное высокопитательное сырье как для пищевой

промышленности, так и в сфере кормопроизводства, бобовые растения являются ключевым фактором в успешном развитии сельскохозяйственной отрасли [1-3]. Насыщение севооборотов бобовым компонентом, помимо увеличения белковой продуктивности агроценозов, имеет и большое агротехнические значение. Уникальная способность в симбиозе с ризосферными микроорганизмами фиксировать молекулярный азот из атмосферы позволяет не только производить дешевый и экологически чистый белок, но и, обогащая почву этим элементом, снижать химическую нагрузку на агроэкосистемы в виде сокращения вносимых объемов минеральных азотных удобрений [4-6].

Современные экономические реалии диктуют требования по возделыванию высокоэффективных сельскохозяйственных культур комплексного использования. Одним из лидеров, отвечающих на высокие запросы промышленности, по праву считается соя, обладающая целым рядом преимуществ [7, 8]. Высокое содержание белка и жира, во многом за счет относительно дешевых биологических механизмов питания растений, обогащение почвы симбиотически фиксированными формами азота, широкое и многогранное использование в пищевой и перерабатывающей отраслях промышленности придают исследованиям агротехники сои особую актуальность и, несомненно, вызывают научный и практический интерес [9, 10].

Регионы Центрального Предкавказья отличаются значительной пестротой почвенных и климатических ресурсов. Увеличение высоты над уровнем моря с севера на юг образовало обратную вертикальную зональность, что привело к формированию на относительно маленькой территории всех природных зон, встречающихся на просторах России. Данное обстоятельство вынуждает исследователей изучать, разрабатывать и совершенствовать технологические приемы возделывания сельскохозяйственных культур применительно к каждым конкретным экологическим условиям [11, 12].

Цель исследований: разработка научно обоснованных приемов возделывания перспективных сортов сои и совершенствование компонентов адаптивной технологии ее возделывания в условиях предгорной зоны РСО-Алания.

На обсуждение в статье вынесены вопросы формирования агроценозов сои в зависимости от предпосевной обработки семян препаратами различного происхождения.

Методика исследований

Research method

Экспериментальную работу проводили в период с 2022 по 2024 гг. в условиях предгорной зоны Центрального Предкавказья, характеризующейся как лесостепь с умеренно влажным климатом. Агроклиматические условия в период проведения исследований отличались своей неоднородностью. В 2022 и 2023 гг. погодные условия оказались недостаточно благоприятными. В первые месяцы 2022 г., и особенно в июне, наблюдался избыток влаги, что привело к чрезмерному росту растений и задержке их вегетации. В 2023 г. ситуация была иной: весна выдалась засушливой, а лето – относительно умеренным, однако август был засушливым, что отразилось на состоянии растений. В условиях 2024 г. климатические условия были близкими к оптимальным, что соответствовало средним многолетним показателям.

Почвы опытного участка были представлены черноземом выщелоченным, среднесуглинистым, среднемощным, с диапазоном содержания гумуса в почве 4,5…6,0%; диапазоном реакции среды пахотного слоя почвы pHсол 5,9…6,3; концентрацией легкогидролизуемого азота 80 мг/кг, подвижного фосфора – 90 мг/кг, обменного калия – 150 мг/кг.

Исследования были проведены на опытном поле учебно-научно-производственного отдела Горского государственного аграрного университета, что обеспечило комплексность и системность в оценке признаков и потенциала перспективных сортов.

Схема опыта: 1. Контроль (без обработки). 2. Ризоторфин (фон). 3. Фон + Mo + Mn. 4. Фон + эпин. 5. Фон + пектин. 6. Фон + селен.

Семена сои перед посевом обрабатывали: ризоторфином на основе активных штаммов ризобий 643б в количестве 200 г на гектарную норму семян; микроэлементами Mo, Mn и Se в концентрации 0,5% в.р. в виде сульфата марганца, молибдата аммония и селената натрия; регуляторами роста – эпином с концентрацией 0,0025% в.р. и пектином с концентрацией 0,05% в.р. Все водные растворы использовали в норме 2 л/ц семян.

Полевые опыты проводили в 4-кратной повторности с рендомизированным размещением вариантов. Посев семян проводили рядовым способом (45 см), общая площадь делянки – 36 м^2, учетная площадь – 20,4 м^2. Предшествующей культурой была озимая пшеница.

В ходе полевых исследований изучали скороспелые сорта сои «Барс» и «Ирбис» (оригинатор – Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта).

Предмет исследований – симбиотический и фотосинтетический аппараты посевов сои и закономерности их формирования, а также биологическая урожайность агроценозов в условиях предгорной зоны РСО-Алания.

Полевые опыты проводили согласно общепринятым методикам. Статистическая обработка полученных результатов произведена методом дисперсионного анализа с использованием программного пакета Microsoft Office 2010.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Размеры симбиотического аппарата бобовых культур и активность его функционирования являются важными показателями, характеризующими соответствие экологических факторов среды требованиям биологии культуры и микроорганизмов. Функциональная связь между растениями и микроорганизмами, сформировавшаяся в результате длительного процесса коэволюции, требует комплексного подхода к изучению. Эти взаимосвязи представляют собой динамическую систему, которая чутко реагирует на любые изменения в экосистеме [13, 14].

Проведенные исследования показали, что формирование симбиотического аппарата происходило во всех вариантах опыта независимо от инокуляции семян активными штаммами ризобий. Данный факт указывает на наличие в почве опытного участка аборигенных штаммов азотфиксирующих бактерий, несмотря на отсутствие посевов бобовых трав в предшествующие несколько лет. В случае отсутствия инокуляции формирование клубеньков происходило благодаря спонтанным штаммам ризобий. Это связано прежде всего с тем, что соя является традиционным представителем агроэкосистем в данном регионе.

Предварительная инокуляция семян ризоторфином (фон) позволила ускорить процесс формирования клубеньков во всех вариантах в среднем на 1…3 дня. При использовании биостимулятора «Эпин» на фоне применения ризоторфина продолжительность симбиотических отношений у сорта Барс в разные годы составила 56…91 суток, а у растений сорта Ирбис – 50…80 суток. В посевах контрольного варианта длительность симбиоза была на 1…6 суток меньше.

Масса и количество клубеньков на корнях бобовых растений – показатели, которые позволяют оценить размеры симбиотического аппарата (табл. 1, рис. 1).

В ходе исследований было выявлено, что все варианты предпосевной обработки семян продемонстрировали существенный прирост количества клубеньков. Совместное использование ризоторфина с эпином во все фазы развития растений имело максимальное превосходство по данному показателю. Преимущество над контрольными вариантами достигало 86,4…105,1% у сорта Барс и 111,4…136,1% у сорта Ирбис. При этом следует отметить, что эффект только от применения эпина составил 45,5…83,1 и 65,7…83,9% соответственно по сортам Барс и Ирбис, тогда как ризоторфин (вариант 2) продемонстрировал прибавку от 22,0 до 53,0%.

Таблица 1

Количество активных клубеньков на корнях сои в зависимости от предпосевной обработки семян, среднее за 3 года, млн шт/га

Table 1

Number of active nodules on soybean roots depending on the pre-sowing seed treatment, average for 3 years, million pcs/ha

Сорт (фактор А)	Варианты опыта (фактор В)	Фазы развития растений			
		Третий тройчатый лист	Бутониза-ция-цветение	Начало налива семян	Полный налив семян
Барс	1. Контроль	4,4	10,5	11,8	0
	2. Ризоторфин (фон)	6,2	14,0	14,4	0
	3. Фон + Mo + Mn	6,7	15,5	15,9	0
	4. Фон + эпин	8,2	20,8	24,2	0
	5. Фон + пектин	7,0	16,6	19,8	0
	6. Фон + селен	6,2	15,1	15,5	0
Ирбис	1. Контроль	3,5	8,3	9,3	0
	2. Ризоторфин (фон)	5,1	12,7	13,6	0
	3. Фон + Mo + Mn	5,6	13,3	15,4	0
	4. Фон + эпин	7,4	19,6	21,4	0
	5. Фон + пектин	6,1	16,0	18,0	0
	6. Фон + селен	5,6	11,7	14,6	0
$НСР_{05}$ (*A*) $НСР_{05}$ (*B*) $НСР_{05}$ (*AB*)		*0,09* *0,08*	*0,49* *1,28* *1,59*	*0,62* *1,17* *1,53*	

Пектин, представляющий собой хорошую питательную среду для микроорганизмов, в том числе азотфиксирующих, продемонстрировал существенный эффект в формировании и развитии клубеньков на корнях растений, уступив лишь показателям 4-го варианта. Превосходство над контрольными вариантами по количеству клубеньков составило 59,1…74,3%, при этом эффект только от пектина достигал 18,2…28,6% в зависимости от сортотипа сои.

Применение ризоторфина совместно с микроэлементами Mo и Mn увеличило численность клубеньков на корнях на 34,7…65,6%. При этом эффект только от микроэлементов оценивается в 7,2…19,4% в зависимости от сорта и фазы развития растений. Эффективность микроэлемента Селен в опыте варьировала от –12,0 до +10,8%, однако данные статистического анализа не подтвердили значимых воздействий.

В разрезе сортотипов сои преимущество по количеству клубеньков на корнях растений имел сорт Барс во все фазы развития и при всех способах обработки семян.

Анализируя динамику изменения количества клубеньков, прослеживали тенденцию интенсивного их нарастания до фазы бутонизации-цветения, после чего темпы прироста замедляются к фазе начала налива семян. С началом процессов созревания семян происходит уменьшение ассимиляционной площади листьев ввиду их естественного усыхания, что приводит к резкому сокращению оттока продуктов фотосинтеза от надземной части к корням и клубенькам. Вследствие этого начинается процесс отмирания клубеньков, и к фазе полного налива семян их количество сокращается до нуля. Данная закономерность отмечалась на всех вариантах опыта.

Масса клубеньков является более точным показателем, отражающим размеры симбиотического аппарата бобовых, так как в данном случае учитывается разноразмерность клубеньков (рис. 1).

Как следует из диаграммы, общая картина между вариантами опыта имеет те же закономерности, что и по количеству клубеньков. Минимальные уровни отмечались на контрольных вариантах; ризоторфин показал существенную прибавку в размере 11,8…12,9%. Микроэлементы (Mo, Mn, Se) увеличили массу клубеньков в сравнении со 2-м вариантом (ризоторфин) еще на 2,3…12,9%, однако данный эффект нельзя назвать существенным. Значимое преимущество над фоном проявили препараты «Пектин» (19,7…37,7%) и «Эпин» (36,3…50,4%).

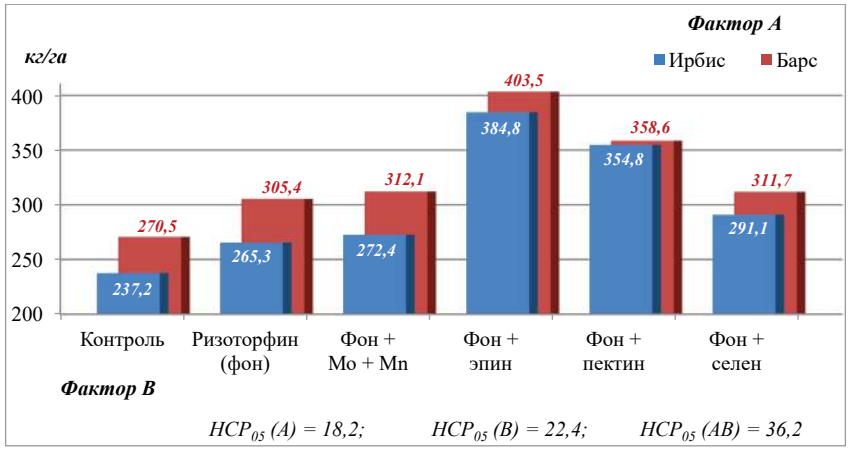

Рис. 1. Масса активных клубеньков на корнях сои в фазу начала налива семян, среднее за 3 года, кг/га

Figure 1. Weight of active nodules on soybean roots at the beginning of seed filling stage, average over 3 years, kg/ha

Анализируя массу клубеньков в разрезе сортотипов сои, выявили, что преимущество также имел сорт Барс, однако в последних двух вариантах различия с сортом Ирбис находились в пределах ошибки опыта.

Функцией массы клубеньков и продолжительности их функционирования служит показатель симбиотического потенциала. Согласно результатам исследований посевы сорта Барс продемонстрировали высокий симбиотический потенциал, который варьировался по годам исследований в пределах от 13,8 до 22,6 тыс. кг × дней/га, у сорта Ирбис – в пределах от 9,9 до 18,2 тыс. кг × дней/га соответственно. В разрезе применяемых способов обработки семян данный показатель в среднем за 3 года был наиболее высоким в варианте «Фон + эпин», составив 18407 и 16130 кг × дней/га соответственно сортам Барс и Ирбис.

Предпосевная обработка семян микроэлементами и биостимуляторами роста на фоне использования ризоторфина позволяла растениям более эффективно усваивать азот из атмосферы. В ходе исследований было выявлено, что при использовании варианта «Фон + эпин» фиксировалось максимальное количество азота из атмосферы. При этом показатель азотфиксации у обоих сортов был в 1,6 раза выше, чем в контрольных вариантах, составив 95,5 кг/га по сорту Барс и 78,4 кг/га по сорту Ирбис.

Симбиотическая активность бобовых агроценозов прямо коррелирует с показателями фотосинтеза. Механизм биологической азотфиксации является достаточно энергоемким, и при слабой активности фотосинтетических процессов симбионты испытывают недостаток как в продуктах фотосинтеза, так и в биологически фиксированных формах азота [15].

Ассимилирующая поверхность листьев в контрольных вариантах сформировала площади от 32,0 тыс. м^2/га у сорта Ирбис до 35,4 тыс. м^2/га у сорта Барс (табл. 2).

Активизация процессов симбиотической азотфиксации за счет предпосевной инокуляции семян ризоторфином увеличивала площадь листовой поверхности на 7,9…10,9%. Применение микроэлементов дополнительно увеличивало эффект: молибден и марганец – на 7,1…7,5%; селен – на 4,0…11,9%.

Наибольшая ассимилирующая поверхность листьев была сформирована в агроценозах сои с использованием на фоне ризоторфина препарата «Пектин» (43,1…46,1 тыс. м^2/га), и особенно препарата «Эпин» (49,1…50,6 тыс. м^2/га). Эффект от применения пектина составлял 22,3…23,8%, от эпина – 35,0…42,5%.

Закономерности, отмеченные при анализе площади листьев, сохранились и в показателях фотосинтетического потенциала (ФП). Минимальные размеры ФП отмечались в контрольных вариантах, максимальные – в варианте с совместным применением ризоторфина и эпина: 2155,5 и 3223,3 тыс. м^2 × дней/га в посевах сорта Барс и 1682,8…2598,7 тыс. м^2 × дней/га в посевах сорта Ирбис.

Анализируя фотосинтетический потенциал по сортотипам сои, выяснили, что выгодно отличился сорт Барс с размерами ФП, на 22,8…31,2% выше показателей сорта Ирбис; при этом статистическая обработка полученных данных подтвердила их значимость.

Чистая продуктивность фотосинтеза в исследованиях варьировала по сортам и вариантам опыта в пределах 2,70…3,19 г/м^2 в сутки. Значимые различия зафиксированы лишь по варианту с применением пектина на фоне ризоторфина в посевах сорта Барс. По другим вариантам существенного действия изучаемых факторов не выявлено. В разрезе сортотипов сои сорт Ирбис имел лучшие показатели ЧПФ, чем у сорта Барс.

Конечным результатом продукционных процессов в агроценозах является урожайность. Установлено, что в естественных условиях (контроль) посевы сорта Ирбис сформировали урожайность семян 1,65 т/га, сорта Барс – на 0,15 т/га, или на 9,1%, больше (рис. 2).

Таблица 2

Показатели фотосинтетической деятельности посевов сои, среднее за 3 года

Table 2

Indicators of photosynthetic activity of soybean crops, average over 3 years

Сорт (фактор А)	Варианты опыта (фактор В)	Фазы развития растений		
		Площадь листьев, тыс. м²/га	ФП, $\frac{\text{тыс. м}^2 \times \text{дней}}{\text{га}}$	ЧПФ, г/м² в сутки
Барс	1. Контроль	35,4	2155,5	2,88
	2. Ризоторфин (фон)	38,2	2486,1	2,91
	3. Фон + Mo + Mn	40,7	2649,9	2,70
	4. Фон + эпин	50,6	3223,3	2,88
	5. Фон + пектин	46,1	2899,1	3,04
	6. Фон + селен	39,6	2518,3	2,94
Ирбис	1. Контроль	32,0	1682,8	3,12
	2. Ризоторфин (фон)	35,5	1895,5	3,15
	3. Фон + Mo + Mn	37,9	2066,1	2,98
	4. Фон + эпин	49,1	2598,7	3,07
	5. Фон + пектин	43,1	2287,0	3,09
	6. Фон + селен	39,3	2050,3	3,19
$НСР_{05}$ (А) *$НСР_{05}$ (В)* *$НСР_{05}$ (АВ)*		*0,42* *0,69* *0,88*	*218,2* *186,4* *322,5*	*0,09* *0,14* *0,18*

Предпосевная инокуляция семян активным штаммом ризобий (2-й вариант) увеличила сбор семян на 0,13…0,16 т/га, или на 7,9…8,9%. Эффект от использования микроэлементов, как молибдена и марганца, так и селена, был практически идентичным независимо от сорта и составил 0,07…0,08 т/га, или 4,2…4,4%. Однако согласно статистической обработке данный эффект являлся значимым только в отношении контрольных вариантов.

Существенный прирост к биологической урожайности семян у обоих сортов был получен при использовании эпина и пектина на фоне инокуляции семян ризоторфином. Пектин способствовал росту продуктивности на 23,9…25,5% в сравнении с контролем, а эпин позволил достигнуть максимальной продуктивности агроценозов сои в исследованиях – 2,35…2,46 т/га, что на 36,7…42,4% выгодно отличает его от контрольных вариантов. Среди сортотипов сои значимое преимущество проявил сорт Барс, показавший на 4,7…10,3% большую семенную продуктивность в сравнении с сортом Ирбис.

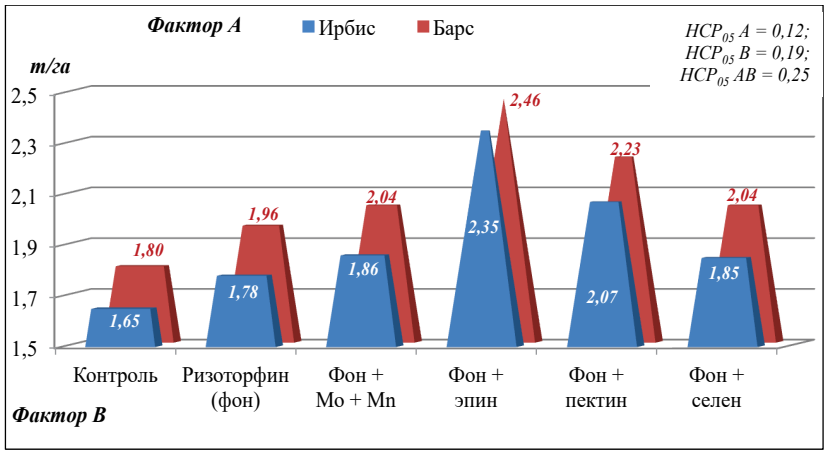

Рис. 2. Биологическая урожайность семян сои в зависимости от предпосевной обработки семян, среднее за 3 года, т/га

Figure 2. Biological seed yield of soybeans depending on pre-sowing seed treatment, average over 3 years, t/ha

Выводы

Conclusions

1. Предпосевная обработка семян сои регуляторами роста при совместном применении с ризоторфином увеличила массу активных клубеньков до 384,8…403,5 кг/га с препаратом «Эпин» и до 354,8…358,6 кг/га с препаратом «Пектин», что на 49…62 и 33…50% соответственно лучше показателей контрольных вариантов.

2. Наибольшая ассимилирующая поверхность листьев была сформирована в агроценозах сои с использованием на фоне ризоторфина препарата «Пектин» (43,1…46,1 тыс. м^2/га), и особенно – препарата «Эпин» (49,1…50,6 тыс. м^2/га). Эффект от применения пектина составил 22,3…23,8%, от эпина – 35,0…42,5%. Сорт Барс выгодно отличался размерами фотосинтетического потенциала, превышающими показатели сорта Ирбис на 22,8…31,2%.

3. Максимальная симбиотическая и фотосинтетическая активность посевов в варианте «Ризоторфин + эпин» обеспечили формирование 2,35…2,46 т/га урожая семян, что на 36,7…42,4% выгодно отличает его от контрольных вариантов. Среди сортотипов сои значительное преимущество проявил сорт Барс, показавший на 4,7…10,3% большую семенную продуктивность.

Список источников

1. Воронов С.И., Зеленев А.В. Современные технологии адаптивно-ландшафтного земледелия в реализации генетического потенциала зерновых и зернобобовых культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*: *Наука и высшее профессиональное образование*. 2024. № 1 (73). С. 21–31. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-01-02

2. Сазонова И.А., Бычкова В.В., Ерохина А.В., Молчанов А.В. и др. Потенциал зернобобовых культур как высокобелкового компонента в кормопроизводстве // *Аграрный научный журнал*. 2024. № 8. С. 103–107. https://doi.org/10.28983/asj.y2024i8pp103-107

3. Юлдыбаев И.Р., Давлетов Ф.А., Гайнуллина К.П. Сравнительная оценка урожайности зерна и зеленой массы зернобобовых культур в условиях Южной лесостепи Республики Башкортостан // *Зерновое хозяйство России*. 2024. Т. 16, № 2. С. 13–20. https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-91-2-13-20

4. Муралев С.Г., Володина Е.Н., Белкин Я.Г. Влияние жидких комплексных минеральных удобрений, содержащих макро- и микроэлементы, на структуру урожая и урожайность зернобобовых культур // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2024. № 5 (401). С. 553–556. https://doi.org/10.55186/25876740_2024_67_5_553

5. Постников П.А., Цепилова М.В. Продуктивность и энергетическая эффективность севооборотов с различным насыщением зерновыми и зернобобовыми культурами // *Пермский аграрный вестник*. 2024. № 1 (45). С. 33–40. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2024_45_33

6. Bekuzarova S.A., Kozyrev S.G., Kozyrev A.H., Lushchenko G.V. et al. Current method in the selection of legume grasses. *IOP Conf. Ser.*: *Earth Environ. Sci.* 2021;677:42003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/4/042003

7. Захарова М.Н., Рожкова Л.В., Свирина В.А., Черногаев В.Г. Влияние элементов технологии на урожайность сои сорта Георгия в Рязанской области // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023. № 5. С. 18–21. https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/5/18-21

8. Галиченко А.П., Фокина Е.М. Влияние метеорологических условий на формирование урожайности сортов сои селекции ВНИИ сои // *Аграрный вестник Урала*. 2022. № 7 (222). С. 16–25. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-222-07-16-25

9. Гладышева О.В., Свирина В.А., Черногаев В.Г. Влияние биопрепаратов на продуктивность и качество сои в Нечерноземье // *Плодородие*. 2024. № 4 (139). С. 74–78. https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.17

10. Тедеева В.В., Тедеева А.А. Урожайность посевов сои в зависимости от применения биопрепаратов // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024. № 110. С. 183–189. https://doi.org/10.21515/1999-1703-110-183-189

11. Тедеева В.В., Тедеева А.А. Влияние минеральных удобрений на симбиотическую активность посевов сои // *Вестник КрасГАУ*. 2024. № 3 (204). С. 51–58. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-3-51-58

12. Farniyev A.T., Kozyrev A.Kh., Sabanova A.A., Kokoyev Kh.P. The role of biopreparations and their tank mixtures in increasing disease resistance and productivity of soybean. *Volga Region Farmland*. 2019;(4(4)):58-62. https://doi.org/10.26177/VRF.2020.4.4.012

13. Шабалдас О.Г., Дорожко Г.Р., Власова О.И., Вайцеховская С.С. Симбиотическая активность в посевах и продуктивность сои в зависимости от обработки семян биопрепаратами на черноземе обыкновенном // *Земледелие*. 2023. № 8. С. 32–36. https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-8-32-36

14. Головина Е.В., Леухина О.В. Влияние некорневых подкормок на фотосинтетическую деятельность, симбиотическую активность и продуктивность новых сортов сои // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2023. № 1 (45). С. 40–49. https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-1-40-49

15. Головина Е.В., Леухина О.В. Экзогенная регуляция симбиотической деятельности новых сортов сои в условиях ЦЧР // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2024. № 2 (50). С. 30–39. https://doi.org/10.24412/2309-348X-2024-2-30-39

References

1. Voronov S.I., Zelenev A.V. Modern technologies of adaptive-landscape farming in the realization of the genetic potential of grain and leguminous crops. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex*: *Science and Higher Education*. 2024;(1(73)):21-31. (In Russ.) https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-01-02

2. Sazonova I.A., Bychkova V.V., Erokhina A.V., Molchanov A.V. et al. The potential of leguminous crops as a high-protein component in feed production. *The Agrarian Scientific Journal*. 2024;(8):103-107. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2024i8pp103-107

3. Yuldybaev I.R., Davletov F.A., Gainullina K.P. Comparative estimation of grain productivity and green mass of leguminous crops in the southern forest-steppe of the Republic of Bashkortostan. *Grain Economy of Russia*. 2024;16(2):13-20. (In Russ.) https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-91-2-13-20

4. Muralev S.G., Volodina E.N., Belkin Ya.G. Influence of liquid complex mineral fertilizers containing macro- and microelements, on crop structure and yield of leguminous crops. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal*. 2024;(5(401)):553-556. (In Russ.) https://doi.org/10.55186/25876740_2024_67_5_553

5. Postnikov P.A., Tsepilova M.V. Productivity and energy efficiency of crop rotations with different saturation with grain and legume crops. *Perm Agrarian Journal*. 2024;(1(45)):33-40. (In Russ.) https://doi.org/10.47737/2307-2873_2024_45_33

6. Bekuzarova S.A., Kozyrev S.G., Kozyrev A.H., Lushchenko G.V. et al. Current method in the selection of legume grasses. *IOP Conf. Ser.*: *Earth Environ. Sci.* 2021;677:42003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/4/042003

7. Zakharova M.N., Rozhkova L.V., Svirina V.A., Chernogaev V.G. Influence of the technology elements on the soybean Georgia's variety yield in the Ryazan Region. Influence of technology elements on the yield of George soybeans in the Ryazan region. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2023;(5):18-21. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/5/18-21

8. Galichenko A.P., Fokina E.M. Meteorological effects in formation of the yield of soybean varieties bred by ARSRI of Soybean. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2022;(7(222)):16-25. (In Russ.) https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-222-07-16-25

9. Gladysheva O.V., Svirina V.A., Chernogaev V.G. Influence of biological products on the productivity and quality of soybeans in the Non-Black Earth Region. *Plodorodie*. 2024;(4(139)):74-78. (In Russ.) https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.17

10. Tedeeva V.V., Tedeeva A.A. Soybean crops yield depending on the biological products application. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024;(110):183-189. (In Russ.) https://doi.org/10.21515/1999-1703-110-183-189

11. Tedeeva V.V., Tedeeva A.A. Mineral fertilizers influence on the soybean crops symbiotic activity. *Bulletin of KSAU*. 2024;(3(204)):51-58. (In Russ.) https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-3-51-58

12. Farniyev A.T., Kozyrev A.Kh., Sabanova A.A., Kokoyev Kh.P. The role of biopreparations and their tank mixtures in increasing disease resistance and productivity of soybean. *Volga Region Farmland*. 2019;(4(4)):58-62. https://doi.org/10.26177/VRF.2020.4.4.012

13. Shabaldas O.G., Dorozhko G.R., Vlasova O.I., Vajcehovskaja S.S. Symbiotic activity in crops and productivity of soybean depending on seed treatment with biological products on ordinary chernozem. *Zemledelie*. 2023;(8):32-36. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-8-32-36

14. Golovina E.V., Leukhina O.V. Influence of foliar feeding on photosynthetic and symbiotic activity and productivity of new soybean varieties. *Legumes and Groat Crops*. 2023;(1(45)):40-49. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-1-40-49

15. Golovina E.V., Leukhina O.V. Exogenous regulation of symbiotic activity of new soybean varieties in the conditions of the Central Chernozem Region. *Legumes and Groat Crops*. 2024;(2(50)):30-39. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2309-348X-2024-2-30-39

Сведения об авторах

Алан Юрьевич Алборов, аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет»; 362040, г. Владикавказ, ул. Кирова, 37; e-mail: agrofak_ae@gorskigau.com

Лариса Жураповна Басиева, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры землеустройства и экологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет»; 362040, г. Владикавказ, ул. Кирова, 37; e-mail: alagirka@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-0718-9056

Асланбек Хасанович Козырев, д-р с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела адаптивно-ландшафтного земледелия, Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»; 363110, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1; e-mail: ironlag@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2790-7895

Валентина Батырбековна Цугкиева, д-р с.-х. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет»; 362040, г. Владикавказ, ул. Кирова, 37; e-mail: tsugkieva.valya@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-2960-8266

Элеонора Александровна Цагараева, д-р биол. наук, доцент, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет»; 362040, г. Владикавказ, ул. Кирова, 37; e-mail: eleonorazag@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-1624-737X

Information about the authors

Alan Yu. Alborov, postgraduate student, Gorsky State Agrarian University; 37 Kirova St., Vladikavkaz, 362040, Russian Federation; e-mail: agrofak_ae@gorskigau.com

Larisa Zh. Basieva, CSc (Ag), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Land Management and Ecology, Gorsky State Agrarian University; 37 Kirova St., Vladikavkaz, 362040, Russian Federation; e-mail: alagirka@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-0718-9056

Aslanbek Kh. Kozyrev, DSc (Ag), Professor, Chief Research Associate at the Department of Adaptive Landscape Agriculture, North Caucasian Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture – Branch of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences; 1 Williams St., Mikhaylovskoe Vlg., Prigorodny District, Republic North Ossetia–Alania, 363110, Russian Federation; e-mail: ironlag@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2790-7895

Valentina B. Tsugkieva, DSc (Ag), Professor, Head of the Department of Agricultural Production and Processing Technology, Gorsky State Agrarian University; 37 Kirova St., Vladikavkaz, 362040, Russian Federation; e-mail: tsugkieva.valya@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-2960-8266

Eleonora A. Tsagaraeva, DSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Natural Sciences, Gorsky State Agrarian University; 37 Kirova St., Vladikavkaz, 362040, Russian Federation; e-mail: eleonorazag@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-1624-737X

Научная статья
УДК 635.042:631.8
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-45-56

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

Влияние ауксинов на каллусогенез микроклонов *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.

Светлана Михайловна Зайцева✉, Рима Нориковна Киракосян, Елизавета Алексеевна Болотина

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

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

Аннотация
Sequoia sempervirens (D. Don) Endl. – реликтовые гигантские растения, репродуктивная уязвимость которых не вызывает сомнения. В настоящее время остро стоит вопрос истощения природных популяций и исчезновения растений, поэтому особую актуальность приобретают методы биотехнологии для создания генетических банков и биоресурсных коллекций *in vitro*. К таким технологиям относится метод клонального микроразмножения, позволяющий получать генетически стабильный, «здоровый» посадочный материал с высоким коэффициентом размножения. Экстрактивные вещества из тканей *Sequoia sempervirens* обладают высокой биологической активностью. Асептические культуры *in vitro* секвойи также сохраняют способность к биосинтезу веществ с высокой биологической активностью. Известно, что культуры *in vitro* голосеменных растений отличаются сложностью при инициации и низким темпом роста, поэтому особую актуальность приобретают исследования, направленные на преодоление этих методических барьеров. В исследованиях представлен метод получения каллусной ткани из нижнего апекса микроклонов *S. Sempervirens*, культивируемых на питательной среде по прописи MS с добавлением различных ауксинов (2,4-D, ИУК, ИМК, НУК) в концентрации 3 мг/л. Наиболее ранней активацией процесса дедифференциации отличался вариант среды с НУК, в то время как каллус, культивируемый на питательной среде с ИУК, характеризовался низким темпом роста и приобретал темно-коричневое окрашивание.

Ключевые слова
Sequoia sempervirens, микроклоны, каллусная ткань, апекс, ауксины, 2,4-D, ИУК, ИМК, НУК

Благодарности
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24–76–00070 «Получение клеточных культур in vitro реликтовых и находящихся под угрозой исчезновения голосеменных растений рода Sequoia и изучение биологической активности ее метаболитов» (Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева).

Для цитирования
Зайцева С.М., Киракосян Р.Н., Болотина Е.А. Влияние ауксинов на каллусогенез микроклонов *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 45–56.

Effect of auxins on the callusogenesis in microclones of *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.

Svetlana M. Zaytseva✉, Rima N. Kirakosyan, Elizaveta A. Bolotina

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

✉**Corresponding author:** smzaytseva@yandex.ru

Abstract

Sequoia sempervirens (D. Don) Endl. are relict giant plants whose reproductive vulnerability cannot be challenged. Currently, the depletion of natural populations and the risk of plant extinction are acute issues. Therefore, biotechnological methods for creating *in vitro* genetic banks and bioresource collections are becoming particularly relevant. Such technologies include clonal micropropagation, which allows obtaining genetically stable, "healthy" planting material with a high reproduction rate. Extractive substances from *Sequoia sempervirens* tissues exhibit high biological activity. Aseptic *in vitro* cultures also retain the ability to biosynthesize substances with high biological activity. It is known that *in vitro* gymnosperms cultures are challenging to initiate and exhibit slow growth rates. Therefore, the study aimed at overcoming these methodological barriers is of particular importance. This study presents a method for obtaining callus tissue from the loewr apex of *S. sempervirens* microclones cultivated on Murashige and Skoog (MS) nutrient medium supplemented with various auxins (2,4-D, IAA, IBA, and NAA) at a concentration of 3 mg/L. The nutrient medium variant with NAA showed the earliest activation of the dedifferentiation process. In contrast, callus cultivated on the medium with IAA exhibited a low growth rate and developed a dark brown colouration.

Keywords

Sequoia sempervirens, microclones, callus tissue, apex, auxins, 2,4-D, IAA, IBA, NAA

Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 24–76–00070 "Obtaining in vitro cell cultures of relict and endangered gymnosperms of the genus Sequoia and studying the biological activity of its metabolites" (Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy).

For citation

Zaytseva S.M., Kirakosyan R.N., Bolotina E.A. Effect of auxins on the callusogenesis in microclones of *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):45–56.

Введение

Introduction

Sequoia sempervirens (D. Don) – это эндемичные и самые высокорослые реликтовые растения [1] с ограниченным ареалом. Природным ареалом является узкая полоса вдоль тихоокеанского побережья Северной Америки от Калифорнии до Орегона. Секвойя имеет ценную плотную древесину, характеризующуюся долговечностью,

отличающуюся низкой усадкой при высыхании и структурной стабильностью [2]. Древесина секвойи обладает исключительной устойчивостью к огню, грибковому разложению [3], к атаке насекомых и патогенных микроорганизмов [4, 5], в ней накапливаются уникальные метаболиты, не имеющие синтетических аналогов. Экстракты из растений секвойи вечнозеленой привлекают внимание фармакологов благодаря антиоксидантным свойствам и широкому спектру биологической активности. Недавно была установлена способность экстрактов секвойи подавлять рост культуры раковых клеток человека [6]. По мнению ряда исследователей, вероятно, такие свойства обусловлены синтезом вторичных метаболитов. Биосинтез низкомолекулярных веществ вторичной природы характерен для определенных представителей голосеменных растений. Было показано, что *S. sempervirens* накапливает уникальные метаболиты, свойственные исключительно растениям секвойи, – секвосемпервирин А, обнаруженный в ветвях и листьях [7], и секвирин В и С – в древесине [8].

Дикорастущие растения, накапливающие особо важные метаболиты, под действием антропогенного давления сокращают природный ареал произрастания. Под угрозу истощения природных популяций и исчезновения попадают в первую очередь реликтовые и имеющие высокую народно-хозяйственную ценность растения. Для сохранения биоразнообразия широко применяются современные методы биотехнологии, позволяющие создавать коллекции с уникальными генотипами в условиях *in vitro* [9]. К таким технологиям относятся методы культуры тканей *in vitro*, среди которых наиболее результативным является метод клонального микроразмножения. С его помощью в круглогодичном режиме проводятся работы с ограниченным объемом исходного растительного материала. В лабораторных условиях получают генетически стабильный, «здоровый» посадочный материал с высоким коэффициентом размножения [10].

Одним из наиболее важных этапов микроклонального размножения является индукция ризогенеза. Образование развитой корневой системы стимулируется композицией минерального состава и фитогормонов. Согласно данным исследований по влиянию ауксинов на ризогенез *Sequoia sempervirens* (а-нафтилуксусная кислота (НУК), индол-3-масляная кислота (ИМК) 50 мкМ (~10 мг/л)) образование корней отмечено у 75% микроклонов, культивируемых на питательной среде, содержащей только НУК [5].

Когда анализировали в течение 90 дней влияние ИМК в различных концентрациях на способность к образованию корней микроклонами *Sequoia sempervirens*, было отмечено ингибирующее действие на корнеобразование ее высоких концентраций [11].

В более раннем эксперименте использовалась питательная среда Murashige & Skoog (MS), содержащая НУК, ИМК или 2,4-дихлорфеноксиуксусную кислоту (2,4-D) в концентрациях 0,5 и 1,0 мг/л. Результаты показали, что добавление ауксинов в питательную среду в указанных концентрациях не стимулирует процесс корнеобразования, однако стимулируется процесс каллусообразования [12].

Культивирование каллусной культуры *Sequoia sempervirens* на среде MS с добавлением 2,4-D, НУК, трихлорфеноксиуксусной кислоты и п-хлорфеноксиуксусной кислоты) в дозах 2, 4 и 6 мг/л способствовало увеличению биомассы [13].

Утверждается, что генотип является основным фактором, влияющим на процент укоренения, количество образовавшихся корней, длину главного корня и каллусогенез *Sequoia sempervirens* [14].

Следует отметить определенные трудности при культивировании древесных растений в условиях *in vitro*, особенно голосеменных, что обусловлено их

активным метаболизмом и образованием разнообразных веществ вторичной природы. Ранее нами было отмечено угнетение каллусогенеза на эксплантах реликтовых растений, богатых полифенолами, культивируемых в присутствии света. Каллусную ткань обычно культивируют на среде MS или на среде для древесных растений (WPM) с добавлением БАП и 2,4-D, которые способствуют делению и росту клеток [15, 16]. У голосеменных растений процесс инициации каллусных культур на экспланте и последующая их биосинтетическая активность по отношению к целевым веществам зависят от элиситоров как физической, так и химической природы. Известно, что асептические культуры голосеменных растений успешно используются в качестве источника уникальных вторичных метаболитов [17]. К наиболее доступным элиситерам можно отнести гормональный баланс питательной среды и применяемый фоторежим [18, 19]. Ранее в наших исследованиях было показано увеличение биосинтетической активности в культурах *in vitro* секвойи, инициированных при 16-часовом фотопериоде, однако эти варианты отмечались весьма низким каллусогенезом и слабой жизнеспособностью [15].

Несмотря на многообещающий потенциал каллуса секвойи в биотехнологии, фармакогнозии и косметологии, остаются нерешенными задачи по оптимизации условий каллусогенеза, а также культивирования с сохранением высокой биосинтетической активности по отношению к вторичным метаболитам.

Цель исследований: разработка высокоэффективной методики массового получения в условиях *in vitro* микроклонов *S. sempervirens* с последующим их использованием в качестве экспланта для стабильного получения каллусных культур; изучение влияния ауксинов (2,4-D, ИУК, ИМК, НУК) на каллусогенез микроклонов *S. sempervirens* в условиях *in vitro*.

Методика исследований
Research method

Объектом исследований являлась стабильная культура микроклонов, полученная согласно ранее описанной методике патента [20] и культивируемая в условиях *in vitro* более 30 месяцев. Микрочеренки длиной 20 мм помещались в пробирки на питательную среду MS [18], модифицированную по вышеуказанной методике [20] и дополненную различными гормонами с ауксиновой активностью; 2,4-D, индол-3-уксусная кислота (ИУК), индол-3-масляная кислота (ИМК) или α-нафтилуксусная кислота (НУК) в концентрации 3 мг/л. В качестве контроля использовали вариант питательной среды без добавления гормонов (табл. 1). Культивирование осуществлялось при 16-часовом фотопериоде и температуре 21-22°С в течение 40 суток.

Оценку морфофизиологических характеристик ассептической культуры клеток *S. sempervirens* выполняли с использованием методов световой микроскопии и витальных красителей (0,025% синего Эванса) на временных препаратах.

Исследования проводили в двух аналитических и двух биологических повторностях. Статистическая обработка данных произведена по общепринятым методикам [21]. Данные по эффективности вариантов эксперимента обрабатывали методом дисперсионного анализа при доверительном интервале 95%.

Таблица 1

Варианты питательных сред для индуцирования каллусогенеза на микроклонах *S. sempervirens*

Table 1

Variants of nutrient media for callusogenesis induction in *S. sempervirens* microclones

Вариант	Питательная среда и гормон
Контроль	MS
2,4-D3	MS + 2,4-D3 мг/л
ИУК 3	MS + ИУК 3 мг/л
ИМК 3	MS + ИМК 3 мг/л
НУК 3	MS + НУК 3 мг/л

Примечание. MS – Murashige & Skoog; 2,4-D – 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота; ИМК – индол-3-масляная кислота; ИУК – индол-3-уксусная кислота; НУК – α-нафтилуксусная кислота.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

При использовании в качестве экспланта черенков микроклонов секвойи, помещенных в культуральные пробирки вертикально, уже через 15 суток культивирования наблюдалось набухание нижнего апекса у микроклонов, культивируемых на вариантах питательных сред с добавлением различных ауксинов в концентрации 3 мг/л (рис. 1). Наиболее активно процесс дедифференциации проходил на варианте с НУК в концентрации 3 мг/л.

Спустя 8-10 суток у микрорастений было отмечено активное образование каллусных клеток. Наиболее интенсивный каллусогенез был характерен для тех вариантов, где присутствовали акусины ИУК и НУК в концентрации 3 мг/л. Кроме того, в этот период для каждого микрочеренка *S. sempervirens* наблюдалось и увеличение длины микропобега.

Таким образом, присутствие всех изучаемых ауксинов в питательной среде активировало не только процесс каллусогенеза, но и ростовые характеристики микрорастений.

Следует отметить, что каллусогенез был повсеместным (100%) на всех вариантах питательных сред с добавлением ауксинов, за исключением образцов контрольного варианта, культивируемого без добавления гормонов. На протяжении всего периода культивирования инициированный каллус отличался темпами роста в зависимости от типа присутствующих ауксинов в питательной среде. Например, через 40 суток культивирования каллус на вариантах питательной среды с использованием 3 мг/л ИУК характеризовался низким темпом роста и приобретал темно-коричневое окрашивание, в то время как на вариантах питательных сред с 2,4-D, НУК и ИМК в концентрации 3 мг/л каллус оставался светлоокрашенным (светло-коричневый, желто-зеленый) и сохранял высокие темпы роста (рис. 2).

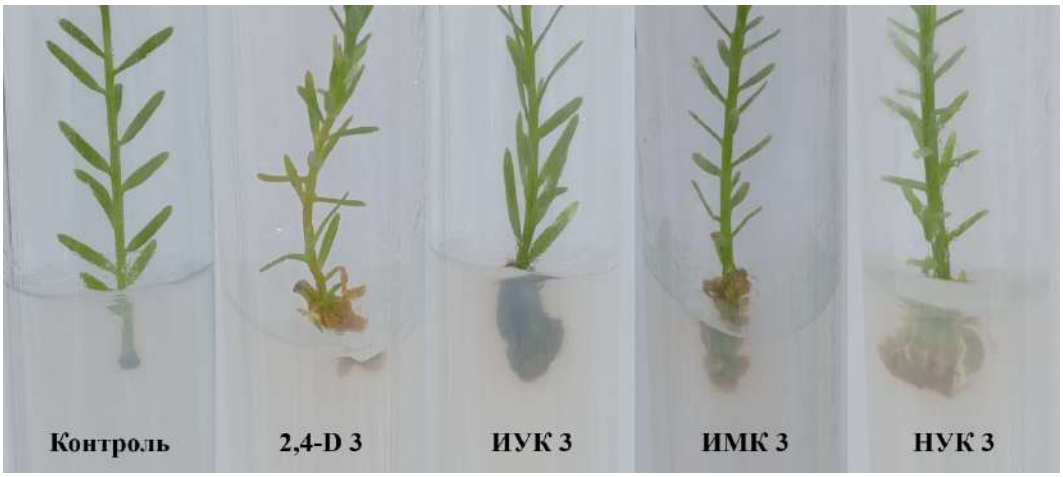

Рис. 1. Инициация каллуса из нижнего апекса микроклонов *Sequoia sempervirens*, культивируемых на питательных средах по прописи MS с добавлением (слева направо): Контроль, 2,4-D, ИУК, ИМК и НУК в концентрации 3 мг/л (15 суток) (Контроль – без гормонов, 2,4-D – 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота, ИМК – индол-3-масляная кислота, ИУК – индол-3-уксусная кислота, НУК – α-нафтилуксусная кислота)

Figure 1. Callusogenesis from the lower apex of *Sequoia sempervirens* microclones on MS nutrient media supplemented with auxins (left to right: Control, 2,4-D, IAA, IBA and NAA) at a concentration of 3 mg/L (15 days) (Control – hormone-free medium, 2,4-D – 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, IBA – indole-3-butyric acid, IAA – indole-3-acetic acid, NAA – α-naphthylacetic acid)

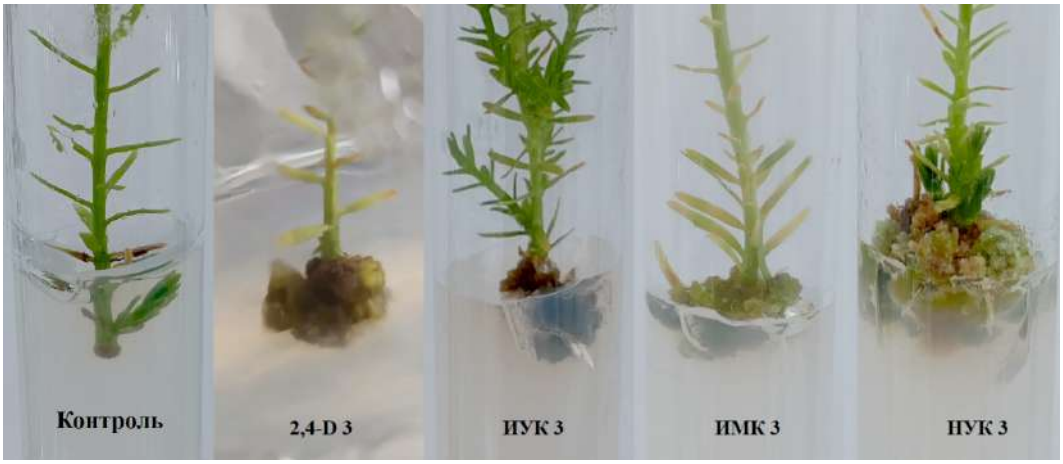

Рис. 2. Каллусогенез из нижнего апекса микроклонов *Sequoia sempervirens* на питательных средах MS с добавлением ауксинов (слева направо): Контроль, 2,4-D, ИУК, ИМК и НУК) в концентрации 3 мг/л (40 суток) (Контроль – без гормонов, 2,4-D – 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота, ИМК – индол-3-масляная кислота, ИУК – индол-3-уксусная кислота, НУК – α-нафтилуксусная кислота)

Figure 2. Callusogenesis from the lower apex of *Sequoia sempervirens* microclones on MS nutrient media supplemented with auxins (left to right: Control, 2,4-D, IAA, IBA and NAA) at a concentration of 3 mg/L (40 days) (Control – hormone-free medium, 2,4-D – 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, IBA – indole-3-butyric acid, IAA – indole-3-acetic acid, NAA – α-naphthylacetic acid)

На вариантах питательных сред с 2,4-D, НУК и ИМК в концентрации 3 мг/л светлоокрашенная каллусная ткань характеризовалась рыхлой структурой и отсутствием морфогенеза. Темноокрашенный каллус на вариантах питательной среды с использованием 3 мг/л ИУК характеризовался более плотной структурой и в 30% отмечался морфогенез (табл. 2). Однако за 40 суток культивирования ни в одном из изучаемых вариантов не индуцировался ризогенез.

Условия освещения существенно влияют на образование каллуса. В ранних исследованиях отмечалось, что 16-часовой фотопериод может привести к образованию более темного и менее жизнеспособного каллуса *Sequoia sempervirens*, в то время как отсутствие освещения способствует активному увеличению биомассы [6, 13]. Однако в данном случае полученный каллус в вариантах с 2,4-D, ИМК или НУК не темнел на всем этапе культивирования. Возможно, это связано с более низким содержанием полифенолов в интактных тканях микроклонов, произрастающих в условиях *in vitro* и являющихся эксплантом для каллусогенеза, по сравнению с интактными тканями материнского растения секвойи. Изменение биосинтетической активности в условиях *in vitro* характерно для растительных тканей, и особенно сильное влияние может оказать тип исходного экспланта [22].

Каллусная ткань, индуцированная из нижнего апекса микроклона, характеризовалась клетками округлой формы паренхимного типа, а окрашивание витальными реактивами выявило высокий процент жизнеспособных клеток – более 95% во всех вариантах (рис. 3а). В случае использования ауксинов (ИУК) наблюдались морфогенные очаги с формирующейся проводящей тканью (рис. 3б).

Таблица 2

Влияние ауксинов на каллусогенез микроклонов *S. sempervirens*

Table 2

Effect of auxins on callusogenesis in *S. sempervirens* microclones

Вариант питательной среды	Каллус	Цвет каллуса	Плотность каллуса	Морфогенность каллуса
MS	–	–	–	–
MS + 2,4-D3 мг/л	++	коричневый, желтый, зеленый	рыхлый	нет
MS + ИУК 3 мг/л	+	темно-коричневый, зеленый	плотный	да
MS + ИМК 3 мг/л	++	коричневый, желтый, зеленый	рыхлый	нет
MS + НУК 3 мг/л	++	коричневый, желтый, зеленый	рыхлый	нет

Примечание. – – каллус отсутствует; + – умеренный рост каллуса; ++ – хороший рост каллуса.

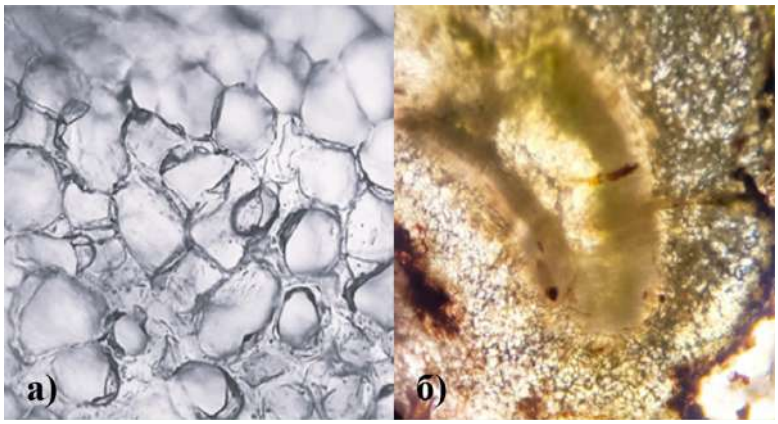

Рис. 3. Каллусные культуры, инициируемые из нижнего апекса микроклонов *Sequoia sempervirens* на питательных средах MS с добавлением ауксинов 2,4-D в концентрации 3 мг/л (а), и образование морфогенных очагов в куллусной ткани, культивируемой на питательной среде с ИУК 3 мг/л (б) (в течение 40 суток культивирования) (2,4-D – 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота, ИУК – индол-3-уксусная кислота)

Figure 3. Callus cultures initiated from the lower apex of *Sequoia sempervirens* microclones on MS nutrient media supplemented with 2,4-D auxins at a concentration of 3 mg/L (a) and the formation of morphogenic foci in cullus tissue cultured on a nutrient medium with an IAA of 3 mg/L (б) during 40 days of cultivation (2,4-D – 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, IAA – indole-3-acetic acid)

Выводы

Conclusions

В представленных исследованиях разработана методика *in vitro* быстрого и достоверного получения хорошо пролиферирующей каллусной ткани из нижнего апекса микроклонов *Sequoia sempervirens,* где наилучшие результаты показало использование α-нафтилуксусной и индол-3-масляной кислоты в концентрации 3 мг/л в питательной среде по прописи MS. При использовании в тождественных концентрациях 2,4-D и ИУК инициированный каллус характеризовался плотной консистенцией, более темным окрашиванием и низким темпом роста. По результатам наших наблюдений, из всех ауксинов применение 2,4-D в концентрации 3 мг/л является менее целесообразным.

Таким образом, при использовании данного метода *in vitro* можно успешно получать в короткие сроки (5-6 недель) большую биомассу каллусных культур у хвойных растений, введение в асептических условия которых сопровождается значительными трудностями. Полученные результаты могут быть адаптированы для других трудно возобновляемых реликтовых голосеменных растений рода *Taxus* и *Sequoia*.

Список источников

1. Disney M., Burt A., Wilkes P., Armston J. et al. New 3D measurements of large redwood trees for biomass and structure. *Scientific Reports*. 2020;10(1):16721. https://doi.org/10.1038/s41598-020-73733-6

2. Pereira M. de O., Angelo A.C., Navroski M.C., Dobner M. et al. Vegetative rescue and rooting of cuttings of different stock plants of *Sequoia sempervirens*. *Cerne*. 2017;23:435-444. https://doi.org/10.1590/01047760201723042452

3. Sillett S.C., Antoine M.E., Carroll A.L., Graham M.E. et al. Rangewide climatic sensitivities and non-timber values of tall Sequoia sempervirens forests. *Forest Ecology and Management*. 2022;526:120573. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120573

4. Nydick K.R., Stephenson N.L., Ambrose A.R., Asner G.P. et al. Leaf to landscape responses of giant sequoia to hotter drought: An introduction and synthesis for the special section. *Forest Ecology and Management*. 2018;419:249-256. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.028

5. Vargas A.R., Castander-Olarieta A., Moncalean P., Montalban I.A. Optimization of the micropropagation of elite adult trees of *Sequoia sempervirens*: forest species of interest in the Basque Country, Spain. *Revista Bionatura*. 2021;6(1):1511-1519. https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.11

6. Kirakosyan R.N., Kalasnikova E.A., Bolotina E.A., Saleh A. et al. Localization of Secondary Metabolites in Relict Gymnosperms of the Genus Sequoia *In Vivo* and in Cell Cultures *In Vitro*, and the Biological Activity of Their Extracts. *Reproductive and Developmental Biology*. 2024;14(12):1694. https://doi.org/10.3390/life14121694

7. Zhang Y.M., Tan N.H., He M., Lu Y. et al. Sequosempervirin A, a novel spirocyclic compound from *Sequoia sempervirens*. *Tetrahedron Letters*. 2004;45(22):4319-4321. https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2004.04.038

8. Hatam N.A.R., Whiting D.A. The constituents of Californian redwood: the constitution, absolute stereochemistry, and chemistry of sequirin-B and sequirin-C. *Journal of the Chemical Society C*: *Organic.* 1969;14:1921-1932. https://doi.org/10.1039/J39690001921

9. Третьякова И.Н., Ворошилова Е.В., Шуваев Д.Н., Лукина А.С. Образование каллуса и индукция соматических зародышей в культуре *in vitro* у *Pinus sibirica* Du Tour // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2013. Т. 6, № 1. С. 44–60. EDN: PYLGJJ

10. Ahmad M.A., Javed R., Adeel M., Rizwan M. et al. Engineered ZnO and CuO nanoparticles ameliorate morphological and biochemical response in tissue culture regenerants of candyleaf (*Stevia rebaudiana*). *Molecule.* 2020;(25)6:1356. https://doi.org/10.3390/molecules25061356

11. Pereira M.O., Angelo A.C., Navroski M.C., de Oliveira L.M. et al. Mini-cuttings rooting of *Sequoia sempervirens* at different IBA concentrations and clones. *FLORESTA, Curitiba, PR.* 2020;50(2):1279-1286. https://doi.org/10.5380/rf.v50i2.62579

12. Laslo V., Agud E.M., Vicas S. *In vitro* modeling of morfogenesys processes in *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl, via the use of phytohormones. *Natural Resources and Sustainable Development.* 2015:73-78. https://doi.org/10.5555/20163167398

13. El-Hawary S.S., Abd El-Kader E.M., Rabeh M.A., Abdel Jaleel G.A. et al. Eliciting callus culture for production of hepatoprotective flavonoids and phenolics from *Sequoia sempervirens* (D. Don Endl). *Natural Product Research*. 2020;34(21):3125-3129. https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1607334

14. Neale D.B., Marshall K.A., Sederoff R.R. Chloroplast and mitochondrial DNA are paternally inherited in *Sequoia sempervirens* D. Don Endl. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1989;86(23):9347-9349. https://doi.org/10.1073/pnas.86.23.934

15. Zaitseva S.M., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N. The influence of endogenous polyphenols, photoperiod and mineral composition of the nutrient medium on the formation of callus tissue of relic gymnosperms *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. *Problems of Biological Medical and Pharmaceutical Chemistry.* 2023;26(3):46-57. https://doi.org/10.29296/25877313-2023-03-06

16. Bourgkard F., Favre J.M. Somatic Embryos from Callus of *Sequoia Sempervirens*. *Plant Cell Reports.* 1988;7(6):445-448. https://doi.org/10.1007/BF00269534

17. Cetin E.S. Induction of secondary metabolite production by UV-C radiation in *Vitis vinifera* L. Okuzgozu callus cultures. *Biological Research*. 2014;47(1):37. https://doi.org/10.1186/0717-6287-47-37

18. Томилова С.В., Глоба Е.Б., Демидова Е.В., Носов А.М. Вторичный метаболизм в культуре клеток *in vitro Taxus* spp // *Физиология растений*. 2023. Т. 70, № 3. С. 227–240. https://doi.org/10.31857/S0015330322600784

19. Zaitseva S.M., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N., Balakina A.A. *In vitro* cell cultures of *Ginkgo biloba* L., introduced in the Moscow region are promising sources of substances with high biological activity. *Problems of Biological Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2024;27(10):67-78. https://doi: 10.29296/25877313-2024-10-10

20. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*. 1962;15(3):473-497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

21. Способ клонального микроразмножения секвойи вечнозеленой (*Sequoia sempervirens* L.): Патент 2815450 Российская Федерация, МПК A01H 4/00, СПК A01H 4/00 / С.М. Зайцева, Е.А. Калашникова, Р.Н. Киракосян, Е.А. Болотина. 2023.

22. Урбах В.Ю. *Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях*. Москва: Медицина, 1975. 297 с.

23. Носов А.М. Использование клеточных технологий для промышленного получения биологически активных веществ растительного происхождения // *Биотехнология*. 2010. № 5. С. 8–28.

References

1. Disney M., Burt A., Wilkes P., Armston J. et al. New 3D measurements of large redwood trees for biomass and structure. *Scientific Reports*. 2020;10(1):16721. https://doi.org/10.1038/s41598-020-73733-6

2. Pereira M. de O., Angelo A.C., Navroski M.C., Dobner M. et al. Vegetative rescue and rooting of cuttings of different stock plants of *Sequoia sempervirens*. *Cerne*. 2017;23:435-444. https://doi.org/10.1590/01047760201723042452

3. Sillett S.C., Antoine M.E., Carroll A.L., Graham M.E. et al. Rangewide climatic sensitivities and non-timber values of tall Sequoia sempervirens forests. *Forest Ecology and Management*. 2022;526:120573. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120573

4. Nydick K.R., Stephenson N.L., Ambrose A.R., Asner G.P. et al. Leaf to landscape responses of giant sequoia to hotter drought: An introduction and synthesis for the special section. *Forest Ecology and Management*. 2018;419:249-256. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.028

5. Vargas A.R., Castander-Olarieta A., Moncalean P., Montalban I.A. Optimization of the micropropagation of elite adult trees of *Sequoia sempervirens*: forest species of interest in the Basque Country, Spain. *Revista Bionatura*. 2021;6(1):1511-1519. https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.11

6. Kirakosyan R.N., Kalasnikova E.A., Bolotina E.A., Saleh A. et al. Localization of Secondary Metabolites in Relict Gymnosperms of the Genus Sequoia *In Vivo* and in Cell Cultures *In Vitro*, and the Biological Activity of Their Extracts. *Reproductive and Developmental Biology*. 2024;14(12):1694. https://doi.org/10.3390/life14121694

7. Zhang Y.M., Tan N.H., He M., Lu Y. et al. Sequosempervirin A, a novel spirocyclic compound from *Sequoia sempervirens*. *Tetrahedron Letters*. 2004;45(22):4319-4321. https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2004.04.038

8. Hatam N.A.R., Whiting D.A. The constituents of Californian redwood: the constitution, absolute stereochemistry, and chemistry of sequirin-B and

sequirin-C. *Journal of the Chemical Society C*: *Organic.* 1969;14:1921-1932. https://doi.org/10.1039/J39690001921

9. Tretyakova I.N., Voroshilova E.V., Shuvaev D.N., Lukina A.S. Formation of callus and induction of somatic embryos *in vitro* culture in *Pinus sibirica* Du Tour. *Journal of Siberian Federal University. Biology.* 2013;6(1):44-60. (In Russ.)

10. Ahmad M.A., Javed R., Adeel M., Rizwan M. et al. Engineered ZnO and CuO nanoparticles ameliorate morphological and biochemical response in tissue culture regenerants of candyleaf (*Stevia rebaudiana*). *Molecule.* 2020;25(6):1356. https://doi.org/10.3390/molecules25061356

11. Pereira M.O., Angelo A.C., Navroski M.C., de Oliveira L.M. et al. Mini-cuttings rooting of *Sequoia sempervirens* at different IBA concentrations and clones. *FLORESTA, Curitiba, PR.* 2020;50(2):1279-1286. https://doi.org/10.5380/rf.v50i2.62579

12. Laslo V., Agud E.M., Vicas S. *In vitro* modeling of morfogenesys processes in *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl, via the use of phytohormones. *Natural Resources and Sustainable Development.* 2015:73-78. https://doi.org/10.5555/20163167398

13. El-Hawary S.S., Abd El-Kader E.M., Rabeh M.A., Abdel Jaleel G.A. et al. Eliciting callus culture for production of hepatoprotective flavonoids and phenolics from *Sequoia sempervirens* (D. Don Endl). *Natural Product Research*. 2020;34(21):3125-3129. https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1607334

14. Neale D.B., Marshall K.A., Sederoff R.R. Chloroplast and mitochondrial DNA are paternally inherited in *Sequoia sempervirens* D. Don Endl. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1989;86(23):9347-9349. https://doi.org/10.1073/pnas.86.23.934

15. Zaitseva S.M., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N. The influence of endogenous polyphenols, photoperiod and mineral composition of the nutrient medium on the formation of callus tissue of relic gymnosperms *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. *Problems of Biological Medical and Pharmaceutical Chemistry.* 2023;26(3):46-57. https://doi.org/10.29296/25877313-2023-03-06

16. Bourgkard F., Favre J.M. Somatic Embryos from Callus of *Sequoia Sempervirens*. *Plant Cell Reports.* 1988;7(6):445-48. https://doi.org/10.1007/BF00269534

17. Cetin E.S. Induction of secondary metabolite production by UV-C radiation in *Vitis vinifera* L. Okuzgozu callus cultures. *Biological Research*. 2014;47(1):37. https://doi.org/10.1186/0717-6287-47-37

18. Tomilova S.V., Globa E.B., Demidova E.V., Nosov A.M. Secondary metabolism in *Taxus spp*. plant cell culture *in vitro*. *Fiziologiya rastenij*. 2023;70(3):227-240. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0015330322600784

19. Zaitseva S.M., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N., Balakina A.A. *In vitro* cell cultures of *Ginkgo biloba* L., introduced in the Moscow region are promising sources of substances with high biological activity. *Problems of Biological Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2024;27(10):67-78. https://doi:10.29296/25877313-2024-10-10

20. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*. 1962;15(3):473-497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

21. Patent 2815450 (Russian Federation): IPC A01H 4/00, SPC A01H 4/00. Method for clonal micropropagation of evergreen sequoia (*Sequoia sempervirens* L.). Zaitseva S.M., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N., Bolotina E.A., 2023. (In Russ.)

22. Urbach V.Yu. *Statistical analysis in biological and medical research*. Moscow, USSR: Meditsina, 1975:297. (In Russ.)

23. Nosov A.M. Application of cell technologies for production of plant-derived bioactive substances of plant origin. *Biotekhnologiya*. 2010;(5):8-28. (In Russ.)

Сведения об авторах

Зайцева Светлана Михайловна, канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии, 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: smzaytseva@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-9137-3774

Рима Нориковна Киракосян, канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии, 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: mia41291@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5244-4311

Елизавета Алексеевна Болотина, аспирант кафедры биотехнологии, 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: LizavetaRodBol@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0007-9006-6044

Information about the authors

Svetlana M. Zaytseva, CSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: smzaytseva@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-9137-3774

Rima N. Kirakosyan, CSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: mia41291@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5244-4311

Elizaveta A. Bolotina, postgraduate student of the Department of Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: LizavetaRodBol@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0007-9006-6044

Научная статья
УДК 631.531.027.3
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-57-66

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

Влияние термической обработки на качество семян люцерны

Герасим Викторович Лущенко✉, **Вадим Ирбекович Гасиев**

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт
горного и предгорного сельского хозяйства –
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального научного центра «Владикавказский научный центр
Российской академии наук», Михайловское, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** geri4@list.ru

Аннотация
Приведены результаты исследований по влиянию прогревания семян на посевах люцерны синей двух сортов – Верко и Релакс. Учитывали всхожесть и энергию прорастания. Термический фактор одинаково благоприятно воздействовал на оба сорта. Наилучший эффект от прогревания показали семена желтой окраски на варианте при температуре 40°С в течение 3 суток, превысив контрольный вариант по энергии всхожести на 44%. В опыте, где прогревали семена в термостате и солнечными лучами, у последнего варианта был худший эффект, всхожесть увеличилась незначительно в связи с недостаточной продолжительностью прогревания. Наибольший эффект на всхожесть семян при прогревании их в термостате оказал вариант, в котором воздействовали на семена температурой 40°С в течение 5 суток, в результате чего всхожесть увеличилась на 30%. Исследуя действие термической обработки на семена, собранные с растений люцерны разных лет жизни, выявили, что семена с растений первого года жизни имели лучший эффект от термической обработки, увеличив всхожесть семян на 47%. Изучая вопрос о длительности эффекта от прогревания семян для последующего их хранения, взяли семена разных сроков посева и уборки. После термической обработки и определения их всхожести семена оставляли на хранение в амбаре на 2 года, предварительно проверив их всхожесть на следующий год, и далее – на второй год хранения. В результате у желтых семян всхожесть увеличилась до 98%, а у коричневых – наоборот, снизилась на 54% по сравнению с контролем.

Ключевые слова
люцерна, термический фактор, качество семян, прогревание, термостат, проращивание

Для цитирования
Лущенко Г.В., Гасиев В.И. Влияние термической обработки на качество семян люцерны // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 57–66.

Effect of thermal treatment on alfalfa seed quality

Gerasim V. Lushchenko✉, Vadim I. Gasiev

North Caucasian Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture –
Branch of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Mikhaylovskoe Vlg., Russia

✉**Corresponding author:** geri4@list.ru

Abstract
The study presents the results of investigating the effect of seed warming on two alfalfa varieties – Verko and Relax. Germination rate and germination energy were evaluated. The thermal factor had an equally beneficial effect on both varieties. The best results were observed for yellow-coloured seeds treated at 40°C for three days. This variant exceeded the control in germination energy by 44%. In the experiment comparing seed warming in a thermostat versus warming using solar radiation, the latter variant showed a poorer effect. The germination rate increased only slightly due to insufficient warming duration. The highest effect on seed germination was achieved with thermostat warming at 40°C for five days. As a result, germination increased by 30%. When studying the effect of thermal treatment on seeds collected from alfalfa plants of different ages, it was found that seeds from first-year plants responded best to thermal treatment, showing a 47% increase in germination rate. To investigate the duration of the warming effect for subsequent seed storage, seeds from different sowing and harvesting periods were used. After thermal treatment and initial germination testing, the seeds were stored in a barn for two years. Their germination was checked one year after storage and then again after the second year. The results showed that yellow seeds demonstrated an increase in germination up to 98%, while brown seeds, in contrast, showed a 54% decrease in germination compared to the control.

Keywords
alfalfa, thermal factor, seed quality, warming, thermostat, germination

For citation
Lushchenko G.V., Gasiev V.I. Effect of thermal treatment on alfalfa seed quality. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):57–66.

Введение
Introduction

По ряду причин семенной материал многолетних бобовых трав после уборки имеет различный показатель жизнеспособности. Для получения хорошего урожая нужно уменьшить количество семян с пониженным потенциалом, для чего семена следует подвергать стимулирующему воздействию [1, 2].

Повышение урожайности кормовых культур с помощью современных технологий является одной из основных задач в сельском хозяйстве [3, 4]. Посевной материал играет значимую роль при продуктивности кормовых трав, в связи с чем необходимо повышать посевные качества семян [5, 6]. Эффективным способом для решения данной задачи является повышение качества семенного материала при помощи различных физических факторов, без загрязнения окружающей среды [7].

Для стимуляции семян имеется множество различных способов. Они подразделяются на 2 основные группы: химические и физические [8, 9]. Применение химического метода воздействия на семена достаточно глубоко изучено, и этот метод показывает высокую эффективность. Однако использование данного агроприема имеет свои недостатки, заключающиеся в высокой стоимости химических препаратов; также в связи с жесткими требованиями к их использованию оно становится не всегда актуальным [10, 11]. В последнее время интенсивно изучаются методы различных физических воздействий на семена с целью повышения качества посевного материала различных культур [12].

Несмотря на то, что у селекционных сортов бобовых трав твердосемянность сильно снижена, семена все же часто приходится специально обрабатывать [13]. Для скарификации созданы специальные машины, которые, к сожалению, выбраковывают значительное число семян, причем обычно ими оказываются крупные и лучшие семена [14].

Люцерна, являясь одной из ведущих кормовых культур, имеет богатый состав питательных веществ – таких, как протеин, аминокислоты и витамины. Используя люцерну на кормовые цели, можно обеспечить отрасль животноводства требуемым количеством белка [15].

Семенной материал люцерны весьма неоднороден. В каждой партии встречаются различные по цвету семена (темные, желтые), мелкие, различные по абсолютному весу 1000 семян и по другим признакам [16]. Кроме того, каждая партия имеет больший или меньший процент так называемых твердых семян, которые приходится подвергать скарификации для повышения процентной всхожести [17].

С учетом исследований ряда авторов о положительном влиянии воздушно-теплового прогревания на семена зерновых культур нами было принято решение изучить эффективность этого способа и в отношении семян люцерны [18].

Цель исследований: повышение качества семенного материала люцерны, изучение качества семян разной окраски, а также определение оптимального режима термической обработки семян.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые в экологических условиях Центрального Предкавказья проведены исследования по воздействию различных вариантов термической обработки на семена люцерны разной окраски.

Методика исследований
Research method

Место проведения исследований – Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – относится к III агроклиматической зоне: лесостепь с достаточным увлажнением на выщелоченных черноземах.

В опыте использовались одинаковые по окраске и выполненности семена сортов люцерны синей Верко и Релакс, хранившиеся в амбаре и в лаборатории. Прогревание производилось в термостате, снабженном электрическим терморегулятором, или на солнце, для чего семена расстилались тонким слоем на пологах и выносились на солнце в самое жаркое время дня на 10 ч. При проращивании прогретых и непрогретых семян учитывались всхожесть и энергия прорастания. Проращивание осуществлялось в чашках Петри в 4 повторностях по 100 семян в каждой при комнатной температуре и в термостате при температуре не выше 22°С.

Результаты и их обсуждение
Resultsanddiscussion

Опыт проводился с семенами люцерны сорта Верко, убранными в 2021 г., имеющими желтую и коричневую окраску. Семена люцерны на всех опытных вариантах начали прогреваться одновременно – 11 апреля 2022 г. (табл. 1).

Таблица 1

Результаты исследования оптимальных температур и длительности прогревания семян люцерны

Table 1

Results of studying optimal temperatures and durations of alfalfa seed warming

Количество, сутки	Желтые семена		Коричневые семена	
	проросших, %	эффективность действия, % к контролю	проросших, %	эффективность действия, % к контролю
Температура 20°С				
3	57	130	74	83
6	56	150	66	74
9	66	150	73	82
12	67	152	67	75
Температура 30°С				
3	59	134	80	90
6	67	152	77	87
9	69	157	70	79
12	69	157	64	72
Температура 40°С				
3	88	200	74	82
6	87	118	49	55
9	82	168	49	55
12	68	155	20	22
Контроль	44	100	89	100
	$НСР_{05}$ 0,38		$НСР_{05}$ 0,23	

Характеризуя данные таблицы, 1 необходимо отметить, что для повышения всхожести семян продолжительность прогревания нужно увеличивать. Наиболее эффективно прогревание воздействовало на желтые семена при температуре 40°С в течение 3 суток. Увеличение всхожести на этом варианте в 2 раза превысило контроль, составив 88%. Коричневые семена имели более низкую всхожесть – ниже стандарта на всех вариантах. Наиболее низкими показателями всхожести характеризовался вариант при температуре 40°С в течение 12 суток, когда всхожесть составила 20% при контроле 89%.

Семена с желтой и коричневой окраской неодинаково реагируют на прогревание. При постепенном повышении температуры и продолжительности прогревания коричневые семена постепенно снижают всхожесть. Невсхожие семена среди коричневой фракции являются нежизнеспособными, так как быстро загнивают, вследствие чего не произрастают при посеве в почву. Желтые семена активно реагируют на повышение температуры, и их всхожесть при оптимальных вариантах повышается до 200% по отношению к контролю. Только среди семян с желтой окраской имеются различия в процентном соотношении твердости их оболочки.

Второй опыт был заложен 29 апреля 2022 г. и является продолжением первого с несколько измененными вариантами. В опыте исследовались желтые семена люцерны синей сорта Релакс урожая 2021 г. (табл. 2).

Независимо от сорта действие термического фактора на всхожесть семян оказалось ощутимым во всех вариантах. Наибольший эффект от прогревания получился при 40°С в течение 5 суток, когда всхожесть семян увеличилась на 30%.

При прогревании семян на солнце в течение 5 дней всхожесть их повысилась незначительно, и в дальнейшем продолжительность их прогревания здесь была недостаточной.

Установлено, что наиболее эффективным является прогревание семян в течение 5 суток при температуре 40°С.

Данные о прогревании желтой фракции семян люцерны синей сорта Верко, собранных от растений разных лет жизни, приведены в таблице 3.

Таблица 2

Результаты прогревания семян

Table 2

Results of seed warming experiments

Время прогревания сухих семян	Всхожесть семян, %	Эффективность действия, % к контролю
На солнце 5 суток	74	109
В термостате 3 суток	80	118
В термостате 5 суток	89	130
Контроль (сухие семена)	68	100

$НСР_{05}$0,32

Таблица 3

Результаты прогревания семян люцерны желтой фракции

Table 3

Results of warming yellow fraction alfalfa seeds

Год			Всхожесть семян, %		Увеличение всхожести от прогревания, %
посева	уборки	жизни	без прогревания	прогревание в течение 5 суток при 40°С	
2021	2021	1	41,1	88,6	47,5
2020	2021	2	56,5	90,0	33,5
2019	2021	3	57,1	90,3	33,2
			$НСР_{05}$0,42	$НСР_{05}$0,16	

Как следует из данных таблицы 3, действие термического фактора сказывается в наибольшей степени на семенах от растений первого года жизни. Увеличение всхожести семян на этом варианте составило 47,5%.

Для изучения вопроса о том, как долго сохраняется стимулирующее действие прогревания на всхожесть, были взяты семена от разных сроков посева и уборки. После прогревания и установления показателей всхожести семена оставлялись на определенное время в амбаре, после чего их всхожесть вновь определялась. В этом опыте семена урожая 2021 г. с посевов 2020 г. были прогреты 30 апреля 2022 г., затем была проверена их всхожесть (отдельно желтых и коричневых семян). После этого их оставили на хранение в амбаре до весны 2023 г. Результаты опыта представлены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние прогревания семян на их всхожесть

Table 4

Effect of seed warming on germination rate

Вариант опыта	Семена (различных фракции)	Всхожесть в 2022 г.		Всхожесть в 2023 г.	
		по фракциям	среднее	по фракциям	среднее
Контроль	Желтые	52	65	91	58
	Коричневые	78		24	
Прогревание в термостате в течение 5 суток при температуре 40°С	Желтые	90	89	93	80
	Коричневые	88		66	
Обработка семян кипятком в течение 3 мин	Желтые	87	83	98	80
	Коричневые	79		62	
		$НСР_{05}$0,44		$НСР_{05}$0,36	

Из данных таблицы 4 следует, что сильный эффект термическая обработка оказывает на семена с желтой окраской, которые повысили процент всхожести по всем вариантам, очевидно, ввиду снижения процента твердых семян. Данные результаты исследований подтверждают, что при хранении уменьшается процент твердосемянности, в связи с чем повышается всхожесть желтых семян. Прогревание семян и двухлетнее хранение их в амбаре увеличили всхожесть желтых семян до 98%. Всхожесть же семян с коричневой окраской за 2 года хранения снизилась на 54% (контроль).

Выводы

Conclusions

По результатам проведенного опыта можно сделать хозяйственный вывод: семена люцерны можно прогревать в любое время года, причем стимулирующее действие от термического фактора не исчезает.

Прогревание семян люцерны повышает их всхожесть. Наилучший эффект от прогревания семян в термостате получается при температуре 40°С в течение 5 суток.

Семена с желтой и коричневой окраской по-разному реагируют на прогревание, и у желтых семян твердосемянность выше, чем у коричневых. Повышение температуры прогревания более эффективно воздействует на желтые семена: их всхожесть увеличивается в 2 раза по отношению к контрольному варианту.

Список источников

1. Мокеева С.А., Коконов С.И., Рябова Т.Н. Развитие и продуктивность козлятника восточного при предпосевной обработке семян // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 2 (50). С. 47–53. https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-47-53

2. Климов С.М., Горохов К.К., Дондоков Ю.Ж., Дринча В.М. Предпосевная обработка семян в небольших хозяйствах // *Кормопроизводство*. 2020. № 1. С. 31–35. EDN: IMTARI

3. Козырский В.В., Савченко В.В., Синявский А.Ю. Предпосевная обработка семян зернобобовых культур в магнитном поле // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13, № 1. С. 21–26. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-13-1-21-26

4. Страхов В.Ю., Вендин С.В., Саенко Ю.В. Предпосевная УФ-обработка семян сои: проращивание на витаминный корм // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 6. С. 46–52. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-46-52

5. Андросова Д.Н., Данилова Н.С., Афанасьева Е.А. Влияние предпосевной обработки семян на всхожесть видов рода *Iris* // *Наука и образование*. 2017. № 4 (88). С. 109–113. EDN: YUYXCG

6. Попова Т.Н. Семенная продуктивность сортов люцерны и ее составляющие // *Аграрный научный журнал*. 2020. № 12. С. 37–39. https://doi.org/10.28983/asj.y2020i12pp37-39

7. Миневич И.Э., Ущаповский И.В. Влияние ИК-облучения на биологическую ценность семян льна // *Аграрная наука*. 2020. № 11-12. С. 144–146. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-134-136

8. Подварко А.Т., Есипенко Л.П., Андросова В.М., Марченко Н.А. и др. Влияние различных дозировок и способов применения препарата Альбит, ТПС на урожайность подсолнечника в условиях 2018 года на Юге России // *Труды*

Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 77. С. 129–133. https://doi.org/10.21515/1999-1703-77-129-133

9. Пимохова Л.И., Яговенко Г.Л., Царапнева Ж.В., Мисникова Н.В. Предпосевная обработка семян люпина узколистного против антракноза и других болезней // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2021. Т. 51, № 4. С. 22–32. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-4-3

10. Волощук А.П., Волощук И.С., Глива В.В., Корецка М.И. и др. Предпосевная обработка семян как способ повышения посевных качеств рапса озимого в условиях западной Лесостепи Украины // *Вестник НГАУ* (*Новосибирский государственный аграрный университет*). 2017. № 1 (42). С. 24–29. EDN: YJKCTP

11. Крылов О.Н., Киселев М.М., Решетников А.Е., Абашева О.Ю. Предпосевная оптическая обработка семян зерновых культур на примере озимой ржи «Фаленская 4» // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2023. № 2. С. 214–230. https://doi.org/10.36107/spfp.2023.439

12. Борычев С.Н., Каширин Д.Е., Симдянкин А.А., Лимаренко Н.В. Обработка семян в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*: *Наука и высшее профессиональное образование*. 2022. № 2 (66). С. 339–347. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-42

13. Нелюбина Ж.С., Касаткина Н.И. Влияние ультрафиолетового облучения семян многолетних трав на их посевные качества // *Аграрная наука*. 2021. № 9. С. 97–100. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-352-9-97-100

14. Хасанов Э.Р., Мирзаматов Р.Р., Якупов А.М., Ямалетдинов М.М. Разработка и обоснование скарификатора с конусным диском для семян бобовых культур // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2023. Т. 18, № 3 (71). С. 102–110. https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-102-110

15. Бекузарова С.А., Гасиев В.И., Лущенко Г.В. Фитоценотическая парадигма в селекции бобовых трав на Северном Кавказе // *Кормопроизводство*. 2018. № 8. С. 24–29. EDN: XVIVRB

16. Кириллова Н.И., Дегтярева И.А. Показатели тест-растения при обработке модифицированными биофунгицидами // *Аграрная наука*. 2023. № 12. С. 114–117. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-114-117

17. Бурков А.И., Симонов М.В., Мокиев В.Ю. Исследование клеверотерки-скарификатора КС-0,2 с декой овального типа при скарификации семян // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2017. № 6 (61). С. 74–77. https://doi.org/10.30766/2072-9081

18. Дукси Ф. Способы обработки, позволяющие нарушить органическую стабильность семян *Ceratoniasiliqua* L. в лаборатории // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Агрономия и животноводство»*. 2022. Т. 17, № 2. С. 158–165. https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-2-158-165

References

1. Mokeeva S.A., Kokonov S.I., Ryabova T.N. Development and productivity of eastern galega during sowing seed treatment. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2020;(2(50)):47-53. (In Russ.) https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-47-53

2. Klimov S.M., Gorokhov K.K., Dondokov Yu.Zh., Drincha V.M. Seed treatment on small farms. *Kormoproizvodstvo*. 2020;(1):31-35. (In Russ.)

3. Kozyrskiy V.V., Savchenko V.V., Sinyavskiy A.Yu. Pre-sowing treatment of leguminous crop seeds with a magnetic field. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(1):21-26. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-13-1-21-26

4. Strakhov V.Yu., Vendin S.V., Saenko Yu.V. Pre-sowing uv treatment of soybean seeds: sprouting for vitamin feed. *Agricultural Engineering*. 2023;25(6):46-52. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-46-52

5. Androsova D.N., Danilova N.S., Afanasieva E.A. the effect of pre-sowing seed treatment on germination of species of genus *Iris*. *Nauka i obrazovanie.* 2017;(4):109-113. (In Russ.)

6. Popova T.N. Seed productivity of alfalfa varieties and its components. *The Agrarian Scientific Journal*. 2020;(12):37-39. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2020i12pp37-39

7. Minevich I.E., Uschapovsky I.V. Influence of ir radiation on the biological value of flax seeds. *Agrarian Science*. 2020;(11-12):144-146. (In Russ.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-134-136

8. Podvarko A.T., Esipenko L.P., Androsova V.M., Marchenko N.A. et al. Influence of different dosages and methods of the Albite, TPS preparation application on sunflower yield in the conditions of 2018 in the South of Russia. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019;(77):129-133. (In Russ.) https://doi.org/10.21515/1999-1703-77-129-133

9. Pimokhova L.I., Yagovenko G.L., Tsarapneva Zh.V., Misnikova N.V. Pre-sowing seed treatment of narrow-leafed lupin against anthracnose and other diseases. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2021;51(4):22-32. (In Russ.) https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-4-3

10. Voloshchuk A.P., Voloshchuk I.S., Gliva V.V., Koretska M.I. et al. Pre-sowing seed treatment as a way to increase the sowing qualities of winter rapeseed in the western forest-steppe of Ukraine. *Vestnik NSAU* (*Novosibirsk State Agrarian University*. 2017:(1(42)):24-29. (In Russ.)

11. Krylov O.N., Kiselyov M.M., Reshetnikov A.E., Abasheva O.Yu. Pre-sowing optical treatment of seeds of grain crops on the example of winter rye “Falenskaya 4”. *Storage and Processing of Farm Products*. 2023;(2):214-230. (In Russ.) https://doi.org/10.36107/spfp.2023.439

12. Borychev S.N., Kashirin D.E., Simdyankin A.A., Limarenko N.V. Seed treatment in electromagnetic field of ultrahigh frequency. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex*: *Science and Higher Education*. 2022;(2(66)):339-347. (In Russ .) https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-42

13. Nelyubina Zh.S., Kasatkina N.I. Influence of ultraviolet irradiation of perennial grasses seeds on their sowing quality. *Agrarian Science*. 2021;(9):97-100. (In Russ.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-352-9-97-100

14. Khasanov E.R., Mirzamatov R.R., Yakupov A.M., Yamaletdinov M.M. Development and justification of a scarifier with a cone disc for bean seeds. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2023;18(3):102-110. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-102-110

15. Bekuzarova S.A., Gasiev V.I., Lushchenko G.V. Phytocenotic paradigm in breeding of legume grasses in the North Caucasus. *Kormoproizvodstvo*. 2018;(8):24-29. (In Russ.)

16. Kirillova N.I., Degtyareva I.A Test-plant characteristics using modified biofungicides treatment. *Agrarian Science*. 2023;(12):114-117. (In Russ.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-114-117

17. Burkov A.I., Simonov M.V., Mokiev V.Yu. Research of clover-grater-and-scarificato r KS-0.2 with oval type deck at seeds scarification. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;(6(61)):74-77. (In Russ.) https://doi.org/10.30766/2072-9081

18. Duksy F. Effects of various pre-sowing treatments on invitro seed germination of Ceratoniasiliqua L. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2022:17(2):158-165. (In Russ.) https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-2-158-165

Сведения об авторах

Герасим Викторович Лущенко, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник отдела селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур, Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»; 363110, Российская Федерация, РСО-Алания, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1; e-mail: geri4@list.ru; https://orcid.org/0000-0002-3935-1962

Вадим Ирбекович Гасиев, д-р с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур, Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»; 363110, Российская Федерация, РСО-Алания, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1; e-mail: gasiev77@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-2728-626X

Information about the authors

Gerasim V. Lushchenko, CSc (Ag), Senior Research Associate at the Department of Breeding and Seed Production of Agricultural Crops, North Caucasian Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture – Branch of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences; 1 Williams St., Mikhaylovskoe Vlg., Prigorodny District, Republic North Ossetia–Alania, 363110, Russian Federation; e-mail: geri4@list.ru; https://orcid.org/0000-0002-3935-1962

Vadim I. Gasiev, DSc (Ag), Senior Research Associate at the Department of Breeding and Seed Production of Agricultural Crops, North Caucasian Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture – Branch of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences; 1 Williams St., Mikhaylovskoe Vlg., Prigorodny District, Republic North Ossetia–Alania, 363110, Russian Federation; e-mail: gasiev77@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-2728-626X

Научная статья
УДК 633.2.03:535.6
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-67-83

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

Нормализованные спектральные индексы эпидермиса семян как предиктор прорастания средозащитных культур в технологии адаптивного растениеводства

Артур Игоревич Новиков[1]✉, Александр Вячеславович Лебедев[2], Татьяна Петровна Новикова[3]

[1] Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
[2] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[3] Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** nvatdo@gmail.com

Аннотация

В условиях адаптивного растениеводства, ориентированного на устойчивость к стрессорам и ресурсоэффективность, предпосевная оценка качества семян средозащитных культур приобретает критическое значение. Исследования посвящены оценке предиктивного потенциала нормализованных спектральных индексов семенного покрова (эпидермиса) в RGB-пространстве для прогнозирования лабораторно-контейнерной всхожести на примере селекционной формы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), используемой в защитном лесоразведении. Проанализированы 7 нормализованных индексов, минимизирующих влияние общей яркости: $[(R-G-B)/(R+G)]^2$, $[(R-B)/(R+B)]^2$, $[(G-B)/(G+B)]^2$, $[(G-R)/(G+R)]^2$, $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$, $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$, $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$. Для более 1000 индивидуальных семян получены сканерные изображения и оценена контейнерная всхожесть на 50-й день. Установлены статистически значимые различия ($p < 0{,}0001–0{,}0165$) распределений всех индексов между группами с нулевой и ненулевой всхожестью. Выявлены устойчивые спектральные паттерны, ассоциированные с низким потенциалом прорастания: повышенное относительное отражение в красном и зеленом каналах по сравнению с синим, и пониженное – в синем канале относительно красного и зеленого. Результаты демонстрируют возможность интеграции простых, недорогих спектральных маркеров, основанных на RGB-сканировании, в технологические паспорта семян. Такой подход обеспечивает неразрушающий отбор жизнеспособного семенного материала с предсказуемыми свойствами, что является ключевым элементом концепции «целевого растения» для формирования адаптивных, стресс-толерантных полезащитных лесных полос.

Ключевые слова

адаптивное растениеводство, средозащитные лесные полосы, нормализованные спектральные индексы, RGB-сканирование, эпидермис семени, неразрушающий контроль семян, целевое растение, *Pinus sylvestris* L.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках гранта Санкт-Петербургского научного фонда, № 25-РБ-06–15.

Благодарности
Авторы выражают благодарность коллективу кафедры почвоведения и лесных культур БГТУ (Минск, Беларусь) и лично заведующему кафедрой Сергею Владимировичу Ребко за предоставление селекционного семенного материала и важные концептуальные рекомендации по методологическому обеспечению процедуры исследований.

Для цитирования
Новиков А.И., Лебедев А.В., Новикова Т.П. Нормализованные спектральные индексы эпидермиса семян как предиктор прорастания средозащитных культур в технологии адаптивного растениеводства // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 67–83.

GENETICS, BIOTECHNOLOGY, BREEDING AND SEED PRODUCTION

Normalized spectral indices of seed coat as a predictor of germination in shelterbelt crops for adaptive farming technology

Arthur I. Novikov[1]✉, Aleksandr V. Lebedev[2], Tatyana P. Novikova[3]

[1] Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia
[2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
[3] Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Russia

✉**Corresponding author:** nvatdo@gmail.com

Abstract
In adaptive farming, focused on stress tolerance and resource efficiency, pre-sowing seed quality assessment of shelterbelt crops is critical. The study evaluates the predictive potential of normalized spectral indices of the seed coat (epidermis) in the RGB space for forecasting laboratory-container germination. The research uses as an example a breeding form of Scots pine (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), which is used in protective afforestation. Seven normalized indices minimizing the influence of overall brightness were analyzed: $[(R-G-B)/(R+G)]^2$, $[(R-B)/(R+B)]^2$, $[(G-B)/(G+B)]^2$, $[(G-R)/(G+R)]^2$, $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$, $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$, $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$. Scanner images were obtained for more than 1 000 individual seeds, and container germination was assessed on the 50th day. Statistically significant differences ($p<0.0001–0.0165$) in the distributions of all indices were established between zero- and non-zero-germination groups. Stable spectral patterns associated with low germination potential were identified: increased relative reflectance in the red and green channels compared to the blue channel and decreased reflectance in the blue channel relative to the red and green ones. The findings demonstrate the possibility of integrating simple, low-cost spectral markers based on RGB scanning into seed technology passports. This approach enables non-destructive selection of viable seed material with predictable properties. It is a key element of the "Target Plant" concept for establishing adaptive, stress-tolerant forest shelterbelts.

Keywords
adaptive farming, forest shelterbelts, normalized spectral indices, RGB scanning, seed coat, non-destructive seed testing, target plant, *Pinus sylvestris* L.

Financing
The research was funded by the Saint Peterburg Science Foundation, grant No. 25-РБ-06–15.

Acknowledgments
The authors express their gratitude to the staff of the Department of Soil Science and Forest Crops of BSTU (Minsk, Belarus) and personally to the head of the department, Sergey U. Rabko, for providing breeding seed material and valuable conceptual recommendations on the methodological support of the research procedure.

For citation
Novikov A.I., Lebedev A.V., Novikova T.P. Normalized spectral indices of seed coat as a predictor of germination in shelterbelt crops for adaptive farming technology. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):68–83.

Введение
Introduction

Адаптивное растениеводство, нацеленное на минимизацию рисков в условиях изменения климата и деградации земель [1-3], требует использования высококачественного посевного материала с гарантированными свойствами. Это особенно актуально для создания полезащитных лесных полос и средозащитных насаждений – ключевого элемента агроландшафтов и урбанизированных территорий, обеспечивающего ветрозащитные, противодефляционные, мелиоративные, а также средозащитные, рекреационные и климаторегулирующие функции [4-6]. В условиях крупных городов – например, таких, как Санкт-Петербург, средозащитные полосы (вдоль автомагистралей, промышленных зон, жилых кварталов) играют критически важную роль в снижении уровня шума, фильтрации воздушных загрязнений, смягчении эффекта «теплового острова» и повышении экологического комфорта. Успех их создания во многом определяется жизнеспособностью и энергией прорастания семян древесных и кустарниковых культур, используемых для озеленения.

Существующие методы оценки всхожести (включая лабораторные) являются длительными и разрушающими, что ограничивает их применение для оперативного скрининга больших партий семян, необходимого при масштабных проектах реконструкции и создания «зеленого каркаса» Санкт-Петербурга. В этой связи разработка экспрессных, неразрушающих и объективных методов предикции посевных качеств на основе биофизических параметров семян становится важной научно-практической задачей, непосредственно влияющей на эффективность городского озеленения и устойчивость создаваемых средозащитных насаждений.

Спектральные характеристики семенного покрова в видимой области (RGB) несут информацию о его морфофизиологическом состоянии. В отличие от базовых значений яркости нормализованные спектральные индексы, вычисленные как отношения разностей и сумм цветовых каналов, позволяют нивелировать влияние внешних условий съемки и выявить устойчивые цветовые соотношения, потенциально связанные с жизнеспособностью зародыша. Это может способствовать быстрому отбору жизнеспособных семян местных адаптированных видов (например, липы мелколистной, клена остролистного, рябины обыкновенной), что является основой для создания устойчивых и эффективных средозащитных полос в специфических почвенно-климатических и техногенных условиях Санкт-Петербурга.

Данный инструментальный подход может быть успешно применен для оценки качества семян и выращивания перспективного посадочного материала сосны обыкновенной [7], в том числе декоративных форм – таких, как *Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya. Планируемая устойчивость к городским условиям, раннее плодоношение, компактная форма и высокие эстетические характеристики, возможно, сделают этот

сорт ценным ресурсом для ландшафтного дизайна и создания тематических рекреационных зон. Использование RGB-анализа для прогнозирования всхожести семян сосны Негорельской позволит не только повысить эффективность их использования в озеленении парков, скверов и прибрежных территорий Санкт-Петербурга, но и обеспечить создание визуально привлекательных, биологически устойчивых зеленых барьеров, сочетающих утилитарные средозащитные функции с декоративными. Таким образом, процедура RGB-скрининга семян как основы технологического паспорта «Семя – культура» [8] может стать инструментом комплексного подхода к формированию экологически устойчивой и эстетически полноценной городской среды.

Существующие методы оценки всхожести (включая лабораторные) являются длительными и разрушающими, что ограничивает их применение для оперативного скрининга больших партий семян. В этой связи разработка экспрессных, неразрушающих и объективных методов предикции посевных качеств на основе биофизических параметров семян становится важной научно-практической задачей. Спектральные характеристики семенного покрова в видимой области (RGB) несут информацию о его морфофизиологическом состоянии. В отличие от базовых значений яркости нормализованные спектральные индексы, вычисленные как отношения разностей и сумм цветовых каналов, позволяют нивелировать влияние внешних условий съемки и выявить устойчивые цветовые соотношения, потенциально связанные с жизнеспособностью зародыша.

В современных агрономических исследованиях, ориентированных на ресурсоэффективность и устойчивость, неразрушающие методы оценки качества семян выходят на первый план, заменяя трудоемкие и длительные традиционные тесты на всхожесть [9, 10]. Ведущие мировые исследования все чаще фокусируются на применении спектральных технологий – в частности, гиперспектральной визуализации (HSI) и анализа в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR), для получения глубокой информации о биохимическом и физиологическом состоянии семян [11, 12]. Эти технологии основаны на том, что все вещества уникально взаимодействуют со светом, и изменения в составе или целостности семени (содержание воды, липидов, белков, активность ферментов) приводят к изменению его спектральной сигнатуры. Анализ этих сигнатур позволяет неинвазивно оценить жизнеспособность и энергию прорастания задолго до появления видимых морфологических изменений. Интенсивное развитие этих методов тесно связано с прогрессом в области машинного обучения (ML) и хемометрики.

Исследования, опубликованные в авторитетных изданиях (таких, как *Sensors* и *Computers and Electronics in Agriculture*), демонстрируют, что модели на основе алгоритмов машинного обучения способны с высокой точностью классифицировать семена по сортам, предсказывать их всхожесть и даже определять зараженность патогенами [13, 14]. Например, работа R.K. Bernardes et al. [14] показывает, что алгоритмы глубокого обучения на основе RGB-изображений могут достигать точности в 99% при детекции фузариоза семян пшеницы.

В контексте предсказания успеха всхожести семян использование спектральных характеристик в RGB-диапазоне демонстрирует значительный потенциал. Например, Y. Nehoshtan et al. [15] разработали метод прогнозирования всхожести с использованием глубокого обучения и данных RGB-изображений, показав высокую точность и устойчивость подхода. Аналогично P. Reddy et al. [16] применили гиперспектральную визуализацию в ближнем инфракрасном диапазоне, которая включает в себя и RGB-компоненты, для неразрушающей классификации и оценки жизнеспособности семян многолетнего райграса.

Дальнейшие исследования подтверждают эффективность RGB-анализа для оценки качества и всхожести семян различных культур. C. Chen et al. [17] создали

и опубликовали обширный набор RGB-данных для предсказания прорастания и оценки жизнеспособности семян кукурузы. В свою очередь, J. Li et al. [18] успешно комбинировали гиперспектральные RGB-изображения с глубоким обучением для точной идентификации сортов семян кукурузы, что напрямую связано с прогнозированием их посевных качеств. Эти работы подчеркивают растущую роль доступных и информативных RGB-данных в современных агрономических исследованиях и точном земледелии.

В работах по оценке жизнеспособности лесных семян высших растений (таких, как сосна и ель) с использованием NIR-спектроскопии точность классификации часто превышает 90% [19, 20]. Такой подход позволяет перейти от субъективной визуальной оценки к объективному, быстрому и высокопроизводительному скринингу, что особенно актуально для селекционных программ и контроля качества семян для создания средозащитных (в урбосреде) или полезащитных насаждений.

Цель исследований: оценка диагностической ценности 7 нормализованных спектральных индексов эпидермиса семян сосны обыкновенной (как модели средозащитной культуры) для прогнозирования их контейнерной всхожести в контексте задач адаптивного растениеводства и концепции целевого растения.

Методика исследований

Research method

Объектом исследований являлись семена сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) селекционного сорта Negorelskaya, перспективного для защитного лесоразведения и декоративного озеленения благодаря интенсивному росту, раннему семеношению. Для каждого из 1200 семян получено изображение эпидермиса с помощью планшетного сканера (Brother DCP, 300 dpi, цветной режим) на белом фоне, что обеспечивало однозначную идентификацию (рис. 1).

Посев семян осуществлялся в индивидуальные ячейки контейнеров (120 см³) с торфяным субстратом. Успех всхожести семян в контейнерах оценивали на 50-й день по бинарному признаку: 1 – проросли, 0 – не проросли. Из сегментированных изображений семян в программе ImageJ извлекали средние значения яркости в каналах R, G, B. Далее рандомизировали выборку, отобрав в случайном порядке массив из 400 значений яркости, включающий в себя оптометрические параметры как проросших, так и непроросших семян.

Рис. 1. Фрагмент сканированного изображения группы из 10 семян (порядковый номер – от 137 до 146) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), иллюстрирующий исходные данные для анализа

Figure 1. A fragment of a scanned image of a group of 10 seeds (serial numbers 137 to 146) of Scots pine (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), illustrating the raw data for analysis

Дескриптивный анализ RGB-параметров эпидермиса семян выявил систематические различия между группами. Как показано в таблице 1, семена, не проросшие к 50-му дню (G = 0, n = 86) выращивания в контейнерном питомнике, характеризовались более высокими средними значениями во всех цветовых каналах: по красному компоненту – на 3,92 ед. (98,51 против 94,59), по зеленому – на 3,20 ед. (83,21 против 80,01), по синему – на 1,86 ед. (71,58 против 69,72). Одновременно наблюдалось увеличение коэффициента вариации в группе G = 0, достигающее 5,3% в красном канале (37,5 против 32,2%), что указывало на потенциально большую внутреннюю неоднородность этой группы в условиях реального питомника.

Наиболее существенное различие между группами наблюдалось по показателю межквартильного размаха (IQR) в красном канале, где у семян, не проросших к 50-му дню в условиях контейнера, значение составило 54,75 против 42,00 у проросших, что свидетельствует о 30%-ном большем разбросе центральных 50% значений в этой группе. Примечательно, что медианные значения красного канала в обеих группах были идентичными (88,00), в то время как различия в IQR достигали 12,75 ед. Данное наблюдение, полученное в условиях реального контейнерного питомника, послужило основанием для детального статистического сравнения межквартильного размаха (IQR).

Таблица 1

Дескриптивная статистика RGB-параметров семян по группам всхожести в контейнерах (G = 0 для семян, не проросших к 50-му дню; G = 1 для семян, проросших к 50-му дню)

Table 1

Descriptive statistics of RGB parameters of seeds by germination groups in containers (G = 0 for seeds not germinated by day 50 and G = 1 for seeds germinated by day 50)

Дескриптор	R (Красный) G = 0 / G = 1	G (Зеленый) G = 0 / G = 1	B (Синий) G = 0 / G = 1
Объем выборки	86 / 314	86 / 314	86 / 314
Среднее	98,51 / 94,59	83,21 / 80,01	71,58 / 69,72
Среднеквадратическое отклонение	36,92 / 30,42	28,79 / 25,35	24,75 / 21,95
Коэффициент вариации, %	37,5 / 32,2	34,6 / 31,7	34,6 / 31,5
Минимум	50 / 51	51 / 50	46 / 46
Медиана	88,00 / 88,00	77,00 / 74,50	69,00 / 66,00
Максимум	173 / 170	150 / 137	130 / 113
Межквартильный размах	54,75 / 42,00	32,25 / 29,00	20,00 / 20,00
Асимметрия	0,28 / 0,43	0,45 / 0,58	0,58 / 0,57
Эксцесс	–1,08 / –0,70	–0,77 / –0,45	–0,53 / –0,50

В контексте анализа качества семян IQR представляет особый интерес как робастная мера разброса, устойчивая к выбросам и экстремальным значениям. В отличие от стандартного отклонения IQR характеризует вариабельность центральных 50% распределения (табл. 2), что более релевантно для оценки однородности партии семян, поскольку исключает потенциальные артефакты измерения или редкие биологические аномалии. Сравнение IQR в группах различной всхожести позволяет оценить, насколько внутренняя однородность цветовых характеристик связана с физиологическим состоянием семян.

Результаты сравнения межквартильного размаха демонстрируют селективный характер различий в вариабельности цветовых параметров. Статистически значимое увеличение IQR в красном канале у невсхожих семян (+12,75 ед., $p < 0,05$ по всем четырем статистическим критериям) указывает на их повышенную внутреннюю неоднородность по этому параметру. Напротив, отсутствие значимых различий в зеленом и синем каналах свидетельствует о специфичности выявленного эффекта именно для красного компонента окраски. Полученные данные позволяют предположить, что повышенная вариабельность красного канала может служить индикатором неоднородности физиологического состояния семян в партии, потенциально связанной с различиями в степени зрелости, распределении пигментов или целостности семенной оболочки.

На основе яркости RGB-каналов, отраженных от эпидермиса семян, рассчитывались 7 нормализованных спектральных индексов отражения (табл. 3). Выбор индексов основывался на комплексном анализе современных подходов к неразрушающему контролю качества семян, адаптированных для работы в видимом диапазоне спектра. Каждый индекс был разработан для выявления специфических аспектов цветового профиля семян, связанных с их физиологическим состоянием и потенциалом всхожести. Математическая форма возведения в квадрат обеспечивает нормализацию по интенсивности отраженного света, что минимизирует влияние вариаций освещенности и делает индексы сравнимыми между различными образцами. Квадратичное преобразование усиливает слабые, но статистически значимые различия в спектральных соотношениях, которые могут быть неочевидными при анализе абсолютных значений RGB-каналов. В таблице 3 представлены обоснование выбора каждого индекса и его физиологическая интерпретация.

Таблица 2

Сравнение межквартильного размаха яркости RGB-каналов между группами проросших и непроросших семян

Table 2

Comparison of the interquartile range of RGB channel brightness between groups of germinated and non-germinated seeds

Канал	IQR G = 0 (невсхожие)	IQR G = 1 (всхожие)	Разница IQR	Тест Левена (p-value)	Тест Флигнера-Киллина (p-value)	Тест Ансари-Брэдли (p-value)	Bootstrap-тест (p-value)	95% ДИ- разницы IQR (Bootstrap)
R	54,75	42,00	+12,75	0,0487*	0,0485*	0,0452*	0,0438*	[0,36, 25,25]
G	32,25	29,00	+3,25	0,3271	0,3200	0,3145	0,3256	[–3,25, 9,50]
B	20,00	20,00	0,00	0,8914	0,8892	0,8870	0,8902	[–4,00, 4,00]

*Статистически значимые различия ($p < 0,05$).

Таблица 3

Система спектральных индексов для оценки цветовых характеристик семян

Table 3

Spectral index system for assessing seed color characteristics

Индекс	Научное обоснование
$[(R-G-B)/(R+G)]^2$	Чувствительность к балансу каналов • Отражает относительный вклад синего канала при заданном уровне красного и зеленого • Используется в исследованиях по окраске семян бобовых
$[(R-B)/(R+B)]^2$	Относительное преобладание красного над синим • Аналог NDVI для видимого диапазона • Применяется в оценке содержания антоцианов и каротиноидов
$[(G-B)/(G+B)]^2$	Относительное преобладание зеленого над синим • Индикатор «зелености» и содержания хлорофилла • Используется в оценке зрелости плодов и семян
$[(G-R)/(G+R)]^2$	Относительное преобладание зеленого над красным • Прямой аналог Green-Red Vegetation Index (GRVI) • Применяется для оценки стресса у растений
$[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$	Преобладание суммы красного и зеленого над синим • Комплексный показатель «теплых» тонов • Используется в оценке спелости зерновых культур
$[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$	Преобладание суммы красного и синего над зеленым • Индикатор «холодных» тонов с акцентом на красный • Применяется в диагностике грибных поражений
$[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$	Преобладание суммы зеленого и синего над красным • Индикатор «холодных» тонов с акцентом на зеленый/синий • Используется в оценке содержания влаги

Данная методика представляет собой адаптацию подходов дистанционного зондирования растительности к задаче неразрушающего контроля качества семян с использованием доступного RGB-оборудования.

Статистическую значимость различий между распределениями индексов в группах всхожести оценивали с помощью непараметрического двувыборочного критерия Колмогорова-Смирнова. Нулевая гипотеза (H_0) предполагала, что эмпирические функции распределения индексов в обеих группах являются выборками из одного и того же распределения. Альтернативная гипотеза (H_1) заключалась в том, что функции распределения различаются. Пороговое значение p-value для отклонения нулевой гипотезы было установлено на уровне $\alpha = 0,05$. Вывод о наличии статистически значимых различий между группами делался при $p < 0,05$. Для интерпретации силы эффекта применяли следующую классификацию: $p \geq 0,05$ – незначимо; $0,01 \leq p < 0,05$ – значимо*; $0,001 \leq p < 0,01$ – высокозначимо; $p < 0,001$ – чрезвычайно значимо*. Дополнительно различия в вариабельности (межквартильном размахе) оценивали с помощью критериев Левена, Флигнера-Киллина, Ансари-Брэдли и бутстрэп-анализа ($n = 10000$).

Для визуализации различий в распределении значений спектральных индексов между группами семян с различной всхожестью были построены диаграммы

размаха (бокс-плоты). На каждом графике ящик отображает межквартильный размах (IQR) между первым (Q1) и третьим (Q3) квартилями, горизонтальная линия внутри ящика указывает медианное значение (Q2), а «усы» показывают диапазон данных в пределах 1,5 × IQR. Точки за пределами «усов» рассматриваются как потенциальные выбросы. Для каждой группы дополнительно указаны числовые значения медианы и IQR.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Нормализованные индексы (рис. 2, табл. 4) позволяют количественно оценить относительные соотношения между цветовыми компонентами, что особенно важно для выявления тонких различий в окраске, которые могут быть неочевидными при анализе отдельных каналов.

Все спектральные индексы, за исключением $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$ ($p = 0,117$), показали статистически значимые различия между группами ($p<0,001$). Наибольшую разделяющую способность продемонстрировали индексы $[(R-G-B)/(R+G)]^2$ ($D = 0.2793$) и $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ ($D = 0.3200$). При этом последний показал наибольшее абсолютное различие между медианами (0,5718 у всхожих против 0,4277 у невсхожих). Индекс $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$ оказался наименее информативным. Это свидетельствует о том, что различия в окраске семян связаны преимущественно с относительным преобладанием красного компонента над зеленым и синим, а не с их балансом.

Таблица 4

Сравнительная характеристика нормализованных спектральных индексов семян сосны обыкновенной Negorelskaya в контексте предсказания всхожести

Table 4

Comparative analysis of normalized spectral indices of Negorelskaya Scots pine seeds in the context of germination prediction

Нормализованный спектральный индекс	Группа «1» (Всхожие) Me (IQR)	Группа «0» (Невсхожие) Me (IQR)	D-статистика Колмогорова-Смирнова	p-value
$[(R-G-B)/(R+G)]^2$	0,0887 (0,1271)	0,0583 (0,0860)	0,2793	**$2,15 \times 10^{-6}$**
$[(R-B)/(R+B)]^2$	0,0082 (0,0172)	0,0140 (0,0285)	0,2289	**$4,72 \times 10^{-7}$**
$[(G-B)/(G+B)]^2$	0,0010 (0,0037)	0,0025 (0,0066)	0,2614	**$2,34 \times 10^{-6}$**
$[(G-R)/(G+R)]^2$	0,0016 (0,0067)	0,0033 (0,0099)	0,2457	**$3,87 \times 10^{-6}$**
$[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$	1,4452 (0,3828)	1,5778 (0,4484)	0,2359	**$8,91 \times 10^{-7}$**
$[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$	1,0355 (0,0829)	1,0257 (0,0735)	0,1304	$1,17 \times 10^{-1}$
$[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$	0,5718 (0,3288)	0,4277 (0,2973)	0,3200	**$1,42 \times 10^{-8}$**

Примечание. Me – медиана; IQR – межквартильный размах.

Сравнение 7 нормализованных спектральных индексов выявило статистически значимые различия между группами всхожих и невсхожих семян. Наиболее информативным оказался индекс $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$, показавший максимальную статистическую значимость ($p = 1{,}42 \times 10^{-8}$) и наибольшее абсолютное различие между медианами групп – 0,1441 ед. (0,5718 у всхожих против 0,4277 у невсхожих семян). Индекс $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$ продемонстрировал аналогичную направленность изменений, но с меньшей величиной эффекта: разница медиан составила 0,1326 ед. ($p = 8{,}91 \times 10^{-7}$). Эти два индекса, основанные на полной сумме каналов в знаменателе, оказались наиболее устойчивыми к вариациям абсолютной яркости, что подтверждается их высокими значениями D-статистики Колмогорова-Смирнова (0,3200 и 0,2359 соответственно). Индексы, использующие попарные отношения каналов: $[(R-B)/(R+B)]^2$, $[(G-B)/(G+B)]^2$ и $[(G-R)/(G+R)]^2$, – показали меньшую, но статистически значимую разделяющую способность с p-значениями в диапазоне $2{,}34 \times 10^{-6} – 4{,}72 \times 10^{-7}$.

С физической точки зрения выявленный спектральный паттерн отражает различия в светорассеянии и поглощении различных длин волн семенной оболочкой. Относительное усиление красного компонента у невсхожих семян (индекс $[(R-B)/(R+B)]^2$ выше на 70,7%) может свидетельствовать о меньшем поглощении длинноволнового излучения (600-700 нм), характерного для более плотных или толстых покровных тканей. Одновременное снижение индекса $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ на 25,2% указывает на ослабленное рассеяние в сине-зеленой области спектра (450-550 нм), что может быть связано с изменениями микрорельефа поверхности семян или различиями в показателе преломления кутикулярного слоя. Индекс $[(R-G-B)/(R+G)]^2$, сниженный на 34,3% у невсхожих семян, математически соответствует условию $B \approx |R-G|$, что физически интерпретируется как более равномерное распределение энергии отраженного света по спектру, характерное для поверхностей с меньшей спектральной селективностью.

Различия могут быть обусловлены вариациями в толщине, плотности, влажности или биохимическом составе семенной кожуры (содержании лигнина, пигментов, восков), которые в свою очередь коррелируют со зрелостью, сохранностью зародыша и потенциалом прорастания.

Биологическая значимость выявленного спектрального паттерна может быть связана с несколькими физиологическими и биохимическими факторами. Повышенное отношение красного и зеленого к синему у невсхожих семян (индексы $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$ выше на 9,2%, $[(G-B)/(G+B)]^2$ – на 150%) коррелирует с потенциально большим содержанием каротиноидных пигментов, которые преимущественно поглощают в синей области спектра (400-500 нм) и отражают в желто-красной (550-650 нм). Одновременно более сбалансированное соотношение между каналами (низкие значения индексов $[(R-G-B)/(R+G)]^2$ и $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$) может отражать меньшую гидратацию тканей, поскольку вода преимущественно поглощает в ближней инфракрасной области, косвенно влияя на отражение в видимом диапазоне. На клеточном уровне различия в спектральных характеристиках могут быть обусловлены изменениями в упаковке хромопластов, толщине палисадного слоя эпидермиса или степени одревеснения семенной оболочки, которые в свою очередь связаны с процессами созревания и подготовки семян к прорастанию.

Использование прибора с зарядовой связью (ПЗС) для захвата изображений семенной оболочки обеспечило высокую линейность и точность измерений RGB-параметров, что является принципиально важным для достоверного расчета нормализованных спектральных индексов. ПЗС-матрица с типичной квантовой

эффективностью 45-65% в видимом диапазоне и с низким уровнем темнового тока (менее 0,1 электрона/пиксель/сек.) позволила достичь отношения сигнал/шум более 48 дБ при экспозиции 15-20 мс, что достаточно для детектирования различий в индексах на уровне 0,001 ед. Однако следует учитывать, что спектральная чувствительность стандартных ПЗС-сенсоров с фильтрами Байера имеет максимумы примерно при 450 нм (B), 550 нм (G) и 650 нм (R). Это обеспечивает перекрытие со спектрами поглощения ключевых пигментов семенной оболочки – хлорофилла (максимум поглощения при 430 и 660 нм) и каротиноидов (430-480 нм).

Точность измерения наиболее значимого индекса $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ ($p = 1{,}42 \times 10^{-8}$) ограничена не только шумами ПЗС-матрицы, но и нелинейностью аналого-цифрового преобразователя [21] (АЦП) при уровнях сигнала менее 10% от полной шкалы, что характерно для синего канала многих семян. Для B-каналов со значениями 46-50 ед. (минимальные в выборке) относительная погрешность АЦП может достигать 2-3%, что транслируется в погрешность индекса до 5-7%. Это техническое ограничение объясняет, почему индекс $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$ показал несколько меньшую статистическую значимость ($p = 8{,}91 \times 10^{-7}$): он в меньшей степени зависит от точности измерения слабых синих сигналов.

Для промышленного внедрения в системы сортировки семян рекомендуется использование специализированных ПЗС-камер с усиленным синим каналом – дополнительным коэффициентом усиления 1,5-2,0 для B-пикселей; линейным АЦП 12-бит вместо стандартного 8-битного для увеличения динамического диапазона; синхронизированной вспышкой со спектральным максимумом при 550 нм для минимизации эффектов мерцания

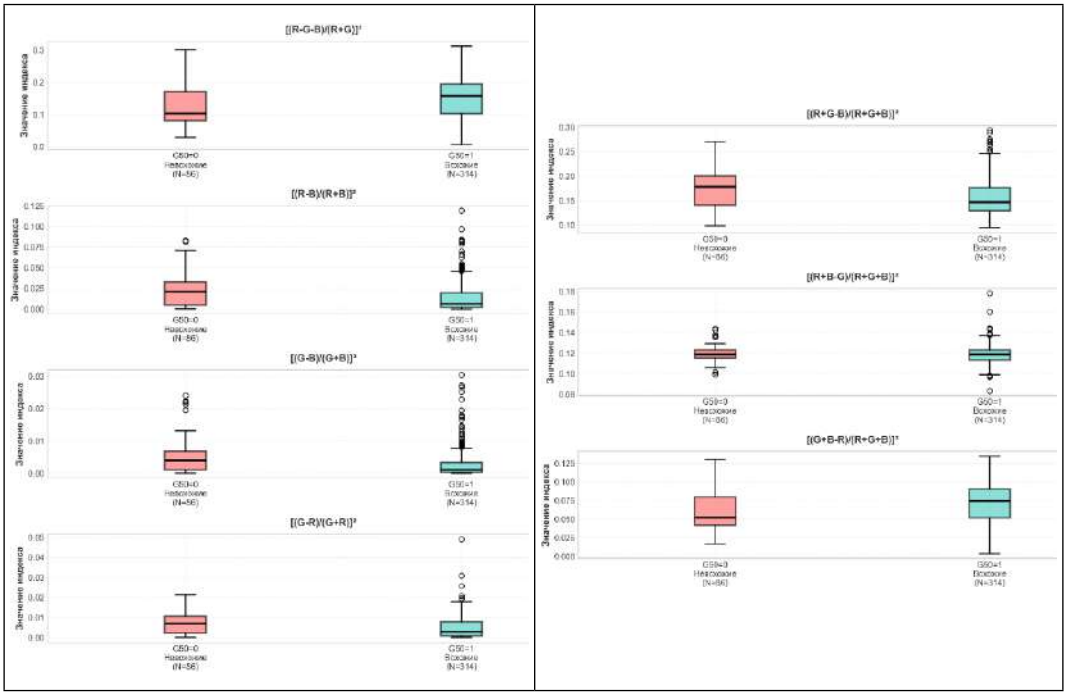

Рис. 2. Распределение значений нормализованных спектральных индексов в группах семян с различной полевой всхожестью

Figure 2. Distribution of normalized spectral index values in seed groups with different field germination rates

Вычислительная сложность наиболее информативных индексов составляет: $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$: 6 операций сложения/вычитания + 1 деление + 1 возведение в квадрат, что соответствует производительности около 1000 семян/сек. на процессоре с тактовой частотой 2,5 ГГц.

Для повышения точности прогнозирования в полевых условиях рекомендуется использовать комбинацию двух нормализованных индексов: $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ как основного предиктора и $[(R-B)/(R+B)]^2$ как верифицирующего.

Полученные результаты имеют прямое практическое значение для технологий адаптивного растениеводства и защитного лесоразведения. Концепция «целевого растения» (Target Plant Concept), как отмечают A.S. Davis и J.R. Pinto [22], акцентирует необходимость производства посадочного материала с заранее заданными, оптимальными для конкретных полевых условий свойствами.

Интеграция нормализованных спектральных индексов в систему предиктивного скрининга семян на раннем этапе позволит осуществлять неразрушающий отбор семян с высокой вероятностью всхожести для формирования элитных посевных партий, создавать цифровые технологические паспорта индивидуальных семян, дополняемые в дальнейшем данными о росте сеянцев, повышать предсказуемость и однородность выходных параметров посадочного материала для полезащитных полос, что является основой для точного прогнозирования их приживаемости и роста в условиях конкретного агроландшафта.

Выявленные спектральные паттерны и методология анализа, разработанные для полезащитных и средозащитных культур, обладают значительным потенциалом для адаптации к сельскохозяйственным культурам, однако требуют учета специфических особенностей. Для зерновых культур (пшеница, рис, кукуруза) ключевым отличием является более выраженная вариабельность окраски, связанная не только с всхожестью, но и с содержанием клейковины, стекловидностью и степенью зрелости. Например, у пшеницы индекс $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$, показавший максимальную дискриминационную способность для лесных семян ($p = 1{,}42 \times 10^{-8}$), может потребовать калибровки с учетом сортовых особенностей: у твердых сортов типичные значения R-канала на 15-20% выше, чем у мягких, что может смещать пороговые значения индекса.

Для овощных культур с мелкими семенами (томат, перец, капуста) основным технологическим вызовом становится разрешающая способность ПЗС-систем. При типичном размере семян 1-3 мм и необходимом разрешении 50-100 пикселей на семя требуется минимальное оптическое разрешение 20-40 линий/мм, что достижимо при использовании ПЗС-матриц с размером пикселя 2,4-4,8 мкм и макрообъективов с увеличением 2:1-5:1. При этом спектральные индексы, чувствительные к локальным неоднородностям (например, $[(R-G-B)/(R+G)]^2$), могут давать повышенную вариабельность измерений, требующую статистической обработки по нескольким зонам семени.

Особый интерес представляет применение подхода для бобовых культур (соя, горох, фасоль), где спектральные характеристики тесно связаны с содержанием белка и активностью уреазы. Предварительные исследования на сое показывают, что комбинация индекса $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$ с дополнительным индексом в ближнем инфракрасном диапазоне (850-950 нм) позволяет одновременно оценивать всхожесть и протеиновую ценность с точностью 85-92%. Однако это требует модификации ПЗС-системы мультиспектральными сенсорами или замены на КМОП-матрицы с расширенным спектральным диапазоном.

Предложенные спектральные индексы обладают потенциалом для применения к бобовым и другим сельхозкультурам, однако требуют экспериментальной валидации с определением культуроспецифических калибровочных коэффициентов.

Важным преимуществом методики является ее потенциальная интеграция с существующими системами сортировки семян на основе массы, размера и формы. Добавление спектрального модуля с расчетом 2-3 ключевых индексов увеличить стоимость оборудования на 15-25%, но может повысить общую эффективность отбраковки некондиционных семян на 30-40%, особенно для культур с высокой стоимостью семенного материала (гибридная кукуруза, сортовые овощи, сахарная свекла).

Основные направления адаптации методологии для агросемян включают в себя: 1) базовую калибровку пороговых значений индексов для 8-10 основных сельхозкультур; 2) разработку культуроспецифических комбинаций индексов (например, для масличных культур – акцент на каротиноидчувствительные индексы); 3) создание эталонных спектральных библиотек с привязкой к биохимическим параметрам; 4) оптимизацию алгоритмов для работы в условиях производственного конвейера (скорость – до 5000 семян/мин).

Экономическая целесообразность внедрения определяется соотношением стоимости семенного материала и прироста урожайности: для культур со стоимостью семян более 5000 руб/кг (томаты гибридные, цветочные культуры) окупаемость системы может составить 1-2 сезона; для массовых зерновых – 3-4 сезона. Ключевым фактором успеха станут разработка открытых баз данных спектральных характеристик и создание стандартизированных протоколов измерений, позволяющих сравнивать результаты между различными производителями оборудования и исследовательскими группами.

Таким образом, агрофизический подход на основе доступного RGB-сканирования и расчета нормализованных индексов может способствовать экономичному решению для интеграции в технологические цепочки адаптивного семеноводства не только средозащитных, но и сельскохозяйственных культур, работая на опережающее обеспечение качества на самом начальном этапе производственного цикла.

Выводы

Conclusions

1. Предлагаемая методика соответствует принципам адаптивного растениеводства и концепции целевого растения, обеспечивая возможность неразрушающего, экспрессного и экономичного скрининга семенного материала полезащитных культур на этапе, предшествующем посеву. Это позволяет формировать посевные партии с предсказуемо высоким потенциалом прорастания, что важно для успешного создания устойчивых средозащитных насаждений.

2. Нормализованные спектральные индексы, рассчитанные на основе RGB-сканирования эпидермиса семян сосны обыкновенной Negorelskaya, демонстрируют высокую статистическую значимость ($p < 10^{-6}$ для 6 из 7 индексов) в прогнозировании их контейнерной всхожести на 50-й день. Индекс $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ показал максимальную дискриминационную способность ($p = 1.42 \times 10^{-8}$), что подтверждает возможность объективной оценки потенциала прорастания до посева.

3. Установлен устойчивый спектральный паттерн, характеризующий семена с низкой всхожестью: относительное усиление красного и зеленого компонентов при одновременном ослаблении синего. Это выражается в повышении значений индексов $[(R-B)/(R+B)]^2$ (+70,7%), $[(G-B)/(G+B)]^2$ (+150%) и $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$ (+9,2%) и снижении индексов $[(R-G-B)/(R+G)]^2$ (–34,3%) и $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ (–25,2%) по сравнению с проросшими семенами.

4. Методика совместима со стандартными ПЗС-системами визуализации и требует минимальной модификации оборудования (рекомендуются 12-битный АЦП

и усиление синего канала). Ее внедрение в системы предпосевной сортировки позволит обрабатывать до 1000 семян/сек., формируя посевные партии с предсказуемо высокой всхожестью, что соответствует принципам адаптивного растениеводства и концепции целевого растения.

5. Выявленные закономерности и методологический подход обладают значительным потенциалом для адаптации к сельскохозяйственным культурам (зерновым, овощным, бобовым) после калибровки пороговых значений индексов и учета сортовой специфики. Интеграция спектрального модуля в существующие линии сортировки семян может повысить эффективность отбраковки некондиционного материала на 30-40%, особенно для культур с высокой стоимостью семян, обеспечивая экономическую целесообразность внедрения в течение 1-4 сезонов в зависимости от культуры.

Список источников

1. Жученко А.А. *Адаптивное растениеводство*. М.: Колос, 2009. 520 с.

2. Николаев М.В. Климатические изменения и ведение полеводства в зоне осушаемых земель Европейского Нечерноземья России: уязвимость и адаптация // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58, № 1. С. 60–74. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.60rus

3. Нейфельд В.В., Кадомцева М.Н. Механизмы адаптации растениеводства регионов ПФО к последствиям глобальных климатических изменений // *Аграрный научный журнал*. 2022. № 4. С. 37–43. https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp37-43

4. Ивонин В.М., Воскобойникова И.В. Ландшафтная агролесомелиорация // *Мелиорация и гидротехника*. 2021. Т. 11, № 3. С. 54–77. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-54-77

5. Примаков Н.В., Танюкевич В.В. Лесохозяйственные мероприятия в полезащитных лесных полосах Краснодарского края // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2024. № 4 (400). С. 185–192. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-185-192

6. Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Анализ экологических функций древостоев березы и дуба в условиях урбанизированной среды по материалам долгосрочных наблюдений // *Российская сельскохозяйственная наука.* 2018. № 5. С. 29–31. https://doi.org/10.31857/S250026270000632-0

7. Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V. et al. The root collar diameter growth reveals a strong relationship with the height growth of juvenile Scots pine trees from seeds differentiated by spectrometric feature. *Forests*. 2023;14(6):1164. https://doi.org/10.3390/f14061164

8. Новикова Т.П., Новиков А.И., Петрищев Е.П. Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т. 13, № 3 (51). С. 164–179. https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12

9. ElMasry G., ElGamal R., Mandour N., Gou P. et al. Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications. *Food Research International*. 2020;131:109025. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109025

10. Xia Y., Xu Y., Li J., Zhang C. et al. Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019;1: 35-47. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.001

11. ElMasry G., Mandour N., Al-Rejaie S., Belin E. et al. Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring – An Overview. *Sensors*. 2019;19:1090. https://doi.org/10.3390/s19051090

12. ElMasry G., Mandour N., Wagner M.-H., Demilly D. et al. Utilization of computer vision and multispectral imaging techniques for classification of cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds. *Plant Methods*. 2019;15:24. https://doi.org/10.1186/s13007-019-0411-2

13. Loddo A., Di Ruberto C. On the efficacy of handcrafted and deep features for seed image classification. *Journal of Imaging*. 2021;7:171. https://doi.org/10.3390/jimaging7090171

14. Bernardes R.K., De Medeiros A., da Silva L., Cantoni L. et al. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology. *Agriculture*. 2022;12:1801. https://doi.org/10.3390/agriculture12111801

15. Nehoshtan Y., Carmon E., Yaniv O. Robust seed germination prediction using deep learning and RGB image data. *Scientific Reports*. 2021;11:17126. https://doi.org/10.1038/s41598-021-01712-6

16. Reddy P., Panozzo J., Guthridge K.M. Single Seed Near-Infrared Hyperspectral Imaging for Classification of Perennial Ryegrass Seed. *Sensors*. 2023;23:1820. https://doi.org/10.3390/s23041820

17. Chen C., Bai M., Wang T. An RGB image dataset for seed germination prediction and vigor detection – maize. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1341335. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1341335

18. Li J., Xu F., Song S. Hyperspectral RGB Imaging Combined with Deep Learning for Maize Seed Variety Identification. *IEEE Access*. 2024;12:83788-83800. https://doi.org/10.1109/access.2024.3419006

19. Tigabu M., Daneshvar A., Jingjing R., Wu P. et al. Multivariate discriminant analysis of single seed near infrared spectra for sorting dead-filled and viable seeds of three pine species: does one model fit all species? *Forests*. 2019;10:469. https://doi.org/10.3390/f10060469

20. Tigabu M., Daneshvar A., Wu P., Ma X. et al. Rapid and non-destructive evaluation of seed quality of Chinese fir by near infrared spectroscopy and multivariate discriminant analysis. *New Forests*. 2020;51:395-408. https://doi.org/10.1007/s11056-019-09735-8

21. Sokolov S.V., Kamensky V.V., Novikov A.I., Ivetić V. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer. *Inventions*. 2019;4(4):61. https://doi.org/10.3390/inventions4040061

22. Davis A.S., Pinto J.R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. Forests. 2021;12:1293. https://doi.org/10.3390/f12091293

References

1. Zhuchenko A.A. *Adaptive plant growing*. Moscow, Russia: Kolos, 2009:520. (In Russ.)

2. Nikolaev M.V. The impact of climate change on crop farming in the drained lands of the European Nonchernozem region of Russia: vulnerability and adaptation assessment. *Agricultural Biology*. 2023;58(1):60-74. (In Russ.) https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.60rus

3. Neufeld V.V., Kadomtseva M.E. Mechanisms of adaptation of crop production in the regions of the Volga Federal District to the consequences of global climate change. *The Agrarian Science Journal*. 2022;(4):37-43. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp37-43

4. Ivonin M.V., Voskoboynikova I.V. Landscape agroforestry reclamation. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2021;11(3):54-77. (In Russ.) https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-54-77

5. Primakov N.V., Tanyukevich V.V. Forestry measures in shelterbelts of the Krasnodar Territory. *Russian Forestry Journal*. 2024;(4(400)):185-192. (In Russ.) https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-185-192

6. Dubenok N.N., Kuzmichev V.V., Lebedev A.V. Analysis of ecological functions of birch and oak stands in conditions of an urbanized environment based on the materials of long-term observations. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2018;(5):29-31. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S250026270000632-0

7. Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V. et al. The root collar diameter growth reveals a strong relationship with the height growth of juvenile Scots pine trees from seeds differentiated by spectrometric feature. *Forests*. 2023;14(6):1164. https://doi.org/10.3390/f14061164

8. Novikova T.P., Novikov A.I., Petrishchev E.P. FLR-library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Forestry Engineering Journal.* 2023;(3(51)):164-179. (In Russ.) https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12

9. ElMasry G., ElGamal R., Mandour N., Gou P. et al. Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications. *Food Research International*. 2020;131:109025. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109025

10. Xia Y., Xu Y., Li J., Zhang C. et al. Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019;1: 35-47. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.001

11. ElMasry G., Mandour N., Al-Rejaie S., Belin E. et al. Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring – An Overview. *Sensors*. 2019;19:1090. https://doi.org/10.3390/s19051090

12. ElMasry G., Mandour N., Wagner M.-H., Demilly D. et al. Utilization of computer vision and multispectral imaging techniques for classification of cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds. *Plant Methods*. 2019;15:24. https://doi.org/10.1186/s13007-019-0411-2

13. Loddo A., Di Ruberto C. On the efficacy of handcrafted and deep features for seed image classification. *Journal of Imaging*. 2021;7:171. https://doi.org/10.3390/jimaging7090171

14. Bernardes R.K., De Medeiros A., da Silva L., Cantoni L. et al. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology. *Agriculture*. 2022;12:1801. https://doi.org/10.3390/agriculture12111801

15. Nehoshtan Y., Carmon E., Yaniv O. Robust seed germination prediction using deep learning and RGB image data. *Scientific Reports*. 2021;11:17126. https://doi.org/10.1038/s41598-021-01712-6

16. Reddy P., Panozzo J., Guthridge K.M. Single Seed Near-Infrared Hyperspectral Imaging for Classification of Perennial Ryegrass Seed. *Sensors*. 2023;23:1820. https://doi.org/10.3390/s23041820

17. Chen C., Bai M., Wang T. An RGB image dataset for seed germination prediction and vigor detection – maize. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1341335. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1341335

18. Li J., Xu F., Song S. Hyperspectral RGB Imaging Combined with Deep Learning for Maize Seed Variety Identification. *IEEE Access*. 2024;12:83788-83800. https://doi.org/10.1109/access.2024.3419006

19. Tigabu M., Daneshvar A., Jingjing R., Wu P. et al. Multivariate discriminant analysis of single seed near infrared spectra for sorting dead-filled and viable seeds of three pine species: does one model fit all species? *Forests*. 2019;10:469. https://doi.org/10.3390/f10060469

20. Tigabu M., Daneshvar A., Wu P., Ma X. et al. Rapid and non-destructive evaluation of seed quality of Chinese fir by near infrared spectroscopy and multivariate discriminant analysis. *New Forests*. 2020;51:395-408. https://doi.org/10.1007/s11056-019-09735-8

21. Sokolov S.V., Kamensky V.V., Novikov A.I., Ivetić V. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer. *Inventions*. 2019;4(4):61. https://doi.org/10.3390/inventions4040061

22. Davis A.S., Pinto J.R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. Forests. 2021;12:1293. https://doi.org/10.3390/f12091293

Сведения об авторах

Новиков Артур Игоревич, д-р техн. наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отдела 140 – управления агротехнологиями и агромониторинга, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ); 195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: nvatdo@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1230-0433

Лебедев Александр Вячеславович, д-р с.-х. наук, доцент, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, 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: alebedev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8939-942X

Новикова Татьяна Петровна, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»; 194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Институтский переулок, 5, корп. 1; e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1279-3960

Information about the authors

Arthur I. Novikov, DSc (Eng), Professor of the Russian Academy of Sciences, Leading Research Associate at the Department of Agricultural Technologies and Agromonitoring Management, Agrophysical Research Institute; 14 Grazhdanskiy Ave., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; e-mail: nvatdo@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1230-0433

Aleksandr V. Lebedev, DSc (Ag), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: alebedev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8939-942X

Tatyana P. Novikova, CSc (Eng), Associate Professor, Senior Research Associate, Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Bldg. 1, Institutskiy Ln., Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1279-3960

Научная статья
УДК 579.64:632.3
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-84-104

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Оценка применимости методов ПЦР для диагностики бактериального рака томата

Ирина Николаевна Писарева[1]✉, Ольга Олеговна Белошапкина[2]

[1]ФГБУ «Всероссийский центр карантина растений» (ФГБУ «ВНИИКР»), Быково, Московская область, Россия
[2]Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

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

Аннотация
Бактериальный рак томата – вредоносное заболевание, распространенное на культуре томата. Особую вредоносность возбудитель болезни *Clavibacter michiganensis* (Smith; Davis et al.) Li et al. проявляет в защищенном грунте. Быстрое и точное выявление *C. michiganensis* в семенах томата при помощи современных методов диагностики позволит снизить риск распространения заболевания, повысить урожайность и качество продукции. Исследования выполнены в лаборатории научно-методического отдела бактериологии ФГБУ «ВНИИКР» в 2022–2023 гг. Цель исследований – оценка применимости трех ПЦР-тестов, предложенных в международных протоколах для диагностики возбудителя бактериального рака томата. В задачи работы входило определение основных критериев эффективности (аналитическая чувствительность и специфичность, селективность, воспроизводимость, повторяемость) праймерных систем. В работе использовались отечественные реактивы, что позволило снизить затраты и повысить доступность диагностики. ПЦР в соответствии с рекомендациями Sudarshana et al. и Bach et al. обладали высокой аналитической чувствительностью – 10^3 КОЕ/мл, а в соответствии с рекомендациями Oosterhof и Berendsen она составила 10^4 КОЕ/мл. Все праймерные системы показали 100%-ную специфичность без перекрестных реакций с другими штаммами. Селективность не выявлена. Повторяемость и воспроизводимость всех тестов составили 100% на уровне порога чувствительности. В результате оценки применимости трех праймерных систем метод ПЦР по Sudarshana et al. выбран как скрининговый для выявления бактериального рака томата в аналитических пробах из семян и вегетативных частей томата. Остальные ПЦР-тесты рекомендованы как подтверждающие тесты.

Ключевые слова
бактериоз томата, *Clavibacter michiganensis*, семенная инфекция, аналитическая чувствительность, специфичность, селективность, эффективность ПЦР

Благодарности
Исследования выполнены в рамках госзадания (рег. № 122041300071–9).

Для цитирования
Писарева И.Н., Белошапкина О.О. Оценка применимости методов ПЦР-РВ для диагностики бактериального рака томата // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 84–104.

Applicability assessment of PCR methods for the diagnosis of bacterial canker in tomato

Irina N. Pisareva[1]✉, Olga O. Beloshapkina[2]

[1]All-Russian Plant Quarantine Center, Bykovo, Moscow Region, Russia
[2]Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉**Corresponding author:** iruru@yandex.ru

Abstract
Bacterial canker of tomato is a harmful disease widespread in tomato crops. The pathogen *Clavibacter michiganensis* (Smith; Davis et al.) Li et al. exhibits particular virulence in protected ground conditions. Rapid and accurate detection of C. *michiganensis* in tomato seeds using modern diagnostic methods can help reduce the risk of disease spread and improve crop yield and product quality. The study was conducted at the Laboratory of the Research and Methodology Department of Bacteriology, All-Russian Plant Quarantine Center, in 2022–2023. The study aimed to assess the applicability of three PCR tests proposed in international protocols for diagnosing the bacterial canker in tomato. The objectives included determining the key performance criteria of primer systems: analytical sensitivity and specificity, selectivity, reproducibility, and repeatability. Domestic reagents were used in the study, which helped reduce costs and increase the accessibility of diagnostics. According to the protocols by Sudarshana et al. and Bach et al. the PCR tests demonstrated high analytical sensitivity of of 10^3 CFU/mL, while according to the protocol by Oosterhof and Berendsen sensitivity was 10^4 CFU/mL. All primer systems demonstrated 100% specificity, with no cross-reactions observed with other strains. No selectivity was detected. The repeatability and reproducibility of all tests reached 100% at the sensitivity threshold level. Based on the assessment of the three primer systems, the PCR method described by Sudarshana et al. was selected as a screening tool for detecting bacterial tomato canker in analytical samples from seeds and vegetative parts of the plant. The remaining PCR tests are recommended as confirmatory assays.

Keywords
tomato bacteriosis, *Clavibacter michiganensis*, seed infection, analytical sensitivity, specificity, selectivity, PCR efficiency

Acknowledgments
The research was carried out within the framework of the state assignment (Reg. No. 122041300071–9).

For citation
Pisareva I.N., Beloshapkina O.O. Applicability assessment of PCR methods for the diagnosis of bacterial canker in tomato. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):84–104.

Введение
Introduction

Томат – одна из наиболее важных овощных культур в мире благодаря своим питательным свойствам, универсальности и экономической значимости. Плоды томата богаты такими минералами, как калий и магний, витаминами, особенно С и А, а также фитохимическими соединениями включая ликопин – мощный антиоксидант,

связанный со снижением риска развития некоторых видов рака и сердечно-сосудистых заболеваний у людей [1, 2].

Томат является объектом селекционных программ, посвященных устойчивости к болезням, повышению урожайности и улучшению качества плодов. Благодаря своей адаптивности к различным климатическим условиям эта культура занимает важное место в аграрном секторе многих стран, обеспечивая продовольственную безопасность и доходы фермеров [3, 4].

Clavibacter michiganensis (Smith; Davis et al.) Li et al. – возбудитель бактериального рака томата. Эта болезнь бактериальной этиологии, которая особую вредоносность проявляет в защищенном грунте [5]. В Российской Федерации *C. michiganensis* встречается во всех регионах выращивания томата. Бактериальный рак томата широко распространен по всему миру и наносит значительный ущерб сельскому хозяйству: потери урожая могут достигать до 93% за счет гибели растений, а средний вес плодов снижается до 50% [6, 7].

История открытия и таксономических изменений возбудителя бактериального рака томата началась с 1910 г. Впервые эта бактерия была обнаружена в США, в штате Мичиган, получив название *Bacterium michiganense* Smith. В 1934 г. было отмечено сходство возбудителя бактериального рака томата с коринебактериями, в связи с чем его переименовали в *Corynebacterium michiganense* (Smith) Jensen. В последующие десятилетия, в 1977 г., в классификацию коринебактерий-фитопатогенов были введены патологические типы – патовары, и бактерия получила название *Corynebacterium michiganense* pv. *michiganense* (Smith) Dye & Kemp. По прошествии нескольких лет таксономический статус возбудителя бактериального рака вновь был пересмотрен: его классификация была изменена с уровня патовар на уровень подвид, и он получил название *Corynebacterium michiganense* subsp. *michiganense* Carlson и Vidaver. Основываясь на фенотипических признаках, в 1984 г. ученые предложили перевести подвиды *C. michiganense* в род *Clavibacter.* Ввиду этого возбудитель бактериального рака томата получил наименование *Clavibacter michiganense* subsp. *michiganense* Davis et al. В 1996 г., в соответствии с правилами номенклатуры бактериальной таксономии, название было скорректировано на *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* Young et al. На основании молекулярно-генетических исследований в 2018 г. была проведена реклассификация, и подвид *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* был повышен до уровня вида *C. michiganensis* (Smith; Davis et al.) Li et al. [8, 9].

C. michiganensis – это грамположительная бактерия, способная через естественные отверстия, раны или через зараженные семена проникать и колонизировать растения томата. Попав внутрь растения, фитопатоген размножается в сосудах ксилемы, образует биопленкоподобные структуры [10].

Особенностью, которая более века способствует широкому распространению *Clavibacter michiganensis* во всем мире, является его способность передаваться с семенами и долгое время находиться в латентном состоянии в рассаде томата [11, 12]. При этом *C. michiganensis* не только колонизирует поверхность семян, но и проникает под семенную оболочку, приводя впоследствии к системному заражению растений [13].

С середины XX в. интенсификация международной торговли семенами томата привела к распространению *C. michiganensis* как внутри континентов, так и между ними [14].

Основным растением-хозяином является томат (*Solanum lycopersicum*). Реже поражаются другие растения семейства Solanaceae: картофель (*Solanum tuberosum*), болгарский перец (*Capsicum annuum*), баклажан (*Solanum dulcamara*), а также некоторые сорные растения рода *Solanum*: паслен черный (*Solanum nigrum*), паслен Дугласа (*Solanum douglasii*) и паслен трехцветковый (*Solanum trifolium*). Было обнаружено, что резерваторами могут быть дурман обыкновенный (*Datura stramonium*), марь белая (*Chenopodium album*) и амарант запрокинутый (*Amaranthus retroflexus*) [14].

В результате обследования посадок томата открытого и защищенного грунта, проведенного в 2024 г., возбудитель бактериального рака томата *C. michiganensis* был выявлен в Астраханской, Волгоградской и Ростовской областях – в 29, 63 и 33% отобранных образцов соответственно [15].

Симптомы заболевания достаточно разнообразны. Они включают в себя хлоротичность, некроз краев и скручивание листовых пластинок (рис. 1а), замедление роста, продольные некрозы и язвы на стеблях, растрескивание стебля (рис. 1б), изменение окраски сосудов, увядание и появление пятен на созревающих плодах, что снижает качество плодов и урожайность растений, а при сильном заражении приводит к их гибели [12, 16-18].

Коммерческих сортов и гибридов томата, абсолютно устойчивых к *C. michiganensis,* не существует, но они отличаются по восприимчивости. Борьба с бактериальным раком томата заключается в основном в соблюдении рекомендуемой агротехники с обязательным уничтожением растительных остатков и других профилактических мероприятий, а также в обработке семян и зараженных растений различными препаратами, разрешенными в стране-производителе данной овощной продукции [18, 19]. Но самым главным условием предупреждения болезни является своевременное обнаружение фитопатогенных бактерий в семенах и выбраковка их, то есть устранение основного источника первичной инфекции, и использование здоровых семян и рассады [16, 20]. Согласно данным [21] при уровне зараженности 10^3 КОЕ на 1 г семян происходит поражение около 4% растений. Таким образом, необходимо использование методов выявления *C. michiganensis* с высокой аналитической чувствительностью (АЧ). Как правило, АЧ ПЦР-методов диагностики бактериальных фитопатогенов находится на уровне 10^2-10^3 КОЕ/мл.

Рис. 1. Симптомы бактериального рака томата:
а – хлороз, некроз и скручивание краев листовых пластинок (Астраханская область);
б – некроз и растрескивание стебля (Волгоградская область)

Figure 1. Symptoms of bacterial canker in tomato:
a – chlorosis, necrosis, and curling of leaf blade edges (Astrakhan Region),
b – necrosis and cracking of the stem (Volgograd Region)

В международной практике золотым стандартом обнаружения в семенном материале *C. michiganensis* является сочетание ПЦР-анализа и изоляция чистой культуры на питательные среды [14, 22]. Однако изоляция в последнее десятилетие признана малоэффективной ввиду способности *C. michiganensis* находиться в жизнеспособном, но не культивируемом состоянии. Таким образом, для диагностики *C. michiganensis* предпочтительны быстрые методы (такие, как ПЦР-тесты), поскольку их можно применять без предварительного культивирования штаммов [16].

Для проведения эффективной диагностики *C. michiganensis* необходима гармонизация методов с международными и региональными диагностическими протоколами. Поэтому в исследованиях мы выполнили оценку применимости трех ПЦР-РВ (ПЦР в реальном времени), рекомендованных международными организациями.

Международной федерацией по семеноводству (ISF) разработан протокол испытаний, включающий в себя процедуры выявления и идентификации возбудителя бактериального рака томата в семенном материале. В данном протоколе рекомендуются ПЦР-РВ в соответствии с разработками Oosterhof и Berendsen (2011) и ПЦР-РВ по Sudarshana et al. (2012) [22].

ПЦР-РВ по Oosterhof и Berendsen (2011) разработана на основе последовательности участка гена, кодирующего двухкомпонентную системную сенсорную киназу (PTSSK). Авторы отмечают высокую аналитическую чувствительность данного метода – 2×10^3 КОЕ/мл. При этой методике отмечено отсутствие как ложноотрицательных, так и ложноположительных результатов. Данную ПЦР-РВ также рекомендует использовать Европейская и Средиземноморская организации по карантину и защите растений (ЕОКЗР) [14].

Sudarshana et al. разработали ПЦР-РВ с праймерами MVS21F_R, подобранными для амплификации фрагмента recA – гена, кодирующего фермент, участвующий в процессах рекомбинации и репарации ДНК. Этот ген выбран в связи с более высокой вариабельностью по сравнению с 16S рРНК, что позволяет отличать *C. michiganensis* от других близкородственных бактерий, таким образом повышая специфичность теста [22].

В лабораторном руководстве по идентификации фитопатогенных бактерий для идентификации *C. michiganensis* предложена ПЦР-РВ в соответствии с Bach et al. Авторы разработали тест-системы для количественной оценки и дифференциации фитопатогенных видов рода *Clavibacter.* Праймеры FP_Cm/RP_Cm подобраны для участка межгенной последовательности оперона рРНК (ITS), общего для всех видов, перечисленных ниже: *C. sepedonicus*, *C. michiganensis*, *C. tessellarius*, *C. nebraskensis*, *C. insidiosus.* Специфичность метода достигается за счет зондов, разработанных для каждого патогенного вида рода *Clavibacter.* Авторами отмечена высокая специфичность тест-систем, однако информация об аналитической чувствительности отсутствует [23].

Цель исследований: оценка применимости трех ПЦР-РВ, предложенных в международных протоколах для диагностики возбудителя бактериального рака томата.

Методика исследований
Research method

Объектом исследований являлся возбудитель бактериального рака томата *C. michiganensis*.

Бактериальные штаммы. В работе использовали 4 штамма *C. michiganensis*: 0239 ВНИИКР (CFBP 2492), 0496 ВНИИКР, 0497 ВНИИКР, 0498 ВНИИКР)

и 41 штамм других видов бактерий из зарубежных коллекций: *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* DSM30168, *Pectobacterium atrosepticum* DSM18077, *Xanthomonas campestris* pv. *raphanin* NCPPB1946, *Erwinia amylovora* CFBP1430, *Xanthomonas oryzae* NCPPB3002, *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* NCPPB2137, *Xanthomonas translucens* DSM 18974, *Xanthomonas euvesicatoria* pv. *euvesicatoria* DSM 19128, *Xanthomonas vesicatoria* DSM 22252, *Xanthomonas euvesicatoria* pv. *perforans* DSM 18975, *Xanthomonas hortorum* pv. *gardneri* DSM 19127, *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzicola* CFBP 2286, *Xanthomonas axonopodis* pv. *allii* CFBP 6107, *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *flaccumfaciens* CFBP 3418, *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *oortii* CFBP 1384, *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *poinsettiae* CFBP 2403, *Pseudomonas savastanoi* pv. *phaseolicola* CFBP 1390, *Pseudomonas savastanoi* pv. *glycinea* CFBP 2214, *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* CFBP 2534, *Clavibacter michiganensis* subsp. *nebraskensis* CFBP 2405, *Xanthomonas axonopodis* pv. *allii* CFBP 6369, *Xanthomonas axonopodis* pv. *axonopodis* CFBP 5141, *Ralstonia syzigii* CFBP 7288, *Ralstonia pseudosolanacearum* CFBP 6442, *Pseudomonas syringae* pv. *coronafaciens* CFBP 2216, *Pseudomonas syringae* pv. *maculicola* CFBP 1657, *Acidovorax avenae* CFBP 2425, *Pantoea stewartii* subsp. *indologenes* CFBP 3614, *Pantoea ananatis* pv. *ananatis* CFBP 3612, *Xanthomonas hyacinthi* CFBP 1156, *Paraburkholderia caryophylli* CFBP 1370, *Paraburkholderia andropogonis* CFBP 2421, *Pantoea agglomerans* DSM 8570, *Pantoea vagans* DSM 23078, *Paraburkholderia glumae* DSM 9512, *Pantoea ananatis* DSM 30080, *Rathayibacter tritici* DSM 7486, *Agrobacterium rubi* DSM 6772, *Xanthomonas citri* pv. *glycines* CFBP 2526, *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* CFBP 2212, *Pseudomonas corrugate* CFBP 2431.

Определение аналитических чувствительности и специфичности ПЦР и выделение ДНК проводили по методике, описанной в статье «Определение аналитической чувствительности и специфичности методов ПЦР для диагностики черной бактериальной пятнистости томата» [5].

Определение эффективности ПЦР-РВ тестов. Эффективность ПЦР-РВ рассчитывали по формуле:

$$E = 10^{1/a},$$

где a – угловой коэффициент (slope).

Эффективность реакции выражали в процентах и считали приемлемой в диапазоне от 90 до 110% [24].

Определение селективности. Для оценки селективности ПЦР-тестов подготовили образцы экстрактов из вегетативных частей и семян томата. Затем экстракты искусственно заражали *C. michiganensis* (концентрация в данных образцах составляла от 10^5 до 10^3 КОЕ/мл). Каждый вариант готовили в трех повторностях. Также была приготовлена серия субстратов без содержания возбудителей болезней (отрицательный контроль).

Определение повторяемости. Для оценки повторяемости готовили образцы с концентрацией фитопатогенов на уровне аналитической чувствительности в 6 повторностях. Образцы исследовал один специалист, на одном оборудовании в течение одного рабочего дня.

Определение воспроизводимости. Для определения воспроизводимости готовили экстракты семян томата с низким и средним уровнем зараженности в шестикратной повторности. Исследование образцов проводили 3 специалиста на различном оборудовании в разное время.

Для удобства интерпретации результатов и контроля эффективности амплификации использовали следующий контроль ПЦР: К+ – положительный контрольный образец – ДНК целевого объекта; К-в (отрицательный контроль выделения) – стерильный

фосфатно-солевой раствор (PBS), используемый для подготовки аналитической пробы; К-ч (отрицательный контроль амплификации, или контроль чистой зоны) – ультрачистая вода.

ПЦР-РВ, использованные в работе:

1) по Oosterhof & Berendsen (2011);

2) по Sudarshana et al. (2012);

3) по Bach et al. (2003).

Последовательности олигонуклеотидов, использованные в работе, указаны в таблице 1.

В таблице 2 приводятся составы используемых реакционных смесей и условия амплификации.

Тестирование ПЦР-РВ проводили с использованием двух готовых смесей для ПЦР: 5x qPCRmix-HS (ООО «Евроген») и 5x Mas^{CFE} TaqMix-2025 (ЗАО «Диалат Лтд.»).

Амплификацию и детекцию результатов проводили на термоциклере CFX96 («Bio-Rad», США). Для определения повторяемости и воспроизводимости дополнительно использовали амплификаторы детектирующие ДТпрайм и ДТлайт («ДНК-Технология», Россия).

Статистический анализ. Для оценки эффективности ПЦР-РВ был выполнен расчет среднего значения пороговых циклов (Ct) для различных разведений ДНК. Анализ данных проводился с использованием метода регрессионного анализа в программе MS Office Excel 2016. Для оценки качества уравнения регрессии рассчитывали коэффициент детерминации (R^2), при этом значения R^2 выше 0,99 считались статистически значимыми.

Таблица 1

Последовательности олигонуклеотидов, использованные в работе

Table 1

Oligonucleotide sequences used in the study

Название	Последовательность олигонуклеотидов	Автор
RZ_ptssk 10	GGGGCCGAAGGTGCTG GTG	Oosterhof & Berendsen (2011)
RZ_ptssk 11	CGTCGCCCCCCCCGCTG	
Probe RZ_ptssk 12	TGGTCGTCCTCGGCG – BHQ1	
MVS21 F	CTAGTTGCTGAATCCACCCAG	Sudarshana et al. (2012)
MVS21 R	TACCGCTTGACTCTCGTTTC	
MVS21 P	CTGCCACCCGATGTTGTTGTTCC-BHQ1	
FP_Cm	TGTCGAGGGCATGTTGCACG	Bach et al. (2003)
RP_ Cm	GGAGACAGAATTGACCAATGAT	
Cmm Probe 6FAM	TTCCGTCGTCCTGTTGTGGATG – BHQ1	

Таблица 2

Составы реакционных смесей и условия амплификации

Table 2

Reaction mixture compositions and amplification conditions

Компоненты	Объем (V), мкл		Рабочая концентрация	Условия амплификации	
	1*	2*		1*	2*
Ультрачистая вода	16,5	12,0	–	10 мин при 95°C; 45 циклов: 15 сек. при 95°C, 30 сек. при 60°C	10 мин при 95°C; 45 циклов: 20 сек. при 95°C, 1 мин при 66°C
5х ПЦР-буфер	5,0	5,0	1х		
Прямой праймер	0,5	1,0	10 pM/µl		
Обратный праймер	0,5	1,0	10 pM/µl		
Зонд	0,5	1,0	5 pM/µl		
ДНК образца	2,0	5,0	–		
Объем реакции	25,0	25,0	–		

*1 – для ПЦР в соответствии с Oosterhof & Berendsen и Sudarshana et al.; 2 – для ПЦР согласно Bach et al.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Все методы, применяемые в повседневной лабораторной диагностике, характеризуются показателем аналитической чувствительности (АЧ), который определяет минимальное количество возбудителя, способное быть обнаруженным в исследуемой матрице. Для систем ПЦР допустимый порог обнаружения бактериальных фитопатогенов находится на уровне 10^2-10^3 КОЕ/мл. [25-27].

В таблицах 3-5 представлены результаты определения АЧ ПЦР-РВ, рекомендованных для диагностики *C. michiganensis*.

На основании полученных данных аналитическая чувствительность метода ПЦР-РВ по рекомендациям Oosterhof и Berendsen (2011) составила 10^4 КОЕ/мл. Такой уровень чувствительности подходит для подтверждения наличия *C. michiganensis* в образцах с высокой концентрацией патогена и для идентификации чистых культур. Однако данный тест не рекомендуется использовать в качестве скринингового метода для обнаружения *C. michiganensis* в аналитических пробах. Также стоит отметить, что при использовании обеих ПЦР-смесей порог чувствительности находился на одинаковом уровне.

Таблица 3

Аналитическая чувствительность ПЦР-РВ для выявления *C. michiganensis* по Oosterhof & Berendsen, 2011

Table 3

Analytical sensitivity of the qPCR for detecting *C. michiganensis* according to Oosterhof & Berendsen, 2011

Концентрация КОЕ/мл	ПЦР-смеси/повторности (Ct)							
	5xqPCRmix-HS				5xMas^{CFE} TaqMix-2025			
	1	2	3	Ct $_{ср.}$/ SD*	1	2	3	Ct $_{ср.}$/ SD*
10^7	25,07	25,84	25,45	25,45 ±0,39	28,02	28,53	28,23	28,26 ±0,26
10^6	28,76	28,18	28,53	28,49 ±0,29	31,44	32,09	31,71	31,75 ±0,33
10^5	32,18	31,61	31,82	31,87 ±0,29	34,95	34,59	34,63	34,72 ±0,20
10^4	35,71	38,53	36,02	36,75 ±1,54	38,17	39,06	38,27	38,50 ±0,49
10^3	–	–	–	x	–	–	–	x
10^2	–	–	–	x	–	–	–	x
10^1	–	–	–	x	–	–	–	x
10^0	–	–	–	x	–	–	–	x
К+	+			x	+			x
К-в	–			x	–			x
К-ч	–			x	–			x

*SD – Standard Deviation (стандартное отклонение).

АЧ метода ПЦР-РВ по Sudarshana et al. (2012) составила 10^3 КОЕ/мл, что на порядок выше чувствительности предыдущего теста. Использование разных ПЦР-смесей не повлияло на порог чувствительности теста. Эту праймерную систему можно рекомендовать как скрининговый метод при работе с аналитическими пробами томата.

Таблица 4

Аналитическая чувствительность ПЦР-РВ для выявления *C. michiganensis* по Sudarshana et al., 2012

Table 4

Analytical sensitivity of the qPCR for detecting *C. michiganensis* according to Sudarshana et al., 2012

Концентрация КОЕ/мл	ПЦР-смеси/повторности (Ct)							
	5xqPCRmix-HS				5xMas^{CFE} TaqMix-2025			
	1	2	3	Ct $_{ср.}$/ SD*	1	2	3	Ct $_{ср.}$/ SD*
10^7	24,08	24,49	24,33	24,30 ±0,21	27,34	26,81	27,03	27,06 ±0,27
10^6	27,98	27,57	27,64	27,73 ±0,22	29,97	30,07	30,05	30,03 ±0,05
10^5	31,05	30,90	31,02	30,99 ±0,08	33,13	33,24	33,07	33,15 ±0,09
10^4	34,49	34,31	34,35	34,38 ±0,09	36,63	36,68	36,51	36,61 ±0,09
10^3	40,73	37,87	38,02	38,87 ±1,61	40,66	41,30	40,98	40,98 ±0,32
10^2	–	–	–	x	–	–	–	x
10^1	–	–	–	x	–	–	–	x
10^0	–	–	–	x	–	–	–	x
К+	+			x	+			x
К-в	–			x	–			x
К-ч	–			x	–			x

Чувствительность метода ПЦР-РВ по Bach et al. (2003) составила 10^3 КОЕ/мл. Однако стоит отметить, что применение ПЦР-РВ по Bach et al. целесообразно только при использовании готовой смеси для ПЦР 5xMas^{CFE} TaqMix-2025 (ЗАО «Диалат Лтд.»). При применении другой готовой смеси для ПЦР 5xqPCRmix-HS 100% чувствительность теста отмечена при более высокой концентрации бактерий 10^6 КОЕ/мл. Поэтому данный тест можно рекомендовать как подтверждающий выявление *C. michiganensis.*

Таблица 5

Аналитическая чувствительность ПЦР-РВ для выявления *C. michiganensis* по Bach et al., 2003

Table 5

Analytical sensitivity of the qPCR for detecting *C. michiganensis* according to Bach et al., 2003

Концентрация КОЕ/мл	ПЦР-смеси/повторности (Ct)							
	5xqPCRmix-HS				5xMas^{CFE} TaqMix-2025			
	1	2	3	Ct $_{ср.}$/ SD*	1	2	3	Ct $_{ср.}$/ SD*
10^7	27,91	28,01	27,98	27,97 ±0,05	25,01	24,68	24,73	24,81 ±0,18
10^6	31,89	30,81	31,52	31,41 ±0,55	28,11	28,36	28,27	28,25 ±0,13
10^5	33,95	–	33,27	x	31,04	31,53	31,34	31,30 ±0,25
10^4	–	–	–	x	34,93	34,22	34,47	34,54 ±0,36
10^3	–	–	–	x	37,31	38,17	37,67	37,72 ±0,43
10^2	–	–	–	x	–	–	–	x
10^1	–	–	–	x	–	–	–	x
10^0	–	–	–	x	–	–	–	x
К+	+			x	+			x
К-в	–			x	–			x
К-ч	–			x	–			x

В исследованиях мы оценивали эффективность ПЦР при использовании двух готовых смесей для ПЦР: 5х qPCRmix-HS (ООО «Евроген») и 5х Mas^{CFE} Taq-Mix-2025 (ЗАО «Диалат Лтд.»). Оценка этого показателя позволяет существенно повысить правильность интерпретации результатов ПЦР-РВ [21]. Определяли эффективность для всех комбинаций, кроме ПЦР-РВ, по Bach et al. с использованием готовой смеси для ПЦР 5xqPCRmix-HS ввиду ее низкой чувствительности (табл. 5). Результаты определения эффективности амплификации ДНК, тестируемых праймерных систем представлены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты определения эффективности амплификации тестов ПЦР-РВ

Table 6

Results of amplification efficiency assessment for the qPCR tests

Показа-тели	по Oosterhof & Berendsen		по Sudarshana et al.		по Bach et al.	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*
a	3,728	3,369	3,579	3,442	–	3,211
1/a	0,268	0,297	0,279	0,291	–	0,311
$10^{(1/a)}$	1,855	1,981	1,903	1,952	–	2,048
$[10^{(1/a)}]$-1	0,855	0,981	0,903	0,952	–	1,048
%	85,46	98,07	90,29	95,22	–	104,85
R^2	0,987	0,9981	0,9959	0,9936	–	0,9997

*ПЦР-смеси: 1-5xqPCRmix-HS; 2-5xMas^{CFE} TaqMix-2025.

На рисунке 2 представлен график зависимости значений пороговых циклов (Ct) от концентрации ДНК *C. michiganensis* в 4-х разведениях при постановке ПЦР-РВ по Oosterhof & Berendsen с использованием ПЦР-смеси 5xMas^{CFE} TaqMix-2025.

Анализ эффективности методов ПЦР показал, что ПЦР-РВ по Oosterhof & Berendsen можно рекомендовать с использованием 5xMasCFE TaqMix-2025, так как эффективность с этой смесью была стабильно выше 90%. При постановке ПЦР-РВ по Sudarshana et al. эффективность была выше 90% при использовании обеих готовых смесей для ПЦР. ПЦР-РВ по Bach et al. можно рекомендовать только с использованием готовой смеси 5xMasCFE TaqMix-2025 (эффективность – более 104%).

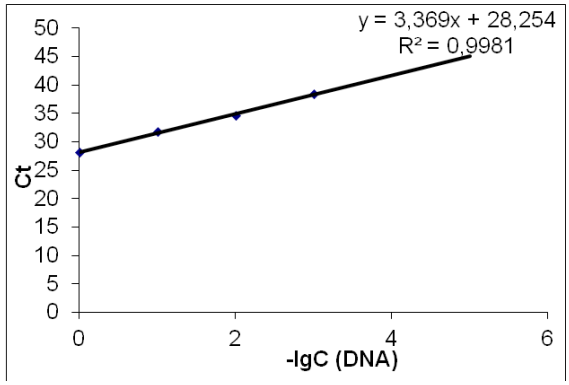

Рис. 2. График линейной регрессии распределения значений порогового цикла (Ct) в зависимости от концентрации ДНК в 4-х разведениях с праймерами и зондом RZ_ptssk 10_11_12

Figure 2. Linear regression plot of threshold cycle (Ct) values depending on DNA concentration in four dilutions with primers and probe RZ_ptssk 10_11_12

Также важным параметром молекулярно-генетических методов является специфичность, которая характеризует способность праймерной системы точно отличать целевой организм от нецелевых даже при их совместном наличии в исследуемой пробе. В таблице 7 представлены результаты оценки этой характеристики для протестированных методов.

В ходе исследований было установлено, что все праймерные системы обеспечивали 100%-ную специфичность к целевым штаммам бактерий. При этом не было обнаружено перекрестных реакций с другими штаммами.

Определение селективности является необходимым для установления влияния субстрата (матрицы) на эффективность ПЦР-теста.

В таблице 8 представлены результаты исследования селективности 3 методов выявления возбудителя бактериального рака томата.

Согласно полученным данным все тесты различали целевую ДНК патогена на уровне АЧ. Влияние субстрата (матрицы) на чувствительность ПЦР не выявлено.

Результаты исследований повторяемости и воспроизводимости ПЦР-тестов для выявления бактериального рака томата приведены в таблице 9.

Таблица 7

Специфичность ПЦР-РВ для выявления *C. michiganensis*

Table 7

Specificity of the qPCR for detecting *C. michiganensis*

Номер штамма*	ПЦР-тесты/результат/ значение Ct		
	по Oosterhof & Berendsen, 2011	по Sudarshana et al., 2012	по Bach et al., 2003
0239	+ (27,76)	+ (24,55)	+ (30,11)
0240	+ (28,13)	+ (24,83)	+ (32,58)
0496	+ (27,37)	+ (24,37)	+ (33,76)
0497	+ (28,14)	+ (24,17)	+ (32,79)
0498	+ (27,61)	+ (24,41)	+ (31,28)
К-в	–	–	–
К-ч	–	–	–

*В таблице указаны номера штаммов, для которых результаты ПЦР оказались положительными.

Таблица 8

Селективность методов ПЦР для выявления бактериального рака томата

Table 8

Selectivity of PCR methods for detecting bacterial canker in tomato

ПЦР-тесты	Концентрация КОЕ/мл	Субстрат/повторности					
		экстракт семян томата			экстракт вегетативных частей томата		
		1	2	3	1	2	3
по Oosterhof & Berendsen, 2011	10^5	32,20	31,96	32,02	32,27	32,18	32,64
	10^4	35,86	36,03	36,17	35,97	35,48	36,14
	К-в	–			–		
	К-ч	–			–		
по Sudarshana et al., 2012	10^4	34,54	34,47	34,73	34,58	34,76	34,62
	10^3	37,92	38,03	38,17	38,26	38,37	38,04
	К-в	–			–		
	К-ч	–			–		
по Bach et al., 2003	10^4	34,98	34,54	34,68	34,47	34,92	34,43
	10^3	37,43	38,16	38,25	37,93	37,86	37,72
	К-в	–			–		
	К-ч	–			–		

При анализе результатов испытания ПЦР-тестов, проведенных одним специалистом, установлено, что повторяемость на уровне АЧ составила 100% для всех тестов ПЦР. При оценке результатов исследований, полученных тремя специалистами, отмечено, что воспроизводимость также составила 100% для всех методов.

Таблица 9

Повторяемость и воспроизводимость методов ПЦР для выявления бактериального рака томата

Table 9

Repeatability and reproducibility of PCR methods for detecting bacterial canker in tomato

ПЦР-тесты	Повторности	1 специалист		2 специалист		3 специалист	
		Концентрация, КОЕ/мл					
		10^5	10^4	10^5	10^4	10^5	10^4
по Oosterhof & Berendsen, 2011	1	31,98	35,17	32,18	35,98	32,12	36,16
	2	32,14	36,56	32,35	36,76	32,23	36,78
	3	32,02	36,34	32,50	36,73	32,40	36,93
	4	32,27	36,49	32,88	36,04	32,47	36,56
	5	32,33	35,92	32,37	36,12	32,33	36,02
	6	32,04	36,36	32,12	35,85	32,76	36,06
	К-в	–		–		–	
	К-ч	–		–		–	
по Sudarshana et al., 2012	Повторности	10^4	10^3	10^4	10^3	10^4	10^3
	1	34,36	37,52	33,68	37,94	33,56	37,05
	2	34,04	38,75	33,97	38,02	33,73	26,97
	3	34,15	38,46	34,15	37,87	33,98	37,82
	4	34,34	37,57	33,89	38,54	34,06	37,02
	5	34,07	37,27	34,78	37,77	34,12	37,69
	6	34,02	37,78	34,06	37,97	34,13	36,93
	К-в	–		–		–	
	К-ч	–		–		–	

Окончание табл. 9

ПЦР-тесты	Повторности	1 специалист		2 специалист		3 специалист	
		Концентрация, КОЕ/мл					
		10^5	10^4	10^5	10^4	10^5	10^4
по Bach et al., 2003	Повторности	10^4	10^3	10^4	10^3	10^4	10^3
	1	34,03	37,22	34,18	38,33	34,55	37,76
	2	33,98	38,17	34,38	37,47	33,73	37,57
	3	34,16	38,08	34,27	38,29	33,78	37,84
	4	34,09	38,19	34,36	38,52	34,52	37,68
	5	34,14	37,27	34,34	38,37	34,48	37,77
	6	34,26	38,35	34,39	38,43	33,79	37,79
	К-в	–		–		–	
	К-ч	–		–		–	

Выводы
Conclusions

1. Выявлено, что при обнаружении *C. michiganensis* методом ПЦР в реальном времени по рекомендациям Sudarshana et al. и Bach et al. наблюдается высокая аналитическая чувствительность – 10^3 КОЕ/мл. Однако для использования ПЦР-РВ по Bach et al. требуется применение готовой реакционной смеси 5xMasCFE Taq-Mix-2025 (ЗАО «Диалат Лтд.»). АЧ ПЦР-РВ в соответствии с Oosterhof & Berendsen составила 10^4 КОЕ/мл.

2. Оценка показателей эффективности метода ПЦР-РВ показала, что использование готовой смеси для ПЦР 5xMas^{CFE} TaqMix-2025 (ЗАО «Диалат Лтд.»). значительно повышало эффективность ПЦР, показатели которой для праймерных систем по Oosterhof & Berendsen, Sudarshana et al. и по Bach et al. составили 98,07; 95,22; 104,85% соответственно.

3. Обнаружено, что все праймерные системы обеспечивали полную специфичность к целевым штаммам патогена. При этом не было зарегистрировано перекрестных реакций с другими штаммами, применявшимися в исследованиях.

4. В процессе оценки селективности было выявлено, что все тесты различали целевую ДНК *C. michiganensis* на уровне АЧ. Таким образом, установлено отсутствие влияния субстрата (матрицы) на чувствительность ПЦР.

5. Повторяемость и воспроизводимость всех тестов составили 100% на уровне порога чувствительности.

6. В результате оценки применимости 3 тестов ПЦР-РВ с отечественными реагентами ПЦР в соответствии с Sudarshana et al. рекомендован как скрининговый метод для выявления возбудителя бактериального рака томата *C. michiganensis* в аналитических пробах из семян и вегетативных частей томата. Остальные ПЦР-РВ рекомендованы как подтверждающие выявление *C. michiganensis* тесты.

Список источников

1. Chaudhary P., Sharma A., Singh B., Nagpal A.K. Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal of Food Science and Technology*. 2018;55(8):2833-2849. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z

2. Wang C., Li M., Duan X., Abu-Izneid T. et al. Phytochemical and nutritional profiling of tomatoes; impact of processing on bioavailability-a comprehensive review. *Food Reviews International*. 2023;39(8):5986-6010. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2097692

3. Ajaharuddin S.K.M.D., Lal M., Yadav A., Kumar N. et al. Breeding for resistance against pest and diseases in tomatoes: A review. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2024;30(6):469-479. https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62063

4. Chaudhary J., Khatri P., Singla P., Kumawat S. et al. Advances in omics approaches for abiotic stress tolerance in tomato. *Biology*. 2019;8(4):90-108. https://doi.org/10.3390/biology8040090

5. Белошапкина О.О., Писарева И.Н. Определение аналитической чувствительности и специфичности методов ПЦР для диагностики черной бактериальной пятнистости томата // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2024. № 3. С. 78–94. https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-3-78-94

6. Игнатов А.Н., Челидзе Г.Г., Воробьева К.С. Риски распространения в РФ новых вирусных и бактериальных болезней овощных культур через предприятия защищенного грунта // *Картофель и овощи*. 2019. № 4. С. 18–21. https://doi.org/10.25630/PAV.2019.84.71.002

7. Osdaghi E., Abachi H., Jacques M.A. Clavibacter michiganensis Reframed: The Story of How the Genomics Era Made a New Face for an Old Enemy. *Molecular Plant Pathology*. 2025;26:e70093. https://doi.org/10.1111/mpp.70093

8. Li X., Tambong J., Yuan K., Chen W. et al. Re-classification of *Clavibacter michiganensis* subspecies on the basis of whole-genome and multi-locus sequence analyses. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2018;68(1):234-240. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002492

9. Osdaghi E., Abachi H., Jacques M.A. *Clavibacter michiganensis* Reframed: The Story of How the Genomics Era Made a New Face for an Old Enemy. *Molecular Plant Pathology*. 2025;26(5):e70093. https://doi.org/10.1111/mpp.70093

10. Morcia C., Piazza I., Ghizzoni R., Terzi V. et al. Molecular diagnostics in tomato: Chip digital PCR assays targeted to identify and quantify *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* and *Ralstonia solanacearum in planta*. *Horticulturae*. 2023;9(5):553-565. https://doi.org/10.3390/horticulturae9050553

11. Tripathi R., Vishunavat K., Tewari R. Morphological and molecular characterization of *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* causing bacterial canker in tomatoes. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2022;119:101833. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101833

12. Verma R.K., Roman-Reyna V., Raanan H., Coaker G. et al. Allelic variations in the *chpG* effector gene within *Clavibacter michiganensis* populations

determine pathogen host range. *PLoS Pathogens*. 2024;20(7): e1012380. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1012380

13. Solano-Alvarez N., Valencia-Hernandez J.A., Rico-Garcia E., Torres-Pacheco I. et al. A novel isolate of *Bacillus* cereus promotes growth in tomato and inhibits *Clavibacter michiganensis* infection under greenhouse conditions. *Plants*. 2021;10(3):506. https://doi.org/10.3390/plants10030506

14. EPPO. PM 7/42 (3) *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*. *EPPO Bulletin*. 2016;46(2):202-225. https://doi.org/10.1111/epp.12302

15. Писарева И.Н., Белошапкина О.О., Селявкин С.Н., Шнейдер Е.Ю. О распространении бактериозов томата в регионах России // *Защита и карантин растений*. 2024. Т. 1. С. 61. EDN: HLOEBD

16. Chen X., Bai K., Lyu Q., Jiang N. et al. Role of penicillin-binding proteins in the viability, morphology, stress tolerance, and pathogenicity of *Clavibacter michiganensis*. *Phytopathology®*. 2021;111(8):1301-1312. https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-20-0326-R

17. Brochu A.S., Durrivage J., Torres D., Perez-Lopez E. Diet and injection, important recommendations to characterize *Clavibacter michiganensis*–tomato interactions. *Plant Health Progress*. 2023;24(4):475-481. https://doi.org/10.1094/PHP-04-23-0040-RS

18. Takishita Y., Souleimanov A., Bourguet C., Ohlund L.B. et al. *Pseudomonas entomophila* 23S produces a novel antagonistic compound against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, a pathogen of tomato bacterial canker. *Applied Microbiology*. 2021;1(1):60-73. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol1010006

19. Li Y., Chen X., Xu X., Yu C. et al. Deletion of *pbpC* enhances bacterial pathogenicity on tomato by affecting biofilm formation, exopolysaccharides production, and exoenzyme activities in *Clavibacter michiganensis*. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(6):5324. https://doi.org/10.3390/ijms24065324

20. Peritore-Galve F.C., Tancos M.A., Smart C.D. Bacterial canker of tomato: revisiting a global and economically damaging seedborne pathogen. *Plant Disease*. 2021;105(6):1581-1595. https://doi.org/10.1094/PDIS-08-20-1732-FE

21. Джалилов Ф.С., Карлов Г.И., Корнев К.П., Матвеева Е.В. и др. Диагностика зараженности семян томата возбудителем бактериального рака (*Clavibacter michiganensis subsp. Michiganensis* (Davis (Smith) (Cmm)) методом ПЦР // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2007. № 1. С. 21–25. EDN: HZDUPJ

22. ISF (2022) Detection of *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis in Tomato Seed*. URL: https://worldseed.org/wp-content/uploads/2022/07/Protocol_Tomato_Cmm_v5_July-2022-002.pdf.

23. Fatmi M., Walcott R.R., Schaad N.V. *Detection of Plant-Pathogenic Bacteria in Seed and Other Planting Material* (*Second Edition*). Minnesota: The American Phytopathological Society (APS), 2017:360.

24. Ребриков Д.В., Саматов Г.А., Трофимов Д.Ю., Семенов П.А. *ПЦР в реальном времени*: Учебное пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 225 с. EDN: RAYMPL

25. Приходько С.И., Писарева И.Н., Корнев К.П. Оценка применимости молекулярных методов диагностики возбудителя бактериоза винограда (болезнь Пирса) *Xylella fastidiosa* Wells et al., используемых в международной и отечественной практике // *Садоводство и виноградарство*. 2022. № 1. С. 38–43. https://doi.org/10.31676/0235-2591-2022-1-38-43

26. Тараканов Р.И., Игнатьева И.М., Белошапкина О.О., Чебаненко С.И. и др. Выявление возбудителя бактериального ожога сои *Pseudomonas savastanoi* pv.

glycinea в семенах методом ПЦР // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2024. № 1. С. 41–52. https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-1-41-52

27. Оболенский Р.Р., Словарева О.Ю., Дорофеева Л.В. Оценка применимости ПЦР-теста в режиме «реального времени» для идентификации возбудителя желтого слизистого бактериоза пшеницы *Rathayibacter tritici* // *Фитосанитария. Карантин растений*. 2025. № 1 (22). С. 26–39. https://doi.org/10.69536/FKR.2025.85.45.003

References

1. Chaudhary P., Sharma A., Singh B., Nagpal A.K. Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal of Food Science and Technology*. 2018;55(8):2833-2849. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z

2. Wang C., Li M., Duan X., Abu-Izneid T. et al. Phytochemical and nutritional profiling of tomatoes; impact of processing on bioavailability-a comprehensive review. *Food Reviews International*. 2023;39(8):5986-6010. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2097692

3. Ajaharuddin S.K.M.D., Lal M., Yadav A., Kumar N. et al. Breeding for resistance against pest and diseases in tomatoes: A review. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2024;30(6):469-479. https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62063

4. Chaudhary J., Khatri P., Singla P., Kumawat S. et al. Advances in omics approaches for abiotic stress tolerance in tomato. *Biology*. 2019;8(4):90-108. https://doi.org/10.3390/biology8040090

5. Beloshapkina O.O., Pisareva I.N. Determination of the analytical sensitivity and specificity of PCR methods for the diagnosis of bacterial spot of tomato. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2024;(3):78-94. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-3-78-94

6. Ignatov A.N., Chelidze G.G., Vorobyova K.S. Risks of spreading of new viral and bacterial diseases of vegetable crops in the Russian Federation through greenhouse production. *Potato and Vegetables.* 2019;(4):18-21. (In Russ.) https://doi.org/10.25630/PAV.2019.84.71.002

7. Osdaghi E., Abachi H., Jacques M.A. Clavibacter michiganensis Reframed: The Story of How the Genomics Era Made a New Face for an Old Enemy. *Molecular Plant Pathology*. 2025;26: e70093. https://doi.org/10.1111/mpp.70093

8. Li X., Tambong J., Yuan K., Chen W. et al. Re-classification of *Clavibacter michiganensis* subspecies on the basis of whole-genome and multi-locus sequence analyses. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2018;68(1):234-240. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002492

9. Osdaghi E., Abachi H., Jacques M.A. *Clavibacter michiganensis* Reframed: The Story of How the Genomics Era Made a New Face for an Old Enemy. *Molecular Plant Pathology*. 2025;26(5): e70093. https://doi.org/10.1111/mpp.70093

10. Morcia C., Piazza I., Ghizzoni R., Terzi V. et al. Molecular diagnostics in tomato: Chip digital PCR assays targeted to identify and quantify *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* and *Ralstonia solanacearum in planta*. *Horticulturae*. 2023;9(5):553-565. https://doi.org/10.3390/horticulturae9050553

11. Tripathi R., Vishunavat K., Tewari R. Morphological and molecular characterization of *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* causing bacterial canker in tomatoes. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2022;119:101833. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101833

12. Verma R.K., Roman-Reyna V., Raanan H., Coaker G. et al. Allelic variations in the *chpG* effector gene within *Clavibacter michiganensis* populations

determine pathogen host range. *PLoS Pathogens*. 2024;20(7): e1012380. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1012380

13. Solano-Alvarez N., Valencia-Hernandez J.A., Rico-Garcia E., Torres-Pacheco I. et al. A novel isolate of *Bacillus* cereus promotes growth in tomato and inhibits *Clavibacter michiganensis* infection under greenhouse conditions. *Plants*. 2021;10(3):506. https://doi.org/10.3390/plants10030506

14. EPPO. PM 7/42 (3) *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*. *EPPO Bulletin*. 2016;46(2):202-225. https://doi.org/10.1111/epp.12302

15. Pisareva I.N., Beloshapkina O.O., Seliavkin S.N.1, Shneyder E.Y. On the spread of tomato bacteriosis in the regions of Russia. *Plant Health and Quarantine.* 2024;(S4-1(20)):61. (In Russ.)

16. Chen X., Bai K., Lyu Q., Jiang N. et al. Role of penicillin-binding proteins in the viability, morphology, stress tolerance, and pathogenicity of *Clavibacter michiganensis*. *Phytopathology®*. 2021;111(8):1301-1312. https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-20-0326-R

17. Brochu A.S., Durrivage J., Torres D., Perez-Lopez E. Diet and injection, important recommendations to characterize *Clavibacter michiganensis*–tomato interactions. *Plant Health Progress*. 2023;24(4):475-481. https://doi.org/10.1094/PHP-04-23-0040-RS

18. Takishita Y., Souleimanov A., Bourguet C., Ohlund L.B. et al. *Pseudomonas entomophila* 23S produces a novel antagonistic compound against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, a pathogen of tomato bacterial canker. *Applied Microbiology*. 2021;1(1):60-73. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol1010006

19. Li Y., Chen X., Xu X., Yu C. et al. Deletion of *pbpC* enhances bacterial pathogenicity on tomato by affecting biofilm formation, exopolysaccharides production, and exoenzyme activities in *Clavibacter michiganensis*. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(6):5324. https://doi.org/10.3390/ijms24065324

20. Peritore-Galve F.C., Tancos M.A., Smart C.D. Bacterial canker of tomato: revisiting a global and economically damaging seedborne pathogen. *Plant Disease*. 2021;105(6):1581-1595. https://doi.org/10.1094/PDIS-08-20-1732-FE

21. Dzhalilov F.S., Karlov G.I., Kornev K.P., Matveeva E.V. et al. Diagnostics of tomato seeds infected with bacterial canker stimulus (*Clavibacter michiganensis* subsp. *Michiganensis* (Davis (Smith) (Cmm)) by using PCR method. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2007;(1):21-25. (In Russ.)

22. ISF (2022) Detection of *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis in Tomato Seed*. URL: https://worldseed.org/wp-content/uploads/2022/07/Protocol_Tomato_Cmm_v5_July-2022-002.pdf

23. Fatmi M., Walcott R.R., Schaad N.V. *Detection of Plant-Pathogenic Bacteria in Seed and Other Planting Material* (*Second Edition*). Minnesota: The American Phytopathological Society (APS), 2017:360.

24. Rebrikov D.V., Samatov G.A., Trofimov D.Yu., Semenov P.A. *Real-time PCR*: a training manual. Moscow, Russia: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2011:225. (In Russ.)

25. Prikhodko S.I., Pisareva I.N., Kornev K.P. Detecting *Xylella fastidiosa*, a grape bacteriosis agent (Pierce disease) applicability evaluation of molecular methods used in international and domestic practice. *Horticulture and Viticulture*. 2022;(1):38-43. (In Russ.) https://doi.org/10.31676/0235-2591-2022-1-38-43

26. Tarakanov R.I., Ignat'eva I.M., Beloshapkina O.O., Chebanenko S.I. et al. Detection of the soybean bacterial blight pathogen *Pseudomonas savastanoi* pv. *glycinea* in seeds by the PCR method. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2024;(1):41-52. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-1-41-52

27. Obolenksy R.R., Slovareva O.Yu., Dorofeeva L.V. Evaluation of the real-time PCR applicability for the identification of bacterial ear rot of wheat *Rathayibacter tritici. Plant Health and Quarantine.* 2025;(1(22)):26-39. (In Russ.) https://doi.org/10.69536/FKR.2025.85.45.003

Сведения об авторах

Ирина Николаевна Писарева, научный сотрудник научно-методического отдела бактериологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский центр карантина растений»; 140150, Российская Федерация, Московская обл., м.о. Раменский, р.п. Быково, ул. Пограничная, 32; e-mail: iruru@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-3084-0591

Ольга Олеговна Белошапкина, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры защиты растений, 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: beloshapkina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8564-8142

Information about the authors

Irina N. Pisareva, Research Associate at the Research and Methodology Department of Bacteriology, All-Russian Plant Quarantine Center; 32 Pogranichnaya St., Bykovo, Ramensky Municipal District, Moscow Region, 140150, Russian Federation; e-mail: iruru@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-3084-0591

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, 127434, Russian Federation; e-mail: beloshapkina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8564-8142

Научная статья
УДК 636.2:004.932:619
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-105-122

ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

Алгоритм адаптивной дискретизации видеопотока для повышения точности детекции реперных анатомических ориентиров КРС в задачах оценки их упитанности

Анастасия Владимировна Греченева✉, Евгения Сергеевна Латынина, Магдалина Алексеевна Акимушкина, Максим Дмитриевич Бакнин

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

✉**Автор, ответственный за переписку:** a.grecheneva@rgau-msha.ru

Аннотация

Оценка упитанности молочного крупного рогатого скота по шкале Body Condition Score (BCS) используется для контроля энергетического статуса животных и выявления рисков метаболических и репродуктивных нарушений. При производственной видеосъемке точность автоматизированного определения BCS ограничивается смещением реперных анатомических ориентиров, возникающим вследствие изменения позы животного, скорости прохода, неравномерного освещения, бликов и теней. Целью исследований являлась разработка алгоритма адаптивного выбора кадров видеопотока для повышения точности детекции реперных точек и контурных ориентиров в задачах автоматизированной оценки упитанности крупного рогатого скота молочного направления продуктивности. Материал исследований составили видеопоследовательности 983 коров молочного направления продуктивности. Для анализа использовали систему реперных точек и контурных ориентиров тазовой области, а обработку изображений выполняли многозадачной нейросетевой моделью локализации ключевых точек и контуров с последующим прогнозом BCS по шкале 1–5. Разработанный алгоритм включал в себя адаптивную дискретизацию кадров по скорости движения животного, оценку наблюдаемости анатомических зон и покомпонентный отбор наиболее информативных кадров для формирования согласованного набора признаков. Применение алгоритма обеспечило снижение средней абсолютной ошибки оценки BCS с 0,34 до 0,22 балла, увеличение доли оценок в пределах ±0,5 балла с 86,2 до 93,7% и рост взвешенного коэффициента Cohen's κ с 0,74 до 0,86. Нормированная ошибка локализации реперных точек уменьшилась с 0,071 до 0,048. Полученные результаты подтверждают, что адаптивная кадровая предобработка повышает точность и устойчивость автоматизированной оценки упитанности в условиях производственной видеосъемки.

Ключевые слова

крупный рогатый скот, молочное скотоводство, упитанность, body condition score, компьютерное зрение, видеопоток, адаптивная дискретизация, ключевые точки, контурные ориентиры, нейросетевая модель

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25–76–00067.

Для цитирования
Греченева А.В., Латынина Е.С., Акимушкина М.А., Бакнин М.Д. Алгоритм адаптивной дискретизации видеопотока для повышения точности детекции реперных анатомических ориентиров КРС в задачах оценки упитанности // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 105–122.

LIVESTOCK BREEDING, BIOLOGY AND VETERINARY MEDICINE

An adaptive video stream sampling algorithm for improving the detection accuracy of reference anatomical landmarks in cattle for their body condition assessment

Anastasia V. Grecheneva✉, Evgeniya S. Latynina, Magdalina A. Akimushkina, Maxim D. Baknin

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

✉**Corresponding author:** a.grecheneva@rgau-msha.ru

Abstract
Body Condition Score (BCS) in dairy cattle is used to monitor animal energy status and to identify the risks of metabolic and reproductive disorders. In industrial video recording, the accuracy of automated BCS estimation is limited by the displacement of reference anatomical landmarks. This displacement arises due to changes in animal posture, walking speed, uneven lighting, glare, and shadows. The study aimed to develop an adaptive video-frame selection algorithm to improve the detection accuracy of reference keypoints and contour landmarks in automated body condition assessment of dairy cattle. The research material consisted of video sequences of 983 dairy cows. For analysis, a system of reference points and contour landmarks of the pelvic region was used. Image processing was performed using a multitask neural network model for localizing key points and contours, followed by BCS prediction on a 1–5 scale. The developed algorithm included adaptive frame sampling based on animal walking speed, visibility assessment of anatomical zones, and component-wise selection of the most informative frames to form a consistent set of features. Application of the algorithm resulted in a reduction of the mean absolute error in BCS estimation from 0.34 to 0.22 score points, an increase in the proportion of predictions within ±0.5 points from 86.2% to 93.7%, and an improvement in the weighted Cohen's κ coefficient from 0.74 to 0.86. The normalized localization error of reference keypoints decreased from 0.071 to 0.048. The findings confirm that adaptive frame preprocessing enhances the accuracy and robustness of automated body condition assessment under industrial video recording conditions.

Keywords
cattle, dairy farming, body condition, Body Condition Score, computer vision, video stream, adaptive sampling, keypoints, contour landmarks, neural network model

Acknowledgments
The research was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 25–76–00067.

For citation
Grecheneva A.V., Latynina E.S., Akimushkina M.A., Baknin M.D. An adaptive video stream sampling algorithm for improving the detection accuracy of reference anatomical landmarks in cattle for their body condition assessment. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):105–122.

Введение
Introduction

Показатель упитанности молочных коров – Body Condition Score (BCS) [1-4] – является интегральным показателем энергетического баланса и здоровья, связанным с продуктивностью, фертильностью и риском метаболических заболеваний в раннюю лактацию. Исследования подтверждают наличие устойчивых взаимосвязей балла упитанности и клинических проявлений заболеваний. Так, низкий уровень BCS ассоциирован с повышенным риском возникновения кетоза [5-7], а высокий, особенно в сухостойный период, рассматривается как фактор риска дистоции [8]. Дополнительно доказана связь BCS с продуктивностью и продолжительностью хозяйственного использования животных [9].

Следует отметить, что в племенных заводах, племрепродукторах и в товарных хозяйствах с организованным племенным учетом контроль BCS, как правило, осуществляется ежемесячно [9], что характеризует данный процесс повышенной трудоемкостью. Несмотря на клиническую значимость показателя традиционная экспертная оценка обладает выраженной субъективностью. В настоящее время на большинстве предприятий АПК оценка BCS осуществляется посредством пальпаторной и визуальной оценки жировых отложений в области поясничного отдела, маклаков, крестца и основания хвоста коровы по шкале от 1 (сильно истощенное животное) до 5 (ожирение) с шагом 0,25 или 0,5 [1, 3-5]. Межнаблюдательная вариабельность, влияние условий освещения и человеческого фактора ограничивают воспроизводимость результатов. Исследования, опубликованные в Journal of Dairy Science, демонстрируют: коэффициент согласия Cohen's kappa между экспертами варьируется в пределах 0,6-0,8, что соответствует умеренной или высокой, но не идеальной согласованности [10]. Данная вариабельность означает наличие стохастического шума в целевой переменной, что с точки зрения машинного обучения приводит к ограничению верхней границы достижимой точности модели.

Указанные ограничения обусловили рост интереса к автоматизированным методам оценки упитанности на основе технологий компьютерного зрения и машинного обучения. Развитие цифровых камер, глубинных сенсоров и алгоритмов обработки изображений позволило перейти от субъективной экспертной оценки к количественному анализу морфометрических признаков.

Цель исследований: разработка алгоритма адаптивного выбора кадров видеопотока для повышения точности детекции ключевых экстерьерных точек крупного рогатого скота молочного направления продуктивности в задачах оценки упитанности.

Методика исследований
Research method

В задачах видеомониторинга молочного КРС целесообразно подразделять признаки на динамические и статические, поскольку эти классы по-разному проявляются в видеопотоке и предъявляют различные требования к методике измерения. Динамическая биометрия опирается на временную структуру движения и используется для контроля хромоты, так как патологические изменения чаще выражаются через скорость, амплитуду и симметрию локомоции [11]. Упитанность относится к статической биометрии и отражает распределение мягких тканей. При этом визуальные проявления упитанности связаны с тем, насколько выражены костные ориентиры и мягкотканные впадины в области таза и поясницы [12]. Следовательно, в видеопотоке ключевым становится не число кадров, а наличие наблюдений, в которых рельеф этих зон фиксируется устойчиво и сопоставимо.

Степень визуализации костных структур обратно пропорциональна количеству подкожного жира. Таким образом, задача автоматизации BCS по изображениям фактически сводится к количественной оценке геометрических характеристик формы тела, что делает данную задачу пригодной для использования методов компьютерного зрения и технологий искусственного интеллекта [13-15].

В представленных исследованиях для анализа изображений коров в дорсальной проекции (вид сверху) и боковой проекции были выделены реперные анатомические ориентиры и контурные точки, традиционно используемые при визуальной оценке упитанности. На изображениях в дорсальной проекции к ним были отнесены маклоки (1, 2), краниолатеральные контурные точки тазовой области (3, 4), парасакральные реперные точки (5, 6), межмаклочная точка (7), межседалищная точка (8), латеральные точки перехода от маклаков к седалищным буграм (9, 10), а также седалищные бугры (11, 12). На изображениях в боковой проекции выделяли маклок (2), краниальную контурную точку пояснично-тазовой области (4), область крестцовой связки (6), область коротких ребер (7), седалищный бугор (8), область тазобедренного сустава (10) и хвостовую связку (12).

Выбор указанных анатомических ориентиров (ключевых точек) обусловлен тем, что именно в этих участках наиболее отчетливо проявляются морфологические изменения, связанные с накоплением или дефицитом подкожного жира. С позиции компьютерного зрения данные ориентиры представляют собой информативные элементы изображения, характеризующиеся изменением кривизны внешнего контура, выраженностью костных выступов, глубиной анатомических углублений, а также взаимным расположением ключевых структур. При снижении упитанности в указанных зонах возрастает визуальная выраженность костных ориентиров, увеличивается контрастность контуров и углублений, тогда как при повышении упитанности наблюдаются сглаживание соответствующих анатомических переходов и уменьшение их геометрической выраженности. Использование данных реперных ориентиров позволяет формализовать визуальную оценку упитанности в виде набора морфометрических признаков, пригодных для последующего извлечения и анализа средствами искусственного интеллекта.

Практическая трудность точной детекции анатомических ориентиров обусловлена фотометрическими помехами [16]. В селекционном коридоре на животноводческих комплексах светотеневая картина меняется по мере прохода животного, возникают блики на шерсти, тени от ограждений, а также колебания яркости ввиду работы автоэкспозиции. В области таза рельеф часто читается по микроконтрасту, поэтому постановка ключевых точек в проекции маклока (tuber coxae), седалищного бугра (tuber ischii), крестца и области основания хвоста (tailhead) может смещаться к ложным градиентам, сформированным бликом или тенью. Даже небольшое смещение центров ключевых точек приводит к заметной ошибке в индексах упитанности, которые строятся на нормированных расстояниях, углах и локальной форме контура. В связи с этим предлагается специализированный алгоритм анализа изображений, блок-схема которого приведена на рисунке 2.

Алгоритм рассматривает оценку упитанности как восстановление статической морфологии по серии неоднородных наблюдений. На первом этапе выполняются детекция животного и трекинг, чтобы кадры одного прохода были связаны единым идентификатором. Затем вводится адаптивная дискретизация видеопотока, поскольку скорость прохода сильно варьирует; при фиксированной частоте кадрирования быстрые животные дают разреженную выборку и повышенный смаз, а медленные формируют избыточные, почти одинаковые кадры, среди которых возрастает риск «закрепить» неблагоприятную светотень (рис. 3).

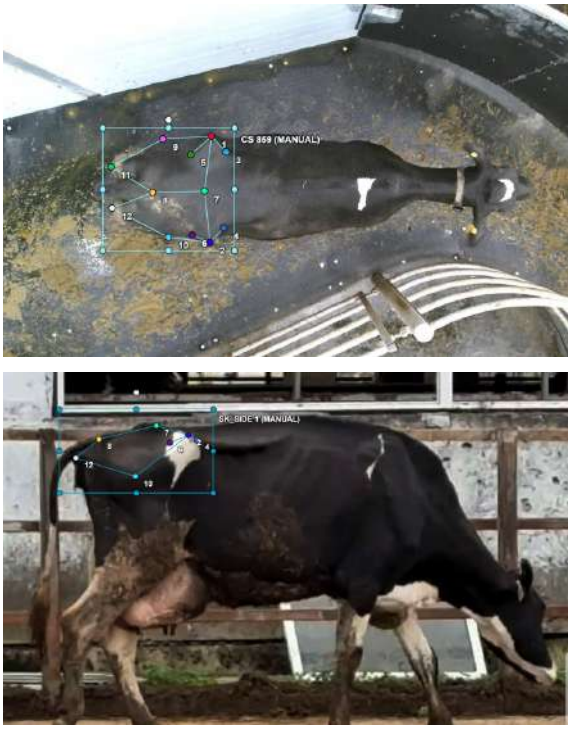

Рис. 1. Реперные точки и контурные ориентиры, используемые
при разметке изображений коров для оценки упитанности:
а – вид сверху; б – вид сбоку. Для вида сверху: 1, 2 – маклоки; 11, 12 – седалищные бугры;
7 – межмаклочная точка; 8 – межседалищная точка; 5, 6 – парасакральные реперные точки;
9, 10 – латеральные точки перехода от маклоков к седалищным буграм;
3, 4 – краниолатеральные контурные точки тазовой области. Для вида сбоку:
2 – маклак; 4 – краниальная контурная точка пояснично-тазовой области;
6 – крестцовая связка; 7 – область коротких ребер; 8 – седалищный бугор;
10 – тазобедренный сустав; 12 – хвостовая связка

Figure 1. Reference points and contour landmarks used for annotating cow images for body condition assessment: (a) top view; (b) side view. For the top view: 1, 2 – hook bones;
11, 12 – pin bones; 7 – inter-hook point; 8 – inter-pin point; 5, 6 – parasacral reference points;
9, 10 – lateral transition points from hook to pin bones;
3, 4 – craniolateral contour points of the pelvic region. For the side view:
2 – hook bone; 4 – cranial contour point of the lumbar-pelvic region; 6 – sacral ligament;
7 – short rib area; 8 – pin bone; 10 – hip joint; 12 – tailhead ligament

Особое значение в контексте автоматизации BCS имеет выбор ракурса съемки. Традиционно экспертная оценка выполняется при наблюдении животного сзади или под углом, что отражает исторически сложившуюся практику визуального осмотра. Однако при использовании стационарных камер в условиях промышленной фермы более технологически оправданной является дорсальная (top-view) съемка, когда камера размещается над проходом или доильной установкой. Такой ракурс минимизирует перекрытия между животными, снижает влияние фона и обеспечивает стабильную геометрию проекции тазовой области. В дорсальной проекции маклаки и крестцовая область располагаются в почти плоской конфигурации относительно плоскости изображения, что упрощает количественный анализ угловых и линейных параметров. Таким образом, съемка top-view представляет собой не только инженерно-удобное, но и морфологически обоснованное решение для автоматической оценки упитанности.

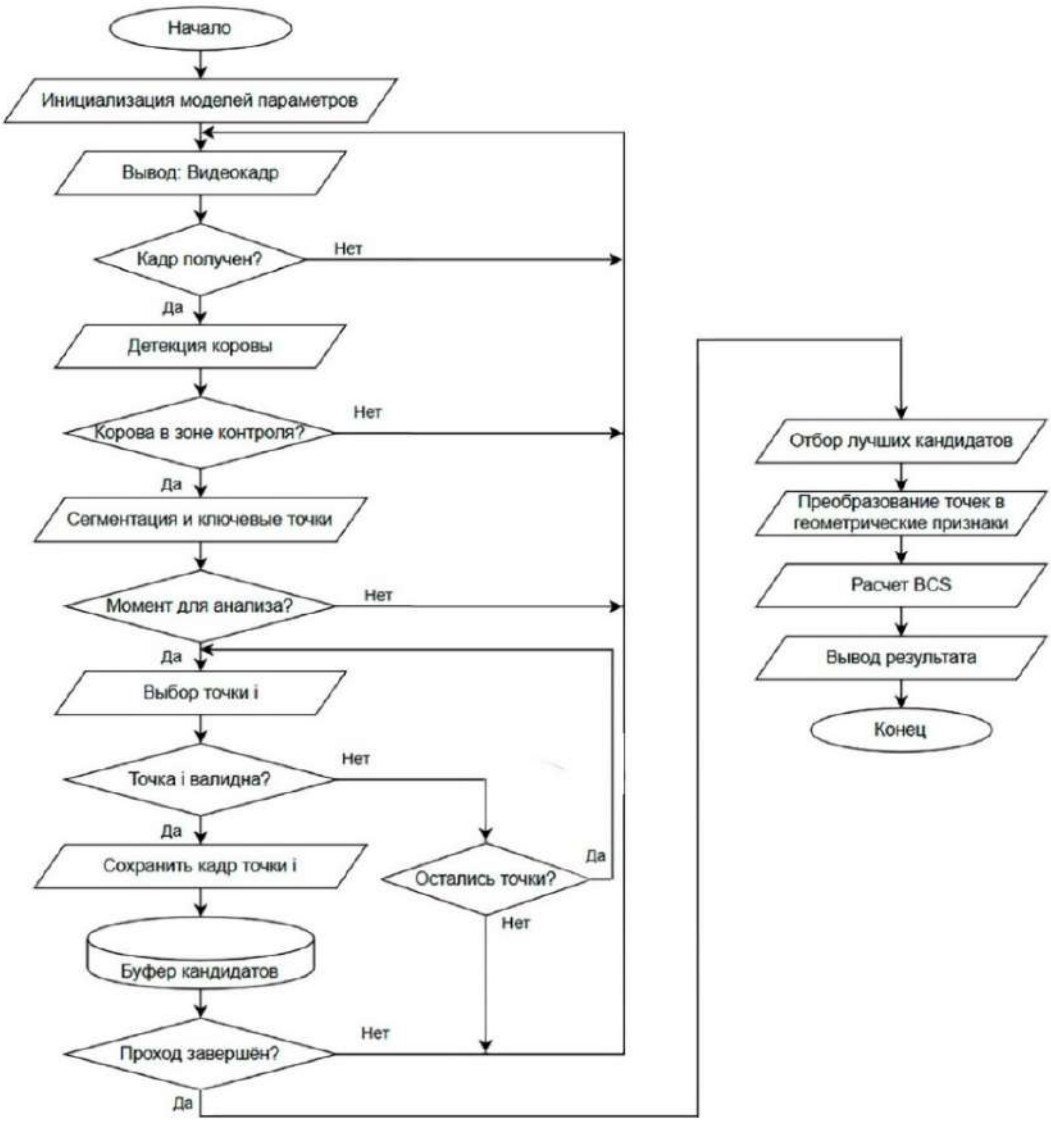

Рис. 2. Блок-схема подпрограммы алгоритма адаптивной дискретизации видеопотока

Figure 2. Flowchart of the adaptive video stream sampling algorithm subroutine

Рис. 3. Принцип работы алгоритма адаптивной дискретизации видеопотока

Figure 3. Operating principle of the adaptive video stream sampling algorithm

Рассмотрим блок-схему подпрограммы процесса «Треккинг и оценка скорости» (рис. 3):

• D_t – детекции на текущем кадре (координаты, уверенность нейросети);

• T_t – множество активных треков, представляющее собой объекты, идентифицированные и отслеживаемые на кадре t;

• TrackTable(t-1) – таблица треков, хранящая историю состояний (координаты, скорость, идентификаторы) всех треков на предыдущем кадре;

• ROI – зона интереса, прямоугольная подобласть кадра, определяющая пространство, в котором производится целевой анализ;

• Параметры – настройки (пороги, max lost и т.д.).

Выбор кадров привязывается к перемещению объекта в кадре, что обеспечивает почти постоянный пространственный шаг наблюдения.

Пусть c_t обозначает характерную точку объекта (например, центр рамки или центр масс маски), а S_acc – накопленное смещение. Тогда кадр выбирается для анализа при достижении порога Δs, после чего накопление перезапускается.

$$S_{\text{acc}} \leftarrow S_{\text{acc}} + \left\| c_t - c_{\{t-\Delta\tau\}} \right\|; \tag{1}$$

выбрать кадр, если $S_{\text{acc}} \geq \Delta s$; затем $S_{\text{acc}} = 0$.

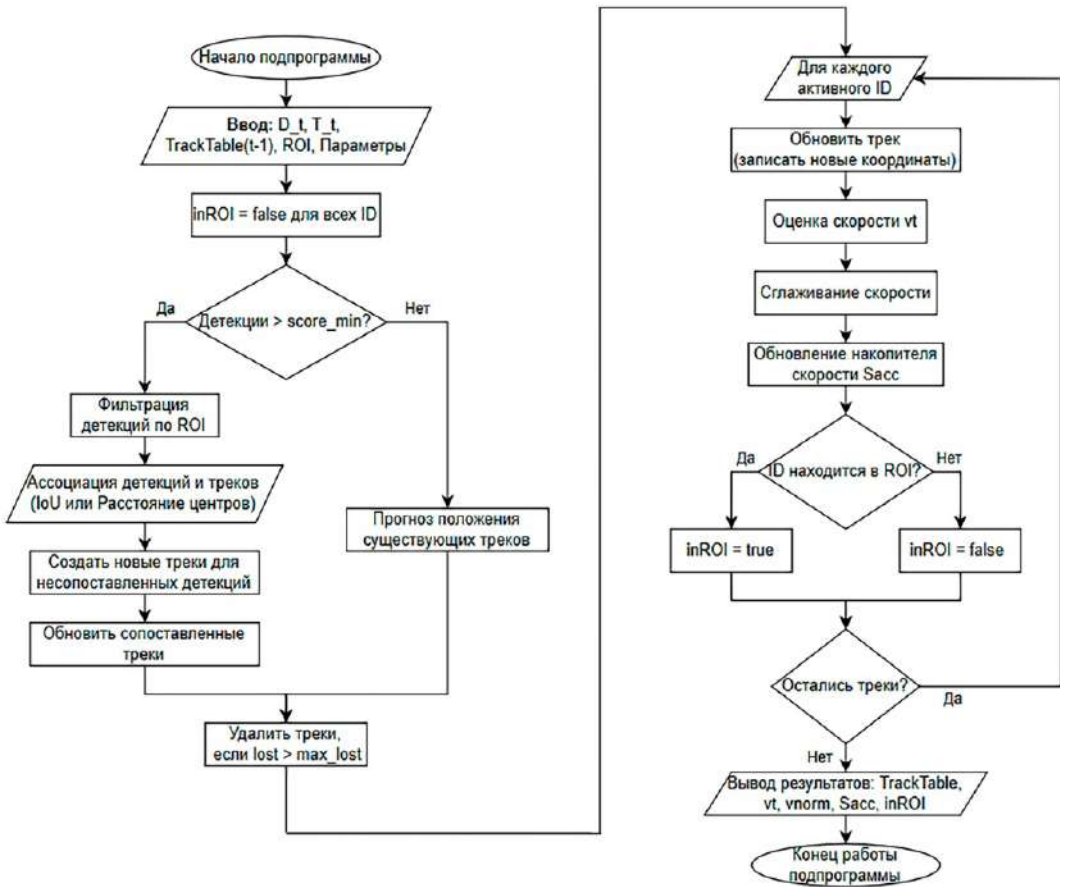

Рис. 4. Блок-схема алгоритма подпрограммы треккинга и оценки скорости особей КРС

Figure 4. Flowchart of the cattle tracking and speed estimation subroutine

Для каждого выбранного кадра оцениваются первичные ключевые точки таза и формируются зоны интереса (ROI) [17], которые задаются как функция этих точек. Этот шаг является принципиальным, поскольку критерии качества рассчитываются не по всему кадру, а внутри анатомически обоснованной области. В ROI вычисляются показатели, отражающие пригодность кадра для постановки ключевых точек и оценки рельефа. В качестве полезных факторов выступают выраженность рельефа в зоне впадин и резкость, а в качестве штрафов используются доли пересвета, провала экспозиции и спекулярных бликов. Итоговая оценка пригодности кадра *Q_t* задается так, чтобы рельеф и резкость повышали оценку, а фотометрические артефакты – понижали.

$$Q_t = \sigma\left(a_r \cdot S_{\{relief,t\}} + a_s \cdot S_{\{sharp,t\}} + a_c \cdot conf_{\{avg,t\}}\right) \times \\ \times \exp(-\lambda_1 \cdot r_\{sat,t\} - \lambda_2 \cdot r_\{dark,t\} - \lambda_3 \cdot r_\{spec,t\}). \quad (2)$$

Полученная величина *Q_t* формализует понятие «выигрышного кадра» по наблюдаемости рельефа и устойчивости фотометрии. После ранжирования кадров по *Q_t* отбирается верхняя часть выборки. При этом разные ключевые точки могут лучше наблюдаться в разные моменты прохода, поэтому применяется покомпонентный выбор кадров для постановки точек: для каждой точки i выбирается тот кадр, который одновременно обеспечивает высокую уверенность детектора и высокую пригодность наблюдения:

$$t_i\^\{best\} = \arg\max_t(conf_\{i,t\} \cdot Q_t), \quad p_i\^\{sel\} = p_\{i,t_i\^\{best\}\}. \quad (3)$$

Если требуется дополнительная устойчивость к единичным выбросам, применяется многокадровая компоновка. Из top-K-кадров выполняется выравнивание по устойчивым якорям таза, после чего координаты каждой точки оцениваются как робастная агрегация наблюдений с весами, пропорциональными *conf_{i, t}·Q_t.* Таким образом, каждая точка фактически «берется» из тех наблюдений, в которых соответствующая зона была видна наиболее отчетливо, а влияние кадров с бликом или глубокими тенями подавляется через штраф в *Q_t.*

В итоге блок-схема алгоритма подпрограммы «Детекция и ключевые точки» выглядит, как показано на рисунке 5.

Подпрограмма предназначена для локализации анатомических ориентиров крупного рогатого скота на последовательности кадров видеопотока. Входными данными служат текущий кадр *t*, множество активных идентификаторов ID_k, параметры конфигурации Θ и обученные нейросетевые модели. Для каждого активного ID_k выполняется итеративная процедура: на основе предшествующей информации формируется локальная область интереса, в пределах которой производится детекция животного. При успешной верификации обнаружения выполняется наложение скелетной модели с последующим выделением четырех ключевых точек: маклоков (Tuber coxae), седалищных бугров (Tuber ischii), тазобедренных суставов (Thurl) и основания хвоста (Tailhead). Точки, удовлетворяющие пороговое значение уверенности $conf \geq conf_min$, подвергаются геометрической валидации для подтверждения анатомической правдоподобности их взаимного расположения. Для валидных конфигураций вычисляются бинарные показатели видимости $visi \in \{0,1\}$ каждой точки и формируются локальные области интереса ROIi вокруг них. По завершении обработки всех активных идентификаторов подпрограмма возвращает структурированный результат, содержащий координаты точек, флаги их видимости и соответствующие области интереса для каждого ID_k.

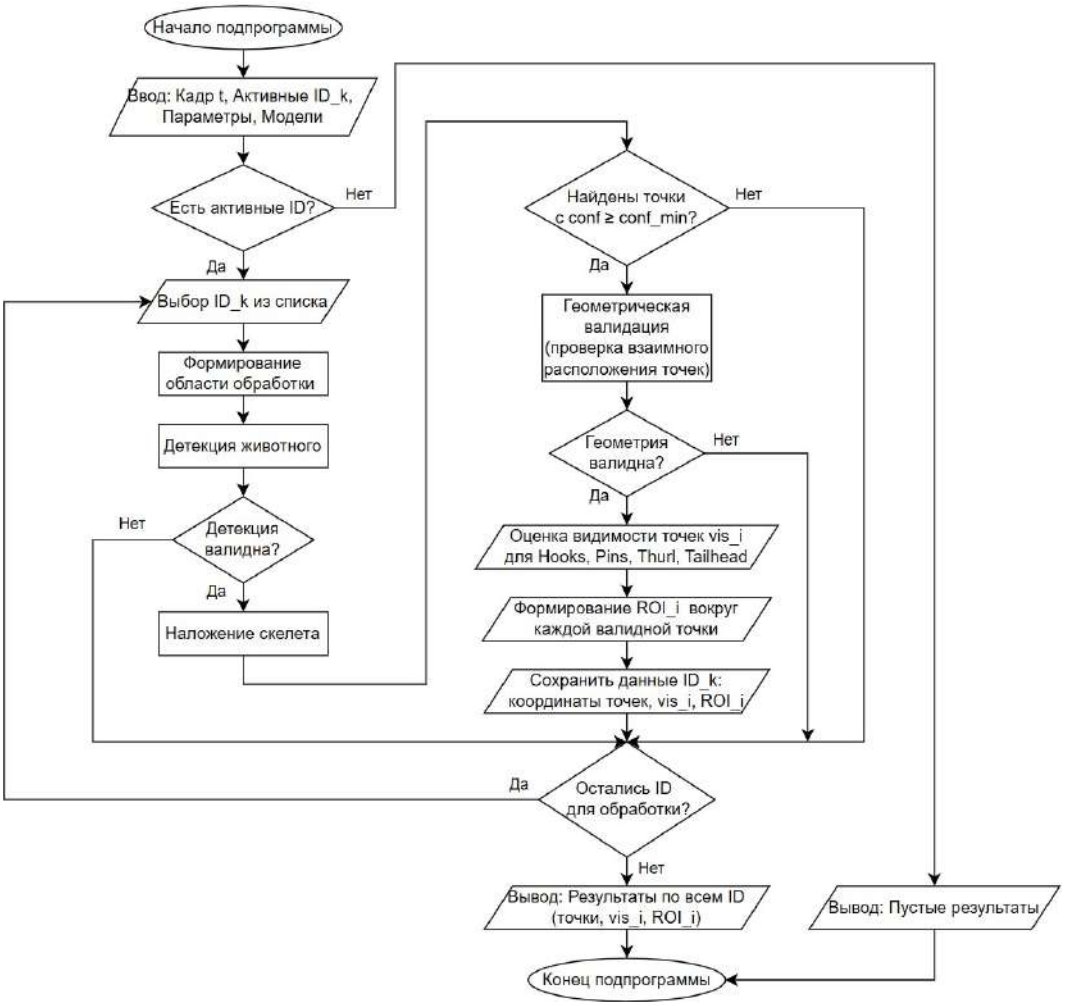

Рис. 5. Блок-схема алгоритма подпрограммы «Сегментация и ключевые точки»

Figure 5. Flowchart of the “segmentation and keypoints” subroutine

После получения согласованного набора ключевых точек и при наличии контурных признаков из ROI вычисляются показатели, коррелирующие с упитанностью. В геометрической части используются нормированные расстояния и углы между тазовыми ориентирами, а в морфологической части – характеристики угловатости и выраженности впадин в привязанных ROI. Полученные признаки подаются в модель, переводящую их в оценку BCS. Результат сопровождается диагностикой достоверности, которая учитывает число валидных кадров, согласованность компоновки и уверенность модели; дополнительно сохраняется набор доказательных кадров из top-выборки, что упрощает экспертную верификацию и настройку порогов качества для конкретного коридора.

В исследования включены видеопоследовательности 983 коров молочного направления продуктивности. Оценка упитанности выполнялась по шкале BCS1-5. Разметка изображений осуществлялась по системе реперных точек и контурных ориентиров тазовой области. Для вида сверху использовали маклоки, седалищные бугры, межмаклочную и межседалищную точки, парасакральные реперные точки,

латеральные точки перехода от маклоков к седалищным буграм и краниолатеральные контурные точки тазовой области. Для вида сбоку использовали маклок, краниальную контурную точку пояснично-тазовой области, крестцовую связку, область коротких ребер, седалищный бугор, тазобедренный сустав и хвостовую связку. Указанные ориентиры использовали для расчета нормированных расстояний, угловых характеристик и параметров локальной формы контура, определяющих индекс упитанности.

Обработка изображений выполнялась с использованием многозадачной высокоразрешающей нейросетевой модели локализации ключевых точек и контурных ориентиров с последующим регрессионным прогнозом значения BCS. На вход модели подавали кадрированное изображение коровы размером *512 × 512* пикселей. Выход сети включал в себя тепловые карты реперных точек, контурную маску тазовой области и итоговую оценку BCS. Обучение проводили с использованием оптимизатора AdamW [18] при начальной скорости обучения $1 \cdot 10^{-3}$, размере мини-батча 16, весовом затухании $1 \cdot 10^{-4}$ и длительности обучения 120 эпох. Для локализации точек применяли метрики *NME и PCK@0.05*, для контурной области – Dice coefficient, для итоговой оценки упитанности – MAE, RMSE и взвешенный коэффициент Cohen's κ.

Формирование входных кадров осуществлялось в двух режимах. В первом режиме применялась равномерная временная дискретизация видеопотока без учета скорости перемещения животного и без оценки пригодности отдельных кадров для локализации экстерьерных ориентиров. Во втором режиме использовали алгоритм кадровой предобработки, включающий в себя адаптивную дискретизацию по скорости движения животного и покадровую оценку наблюдаемости анатомических зон. Частота выборки кадров изменялась в зависимости от перемещения объекта в кадре, что позволяло уменьшать избыточность при медленной проходке и сохранять информативные фазы движения при высокой скорости. Для каждой реперной точки и контурного ориентира вычисляли показатель наблюдаемости, учитывающий выраженность локального рельефа, резкость изображения, отсутствие пересветов, глубоких теней, бликов и окклюзий. По результатам ранжирования для каждой анатомической зоны отбирали кадры с наибольшей информативностью, после чего формировали согласованный набор ключевых точек и контурных ориентиров, использованный для расчета BCS.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Применение алгоритма кадровой предобработки сопровождалось повышением точности оценки упитанности по всем анализируемым показателям. Средняя абсолютная ошибка определения BCS снизилась с 0,34 до 0,22 балла, среднеквадратичная ошибка – с 0,46 до 0,31 балла. Доля оценок, попавших в интервал ±0,5 балла BCS относительно экспертного значения, увеличилась с 86,2 до 93,7%. Точность точной классификации по шкале BCS1-5 возросла с 71,8 до 81,6%, значение взвешенного коэффициента Cohen's κ – с 0,74 до 0,86 (табл. 1).

На уровне локализации анатомических ориентиров также отмечено снижение ошибки. Нормированная ошибка по реперным точкам уменьшилась с 0,071 до 0,048, доля невалидных проходов, при которых надежная оценка упитанности не могла быть получена вследствие смаза, неблагоприятной позы или фотометрических искажений, сократилась с 11,8 до 3,1%. Наиболее выраженное улучшение зарегистрировано для крестцовой связки, области коротких ребер, седалищных бугров и тазобедренного сустава, то есть для тех анатомических зон, где ошибка локализации в наибольшей степени зависит от фазовой изменчивости движения, светотеневого рисунка и характера контура (рис. 6).

Таблица 1

Сравнение итоговых метрик оценки упитанности в режимах без алгоритма предобработки и с алгоритмом адаптивной дискретизации и компоновки ключевых точек

Table 1

Comparison of final body condition assessment metrics in the modes without the preprocessing algorithm and with the adaptive frame sampling and keypoint fusion algorithm

Статистический показатель	Значение показателя	
	Без применения алгоритма	С применением алгоритма
Средняя абсолютная ошибка, MAE (балл BCS)	0,34	0,22
Среднеквадратичная ошибка, RMSE (балл BCS)	0,46	0,31
Доля оценок в пределах ±0,5 балла BCS, %	86,2	93,7
Точная классификация по шкале BCS1-5, %	71,8	81,6
Взвешенный коэффициент согласия Cohen's κ	0,74	0,86
Нормированная ошибка локализации реперных точек, NME	0,071	0,048
Доля невалидных проходов, %	11,8	3,1

Рис. 6. Тепловая карта нормированной ошибки локализации реперных точек и контурных ориентиров в двух режимах обработки

Figure 6. Heat map of the normalized localization error for reference points and contour landmarks in two processing modes

На уровне реперных точек наибольший эффект был получен для зон, наиболее чувствительных к светотеневым и позовым искажениям. По тепловой карте ошибок видим, что после применения алгоритма уменьшалась нормированная ошибка

локализации не только для маклока и седалищного бугра, но и для крестцовой связки, тазобедренного сустава и области коротких ребер. Последняя зона ожидаемо оставалась наиболее трудной для детекции, однако и здесь снижение ошибки было выраженным (рис. 7). Это подтверждает, что ключевой вклад предложенной схемы связан не столько с глобальным улучшением качества изображения, сколько с более корректным выбором кадров и более устойчивым восстановлением локального рельефа в анатомически значимых участках.

Дополнительный анализ по условиям съемки показал, что выигрыш от алгоритма возрастает по мере усложнения визуальной сцены. Наибольшее относительное снижение MAE наблюдалось при контрастном освещении, наличии бликов и у животных с быстрой проходкой, где при фиксированной дискретизации базовый режим чаще пропускал информативные фазы движения. В модельном примере относительное снижение MAE составляло от 18-24% при равномерном освещении до 35-42% в условиях выраженных теней и бликов при средней и высокой скорости прохода. Тем самым подтверждается, что адаптивная дискретизация и отбор best-кадров особенно важны в тех режимах, где ошибки локализации формируются вследствие непостоянства внешних условий, а не только вследствие ограничений самой нейросетевой архитектуры.

Распределение животных по классам BCS1-5 при использовании алгоритма кадровой оптимизации в большей степени соответствовало экспертной структуре выборки (рис. 8). В режиме равномерной дискретизации наблюдалось сглаживание распределения с перераспределением части животных в соседние классы, преимущественно в центральную область шкалы. После применения адаптивной выборки и покомпонентного отбора наиболее информативных кадров распределение автоматических оценок приближалось к экспертному, что указывает на уменьшение систематического смещения при интерпретации экстерьерных признаков.

Рис. 7. Тепловая карта относительного снижения MAE при использовании алгоритма в зависимости от условий освещения и скорости прохода животного

Figure 7. Heat map of the relative reduction in MAE when using the algorithm depending on lighting conditions and animal walking speed

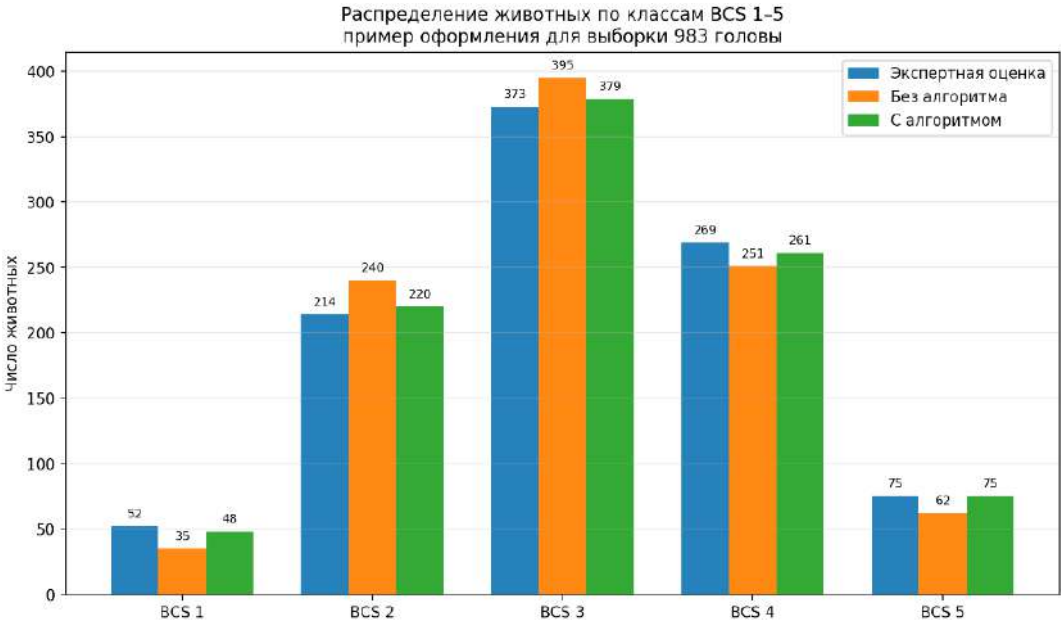

Рис. 8. Распределение голов по классам BCS1-5

Figure 8. Distribution of cows across BCS classes 1-5

Практическая значимость предложенного алгоритма определяется тем, что повышение точности автоматической оценки упитанности непосредственно влияет на корректность выделения группы животных с метаболическим и репродуктивным риском. Упитанность у молочного скота рассматривается как индикатор обеспеченности их организма энергией, а отклонение BCS от физиологически оптимального диапазона ассоциировано с нарушениями обмена и снижением продуктивности. По данным литературы, повышенная упитанность связана с риском кетоза, жировой дистрофии печени и задержания последа, тогда как недостаточная упитанность ассоциирована с хромотой и снижением молочной продуктивности; снижение BCS также коррелирует с метритом, неактивностью яичников, смещением сычуга и увеличением продолжительности сервис-периода. Следовательно, точность определения BCS имеет не только зоотехническое, но и клиническое значение.

В рассматриваемой выборке применение алгоритма кадровой оптимизации сопровождалось уменьшением средней абсолютной ошибки с 0,34 до 0,22 балла BCS и увеличением доли оценок, попавших в интервал ±0,5 балла, с 86,2 до 93,7%. Для шкалы BCS1-5 такая разница является принципиальной, поскольку при отсутствии кадровой селекции и покомпонентного отбора информативных фаз проходки возрастает вероятность смещения животного в соседний оценочный диапазон. В практическом отношении это означает риск ошибочного отнесения коровы либо к группе животных с удовлетворительной упитанностью, либо к группе, требующей коррекции кормления, дополнительного осмотра и более частого мониторинга. При массовом скрининге стада даже систематическое смещение на 0,3-0,5 балла приводит к перераспределению животных между управленчески значимыми категориями и, следовательно, к снижению чувствительности системы к ранним изменениям их энергетического статуса.

Клиническая ценность алгоритма особенно возрастает в отношении животных с пограничными значениями BCS. Именно в этой зоне решение о корректировке рациона, контроле транзитного периода или повторной ветеринарной оценке принимается на основе небольших различий в выраженности маклаков, седалищных бугров, крестцовой связки, хвостовой связки и области коротких ребер. При равномерной временной дискретизации без анализа наблюдаемости этих зон ошибка локализации реперных точек возрастает вследствие светотеневых и позовых искажений, что непосредственно отражается на итоговом балле. Применение алгоритма, напротив, обеспечивает выбор тех кадров, в которых экстерьерные признаки упитанности представлены наиболее отчетливо, и тем самым уменьшает вероятность клинически значимой ошибки классификации.

С производственной точки зрения это создает предпосылки для более надежного автоматизированного мониторинга животных в критические физиологические периоды, прежде всего – в сухостойный, транзитный и ранний лактационный периоды, когда изменения упитанности наиболее тесно связаны с последующим риском развития метаболических и репродуктивных нарушений. В этом смысле алгоритм кадровой предобработки повышает не только формальную точность модели компьютерного зрения, но и диагностическую ценность результата как инструмента раннего выявления животных группы риска. С учетом того, что ручная оценка BCS является трудоемкой и характеризуется ограниченной воспроизводимостью между экспертами, автоматизированная система с уменьшенной ошибкой измерения может рассматриваться как практически значимый компонент цифрового ветеринарного мониторинга стада.

Выводы
Conclusions

По результатам исследований разработан алгоритм адаптивной дискретизации видеопотока для повышения точности детекции реперных анатомических ориентиров КРС в задачах автоматизированной оценки упитанности. Он основан на изменении частоты выборки кадров в зависимости от скорости движения животного и на покомпонентном отборе наиболее информативных кадров по наблюдаемости анатомических зон, что позволяет уменьшить влияние светотеневых и позовых искажений на локализацию ключевых точек и контурных ориентиров.

Применение предложенного подхода на выборке из 983 коров обеспечило снижение средней абсолютной ошибки оценки BCS с 0,34 до 0,22 балла, увеличение доли оценок в пределах ±0,5 балла с 86,2 до 93,7% и повышение значения взвешенного коэффициента Cohen's κ с 0,74 до 0,86. Нормированная ошибка локализации реперных точек уменьшилась с 0,071 до 0,048, а доля невалидных проходов сократилась с 11,8 до 3,1%.

Наибольший эффект алгоритма установлен для анатомических зон, чувствительных к изменениям освещения и фазы движения, прежде всего – для крестцовой связки, области коротких ребер, седалищных бугров и тазобедренного сустава. Это подтверждает, что повышение точности оценки упитанности достигается за счет более устойчивого восстановления геометрии экстерьерных признаков, а не изменения базовой модели извлечения признаков.

Полученные результаты показывают, что адаптивная кадровая предобработка повышает точность, устойчивость и практическую применимость систем компьютерного зрения для автоматизированного мониторинга упитанности крупного рогатого скота молочного направления продуктивности в условиях производственной видеосъемки.

Список источников

1. Садиков Р.З., Морозова Н.И., Садиков Р.Р., Морозов И.А. и др. Система автоматического определения упитанности коров как инструмент поддержания оптимального физиологического состояния здоровья и продуктивности // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева*. 2024. Т. 16, № 1. С. 54–61. https://doi.org/10.36508/RSATU.2024.83.84.008

2. Турлюн В.И. Оценка упитанности голштинского скота // *Сборник научных трудов Северо-Кавказского научно-исследовательского института животноводства*. 2014. Т. 1, № 3. С. 167–170.

3. Loker S., Bastin C., Miglior F., Sewalem A. et al. Genetic and environmental relationships between body condition score and milk production traits in Canadian Holsteins. *Journal of Dairy Science*. 2012;95(1):410-419. https://doi.org/10.3168/jds.2011-4497

4. Gentil N.R., Santos A.D.F., Pereira M.A., Lima M.S. et al. Validation of body condition score system in Holstein × Zebu cows via ultrasound method during the transition period and early lactation. *Semina*: *Ciências Agrárias*. 2017;38(6):3797-3806. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n6p3797

5. Nagy S.Á., Kilim O., Csabai I., Gábor G. et al. Impact Evaluation of Score Classes and Annotation Regions in Deep Learning-Based Dairy Cow Body Condition Prediction. *Animals*. 2023;13(2):194. https://doi.org/10.3390/ani13020194

6. Bewley J.M., Schutz M.M. An interdisciplinary review of body condition scoring for dairy cattle. *The Professional Animal Scientist*. 2008;24(6):507-529. https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30901-3

7. Morrow D.A. Fat cow syndrome. *Journal of Dairy Science*. 1976;59(9):1625-1629. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(76)84415-3

8. Roche J.R., Kay J.K., Friggens N.C., Loor J.J. et al. Assessing and managing body condition score for the prevention of metabolic disease in dairy cows. *Veterinary Clinics of North America*: *Food Animal Practice*. 2013;29(2):323-336. https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2013.03.003

9. Безбородов П.Н. Показатель кондиции Body Condition Score (BCS) у молочных коров со смещениями сычуга // *Вестник НГАУ* (*Новосибирский государственный аграрный университет*). 2017. № 4. С. 124–141. EDN: YLQGXS

10. Roche J.R., Friggens N.C., Kay J.K., Fisher M.W. et al. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(12):5769-5801. https://doi.org/10.3168/jds.2009-2431

11. Ненашев И.В., Марьин Е.М. Распространенность ортопедических болезней дистального отдела конечностей у крупного рогатого скота в зависимости от условий содержания // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024. Т. 9, № 4. С. 103–108. https://doi.org/10.55170/1997-3225-2024-9-4-103-108

12. Sun Y., Huo P., Wang Y., Cui Z. et al. Automatic monitoring system for individual dairy cows based on a deep learning framework that provides identification via body parts and estimation of body condition score. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(11):10140-10151. https://doi.org/10.3168/jds.2018-16164

13. Summerfield G.I., De Freitas A., van Marle-Koster E., Myburgh H.C. Automated Cow Body Condition Scoring Using Multiple 3D Cameras and Convolutional Neural Networks. *Sensors*. 2023;23(22):9051. https://doi.org/10.3390/s23229051

14. Çevik K.K., Boğa M. Body Condition Score (BCS) Segmentation and Classification in Dairy Cows Using R-CNN Deep Learning Architecture. *European Journal of Science and Technology*. 2019;17:1248-1255. https://doi.org/10.31590/ejosat.658365

15. Zin T.T., Seint P.T., Tin P., Horii Y. et al. Body Condition Score Estimation Based on Regression Analysis Using a 3D Camera. *Sensors*. 2020;20(13):3705. https://doi.org/10.3390/s20133705

16. Мищенко И.И., Мисник А.Е., Александров А.В. Применение технологий компьютерного зрения и предварительной обработки изображений в системах поддержки принятия решений // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки».* 2024. Т. 32, № 4. С. 6–26. https://doi.org/10.14498/tech.2024.4.1

17. Olt L.S., Rice M.S., St. Clair M., Million C. et al. III. Automating Region of Interest (ROI) Selection for Spectral Analyses of Mastcam-Z Observations. *56th Lunar and Planetary Science Conference*. 2025:2154. URL: https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2025/pdf/2154.pdf (дата обращения: 13.03.2026).

18. PyTorch Contributors. AdamW – PyTorch Documentation. URL: https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.optim.AdamW.html (дата обращения: 13.03.2026).

References

1. Sadikov R.Z., Morozova N.I., Sadikov R.R., Morozov I.A. et al. The system of automatic determination of fatness of cows as a tool for maintaining optimal physiological health and productivity. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev.* 2024;16(1):54-61. (In Russ.) https://doi.org/10.36508/RSATU.2024.83.84.008

2. Turlyun V.I. Body condition score of the Holstein dairy cattle. *Sbornik nauchnykh trudov Severo-Kavkazskogo nauchno-issledovatelskogo instituta zhivotnovodstva.* 2014;1(3):167-170. (In Russ.)

3. Loker S., Bastin C., Miglior F., Sewalem A. et al. Genetic and environmental relationships between body condition score and milk production traits in Canadian Holsteins. *Journal of Dairy Science*. 2012;95(1):410-419. https://doi.org/10.3168/jds.2011-4497

4. Gentil N.R., Santos A.D.F., Pereira M.A., Lima M.S. et al. Validation of body condition score system in Holstein × Zebu cows via ultrasound method during the transition period and early lactation. *Semina*: *Ciências Agrárias*. 2017;38(6):3797-3806. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n6p3797

5. Nagy S.Á., Kilim O., Csabai I., Gábor G. et al. Impact Evaluation of Score Classes and Annotation Regions in Deep Learning-Based Dairy Cow Body Condition Prediction. *Animals*. 2023;13(2):194. https://doi.org/10.3390/ani13020194

6. Bewley J.M., Schutz M.M. An interdisciplinary review of body condition scoring for dairy cattle. *The Professional Animal Scientist*. 2008;24(6):507-529. https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30901-3

7. Morrow D.A. Fat cow syndrome. *Journal of Dairy Science*. 1976;59(9):1625-1629. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(76)84415-3

8. Roche J.R., Kay J.K., Friggens N.C., Loor J.J. et al. Assessing and managing body condition score for the prevention of metabolic disease in dairy cows. *Veterinary Clinics of North America*: *Food Animal Practice*. 2013;29(2):323-336. https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2013.03.003

9. Bezborodov P.N. Condition parameter “Body Condition Score (BCS)” of the dairy cows with displaced abomasum. *Vestnik NSAU* (*Novosibirsk State Agrarian University.* 2017;(4):124-141. (In Russ.)

10. Roche J.R., Friggens N.C., Kay J.K., Fisher M.W. et al. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(12):5769-5801. https://doi.org/10.3168/jds.2009-2431

11. Nenashev I.V., Marin E.M. The prevalence of orthopedic diseases of the distal extremities in cattle depending on housing conditions. *Bulletin Samara State Agricultural Academy.* 2004;9(4):103-108. (In Russ.) https://doi.org/10.55170/1997-3225-2024-9-4-103-108

12. Sun Y., Huo P., Wang Y., Cui Z. et al. Automatic monitoring system for individual dairy cows based on a deep learning framework that provides identification via body parts and estimation of body condition score. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(11):10140-10151. https://doi.org/10.3168/jds.2018-16164

13. Summerfield G.I., De Freitas A., van Marle-Koster E., Myburgh H.C. Automated Cow Body Condition Scoring Using Multiple 3D Cameras and Convolutional Neural Networks. *Sensors*. 2023;23(22):9051. https://doi.org/10.3390/s23229051

14. Çevik K.K., Boğa M. Body Condition Score (BCS) Segmentation and Classification in Dairy Cows Using R-CNN Deep Learning Architecture. *European Journal of Science and Technology*. 2019;17:1248-1255. https://doi.org/10.31590/ejosat.658365

15. Zin T.T., Seint P.T., Tin P., Horii Y. et al. Body Condition Score Estimation Based on Regression Analysis Using a 3D Camera. *Sensors*. 2020;20(13):3705. https://doi.org/10.3390/s20133705

16. Mishchenko I.I., Misnik A.E., Alexandrov A.V. Application of computer vision and image preprocessing technologies in decision support systems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki"*. 2024;32(4):6-26. (In Russ.) https://doi.org/10.14498/tech.2024.4.1

17. Olt L.S., Rice M.S., St. Clair M., Million C. et al. III. Automating Region of Interest (ROI) Selection for Spectral Analyses of Mastcam-Z Observations. *56th Lunar and Planetary Science Conference*. 2025:2154. URL: https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2025/pdf/2154.pdf (accessed: March 13, 2026).

18. PyTorch Contributors. AdamW – PyTorch Documentation. URL: https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.optim.AdamW.html (accessed: March 13, 2026).

Сведения об авторах

Анастасия Владимировна Греченева, канд. техн. наук, директор Проектного института цифровой трансформации АПК, 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: a.grecheneva@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-7341-5237

Евгения Сергеевна Латынина, канд. ветеринар. наук, доцент, доцент кафедры морфологии и ветеринарно-санитарной экспертизы, 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: evgenialatynina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-5145-1184

Магдалина Алексеевна Акимушкина, обучающийся магистратуры кафедры статистики и кибернетики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный

университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Максим Дмитриевич Бакнин, канд. техн. 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: baknin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3124-6252

Information about the authors

Anastasia V. Grecheneva, CSc (Eng), Director of the Project Institute for Digital Transformation of the Agro-Industrial Sector, 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: a.grecheneva@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-7341-5237

Evgeniya S. Latynina, CSc (Vet), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Morphology and Veterinary and Sanitary Examination, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: evgenialatynina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-5145-1184

Magdalina A. Akimushkina, Master's degree student of the Department of Statistics and Cybernetics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation

Maxim D. Baknin, CSc (Eng), 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: baknin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3124-6252

Научная статья
УДК 577.17:591.11:636.5
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-123-137

ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

Биологическое действие нанокомпозита Zn-C на морфобиохимические показатели крови цыплят-бройлеров

Юлия Владимировна Килякова[1]✉, Елена Петровна Мирошникова[1], Азамат Ерсаинович Аринжанов[1], Марина Сергеевна Мингазова[1, 2]

[1]Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, Оренбург, Россия
[2]Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** fish-ka06@mail.ru

Аннотация
Для реализации в полной мере генетического потенциала бройлеров и увеличения продуктивности в птицеводстве нашли применение частицы металлов в наноформе как биологически активные кормовые добавки, оптимизирующие обмен веществ, для профилактики гиповитаминозов, активации иммунных реакций. В результате научных исследований выполнена оценка биологического действия нанокомпозита Zn-C на рост, морфологические и биохимические показатели крови цыплят-бройлеров. Добавление нанокомпозита Zn-C в минимальной дозировке (0,2 ppm) способствовало более высокой интенсивности роста во время кормления – на 5,4% выше массы птицы контрольной группы. Цинк в наноформе в качестве кормовой добавки оказал положительное влияние также на морфобиохимические показатели крови цыплят-бройлеров. В лейкограмме цыплят-бройлеров опытных групп заметно увеличение количества нейтрофилов, эозинофилов и лимфоцитов к общему количеству клеток белой крови. Количество эритроцитов и гемоглобина оказалось ниже контроля в опытных группах, но среднее содержание гемоглобина в эритроците и средняя концентрация гемоглобина в эритроците были выше контроля. При биохимическом анализе сыворотки крови цыплят-бройлеров отмечалось усиление активности ферментов аланинаминотрансферазы и аспартатаминотрансферазы. Также во всех опытных группах наблюдалось снижение билирубина относительно контроля. В I группе отмечалось повышение фосфора относительно контроля на 8,91%. Полученные результаты являются важными для расширения вариантов кормовых добавок, обладающих ростостимулирующим эффектом в птицеводстве.

Ключевые слова
цыплята-бройлеры, кормление, нанокомпозит цинка, морфобиохимические показатели крови, динамика роста, кормовые добавки

Благодарности
Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075–15–2024–550).

Для цитирования
Килякова Ю.В., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е., Мингазова М.С. Биологическое действие нанокомпозита Zn-C на морфобиохимические показатели крови цыплят-бройлеров // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 123–137.

Biological effect of Zn-C nanocomposite on morphobiochemical blood parameters of broiler chickens

Yuliya V. Kilyakova[1]✉, Elena P. Miroshnikova[1], Azamat E. Arinzhanov[1], Marina S. Mingazova[1,2]

[1] Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia
[2] Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies RAS, Orenburg, Russia

✉**Corresponding author:** fish-ka06@mail.ru

Abstract
To fully realise the genetic potential of broilers and increase productivity in poultry farming, metal particles in nanoform have been applied as biologically active feed additives. These additives optimise metabolism, help prevent hypovitaminosis, and activate immune responses. This scientific study assessed the biological effect of the Zn-C nanocomposite on the growth, morphological, and biochemical blood parameters of broiler chickens. The addition of the Zn-C nanocomposite at a minimal dosage (0.2 ppm) promoted higher growth intensity during feeding – the bird mass was 5.4% greater than that of the control group. Zinc in nanoform, as a feed additive, also had a positive effect on the morphobiochemical blood parameters of broiler chickens. The leukogram of broiler chickens in the experimental groups showed a noticeable increase in the number of neutrophils, eosinophils, and lymphocytes relative to the total number of white blood cells. The number of erythrocytes and haemoglobin was lower than in the control group in the experimental groups, but the mean corpuscular haemoglobin and mean corpuscular haemoglobin concentration were higher than in the control. Biochemical analysis of the blood serum of broiler chickens revealed increased activity of alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase enzymes. A decrease in bilirubin relative to the control was observed in all experimental groups. In Group I, phosphorus levels increased by 8.91% relative to the control. The findings are important for expanding the range of feed additives with growth-stimulating effects in poultry farming.

Keywords
broiler chickens, feeding, zinc nanocomposite, morphobiochemical blood parameters, growth dynamics, feed additives

Acknowledgments
The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075–15–2024–550).

For citation
Kilyakova Yu.V., Miroshnikova E.P., Arinzhanov A.E., Mingazova M.S. Biological effect of Zn-C nanocomposite on morphobiochemical blood parameters of broiler chickens. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):123–137.

Введение
Introduction

Птицеводство в последнее десятилетие является стремительно растущей отраслью сельского хозяйства Российской Федерации, обеспечивая население качественными продуктами питания животного происхождения. В ответ на международные

санкции и глобальные экономические изменения в нашей стране были приняты меры по увеличению производства мяса птицы, что способствовало импортозамещению. Россия стала одним из крупнейших производителей куриного мяса в мире [1]. Важнейшая роль в отечественном птицеводстве принадлежит бройлерному направлению. Бройлерное птицеводство в России демонстрирует стабильный рост и высокую конкурентоспособность благодаря инвестициям, инновационным технологиям и государственной поддержке [2]. Бройлеры имеют множество преимуществ, что делает их крайне популярными в птицеводстве: высокая производительность, устойчивость к болезням, эффективность откорма. Высокопродуктивные кроссы цыплят-бройлеров обладают значительным генетическим потенциалом, позволяющим за 1-1,5 месяца выращивания получить живую массу более 2 кг [3]. С переходом на промышленный уровень производственникам иногда приходится увеличивать плотность содержания птицы, применять не всегда сбалансированные корма, а именно цыплята-бройлеры особенно чутко реагируют на условия содержания и кормления [4].

Увеличение продуктивности и реализация генетического потенциала бройлеров в полном объеме возможны только при регулярной корректировке условий выращивания, а также при сбалансированном кормлении [5]. Все более актуальным в птицеводческих хозяйствах становится использование биологически активных кормовых добавок, оптимизирующих обмен веществ, для профилактики гиповитаминозов, активации иммунных реакций, что в свою очередь способствует повышению продуктивности и рентабельности предприятия [2].

Частицы металлов в наноформе нашли применение в животноводстве при создании кормовых рационов, обогащенных микроэлементами. Благодаря своим ультрамалым размерам такие частицы гораздо быстрее проникают в организм и начинают действовать более активно. Микроэлементы в форме нанокомпозита менее токсичны и оказывают влияние на все процессы жизнедеятельности организма, состав микробиома кишечника, иммунитет, повышают антиоксидантную активность, улучшают переваримость питательных веществ рационов [1, 6].

Цинк (Zn) – один из важнейших микроэлементов в питании как теплокровных, так холоднокровных животных. Цинк участвует в синтезе белков и нуклеиновых кислот, что важно для роста и восстановления клеток. Он является коферментом для многих ферментов включая антиоксидантные системы. Также цинк необходим для поддержания здоровья кожи и правильного формирования перьев, что улучшает внешний вид птицы и качество продукции. Являясь иммуномодулирующим элементом, цинк стабилизирует микрофлору и создает защитный слой в тонком отделе кишечника, таким образом подавляя воспалительные процессы в организме и пищеварительном тракте [7, 8].

Наночастицы металлов обладают уникальными физическими и химическими свойствами, отличающимися от свойств макроскопических образцов того же вещества. Эти уникальные характеристики делают их объектом активных исследований и применений в различных отраслях. Наночастицы металлов в птицеводстве – это относительно новая область исследований, которая привлекает внимание благодаря потенциальному преимуществу для здоровья птиц, повышению продуктивности и улучшению состояния окружающей среды. В птицеводстве они применяются в нескольких направлениях: для профилактики инфекционных болезней, сорбента различных загрязнителей, для повышения питательных свойств корма, стимуляции роста и усиления иммунной защиты [9]. Однако необходимо отметить, что использование наночастиц металлов может иметь и негативные последствия, так как излишнее применение или неправильно выбранная концентрация могут оказывать токсический эффект [10].

Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования для оценки безопасности и выявления допустимых дозировок для различных кроссов цыплят-бройлеров.

Цель исследований: оценить биологическое действие нанокомпозита Zn-C на рост, морфологические и биохимические показатели крови цыплят-бройлеров.

Методика исследований
Research method

Исследования проведены в условиях кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры ФГБУ ВО «Оренбургский государственный университет» и ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук». В качестве объекта исследований выбраны цыплята-бройлеры кросса «Arbor Acres». Бройлеры породы Арбор (Arbor Acres) – это одна из популярных мясных пород кур, которая была выведена в начале XX в. и которая известна высокой производительностью и хорошими показателями роста. Один из основных плюсов этой породы – высокая эффективность конверсии корма, что позволяет получать больше мяса с меньшими затратами [3]. В возрасте 14 суток методом пар-аналогов были отобраны 24 шт. цыплят-бройлеров и распределены на 4 группы в равных количествах (n = 6). Продолжительность исследований включала в себя подготовительный (7-13-суточного возраста) и основной учетный (14-42-суточного возраста) периоды.

В течение всего периода эксперимента кормление бройлеров опытных и контрольной групп осуществлялось согласно рекомендациям ВНИТИП в соответствии с возрастом. Цыплята до 25 суток получали ростовой рацион ПК-5, с 26 по 42 сутки – финишный рацион ПК-6. Комбикорм ПК-5 и ПК-6 произведен ЗАО «Птицефабрика Оренбургская», г. Оренбург, Россия.

Во время подготовительного периода все цыплята-бройлеры потребляли основной рацион (ОР). Начиная с 14-суточного возраста цыплятам в ОР, включавший стартовый и ростовой рационы, дополнительно вносили нанокомпозиты в различных дозировках. Схема эксперимента представлена на рисунке 1.

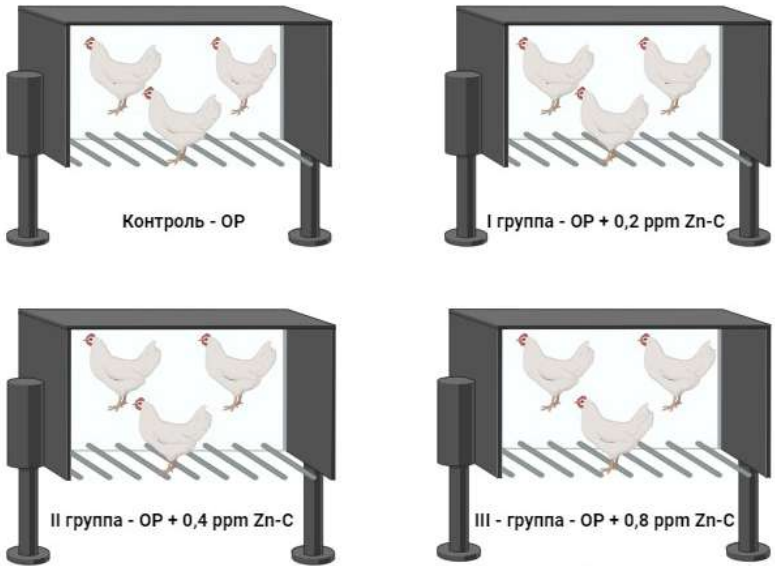

Рис. 1. Схема эксперимента

Figure 1. Experimental design

Дозировка рассчитана с учетом информации от производителя и проводимых ранее исследований [11-13].

Нанокомпозит Zn-C (40-60 нм) представляет собой углеродную матрицу с наночастицами цинка. Нанокомпозит получен плазменно-дуговой технологией синтеза на углеродной матрице в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН. Способ синтеза включает в себя распыление в плазме электрического дугового разряда постоянного тока в атмосфере инертного газа композитного электрода в виде графитового стержня с просверленной полостью, в которую запрессована смесь порошков металла и углерода в виде графита.

В процессе исследований еженедельно выполняли оценку роста и развития цыплят-бройлеров путем индивидуального взвешивания утром до кормления. Отбор крови осуществляли в последний день эксперимента из подкрыльцовой вены. Исследования морфологических и биохимических показателей крови выполнены на автоматическом биохимическом анализаторе DURUI CS-T240 и ветеринарном автоматическом гематологическом анализаторе DF50 Vet.

Статистический анализ был выполнен с помощью программы «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Достоверность различий определяли по t-критерию Стьюдента, при котором статистически значимым считались значения с $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ и P£0,001. Данные представлены в виде M±m, где M – среднее арифметическое значение, m – ошибка средней арифметической величины.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Важными показателями при учете мясной продуктивности птицы являются динамика роста и убойный выход. Чем выше эти показатели, тем выше мясная продуктивность птицы [6]. Бройлеры отличаются значительной скороспелостью. Этот показатель критически важен для многих птицеводов, поскольку напрямую влияет на сроки производства, затраты на корм и общую рентабельность бизнеса [8].

Анализируя данные по динамике роста подопытных бройлеров, установили, что добавление Zn в минимальной дозировке (0,2 ppm) отличалось более высокой интенсивностью роста во время кормления – на 5,4% выше массы птицы контрольной группы. Превосходство живой массы I группы относительно контроля началось на четвертой неделе эксперимента. На первых этапах эксперимента организм птиц может адаптироваться к новым условиям, и лишь спустя некоторое время начинают проявляться положительные эффекты от вмешательства. Это может быть связано с улучшением усвоения питательных веществ или изменениями в обмене веществ, активацией защитных механизмов. Увеличение дозировок нанокомпозита Zn в составе рациона (II и III опытные группы) не оказало ростостимулирующего действия (рис. 2).

Оценка гематологических показателей цыплят-бройлеров является важной частью исследования безопасности кормовых добавок. Морфологические показатели помогают оценить состояние кислородного обмена и общую физиологическую стабильность организма животных [2, 5]. Морфологические показатели цыплят-бройлеров кросса «Arbor Acres» представлены в таблице 2.

При использовании нанокомпозита цинка в рационе цыплят-бройлеров происходило изменение всех гематологических показателей. Так, количество лейкоцитов во всех опытных группах было несколько выше физиологической нормы и выше контроля на 3,6%; 4,66%; 3,39% соответственно, что может свидетельствовать об активации неспецифической защиты организма и реализации противомикробных и антитоксических иммунных реакций [11, 13].

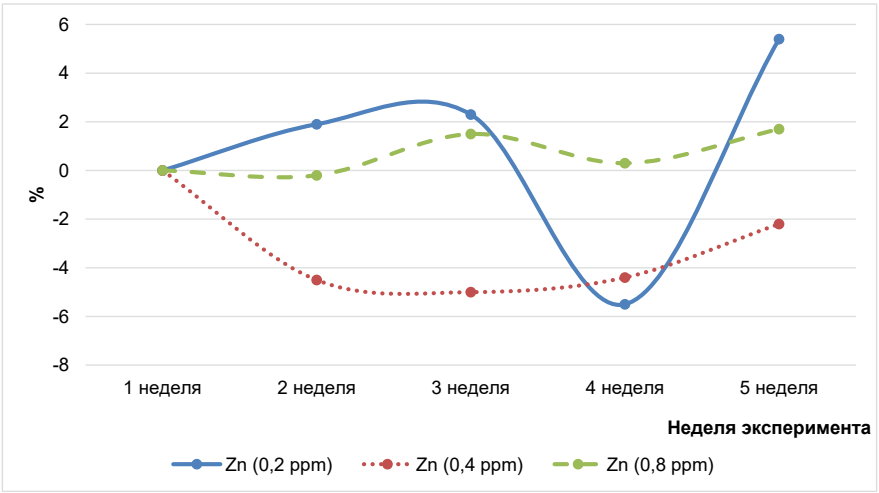

Рис. 2. Разница живой массы птицы с нанокомпозитами Zn по сравнению с контролем, %

Figure 2. Difference in live weight of poultry fed with Zn nanocomposites compared to the control, %

В лейкоцитарной формуле цыплят опытных групп отмечалось заметное увеличение количества лимфоцитов, нейтрофилов и эозинофилов. Вероятно, этот эффект обусловлен иммуномодулирующим воздействием нанокомпозита цинка [14]. Процентное соотношение и количество моноцитов были ниже контроля во всех опытных группах, а процентное соотношение базофилов и количество базофилов – выше контроля только во II группе на 32,5 и 37,5%. Стимуляция иммунологических реакций, а также отсутствие воспалительных процессов в организме цыплят подтверждаются лейкоцитарной формулой [2].

Включение в рацион нанокомпозита цинка сопровождалось снижением количества эритроцитов и гемоглобина. Количество эритроцитов оказалось ниже контроля во всех опытных группах на 6,57%; 7,04%; 2,35%, а гемоглобина – на 2,66%; 1,6% в I и II группах, оставаясь при этом в пределах нормы. Снижение уровня гематокрита относительно контрольных значений в крови бройлеров всех опытных групп свидетельствует об отсутствии анемии у цыплят-бройлеров. Средний объем эритроцита, степень отклонения размера эритроцитов от нормального, разница между самым большим и самым маленьким эритроцитами не имели достоверных отличий от контроля и находились в пределах физиологической нормы во всех опытных группах [13].

Полученные в результате исследований данные указывают на положительные изменения среднего содержания и средней концентрации гемоглобина в эритроците у цыплят-бройлеров, получавших кормовую добавку. Эти показатели были выше во всех группах относительно контроля (на 4,82%; 6,24%; 3,17% и на 278,42%; 283,66%; 262,44% соответственно). Такие значения говорят о развитии компенсаторных механизмов, направленных на улучшение кислородной емкости крови, что важно для интенсивно растущих животных – таких, как бройлеры. Отсутствие патологических нарушений кровообращения также поддерживает вывод о том, что добавка безопасна для применения и может быть полезной для повышения продуктивности птицы [6, 11]. Тромбоциты в I и II группах были выше контроля на 98,51 и 149,25%. Повышенное количество тромбоцитов указывает на активизацию иммунной системы, так как тромбоциты играют важную роль в воспалительных реакциях и защите организма от инфекций. Они участвуют в гемостазе и способны реагировать на повреждения сосудов, что может быть особенно важным для поддержки здоровья птиц, подвергающихся стрессам или потенциальным патогенам [15].

Таблица 2

Морфологические показатели цыплят-бройлеров кросса «Arbor Acres»

Table 2

Morphological characteristics of Arbor Acres broiler chickens

Показатели	Группа			
	К	I	II	III
WBC10^9/1	40,15±3,46	41,6±6,51	42,02±2,26	41,51±4,5
Neu%	35,33±3,12	40,23±3,9	44,97±8,23	38,93±8,14
Lym%	52,87±7,89	50,07±4,2	48,03±9,48	53,43±10,98
Mon%	6,27±5,47	0,73±0,23	0,43±0,15	0,73±0,43
Eos%	5,13±0,78	8,83±0,29*	6,03±1,26	6,67±2,51
Bas%	0,4±0,15	0,13±0,03	0,53±0,12	0,23±0,07
Neu 10^9/l	13,97±0,75	16,63±3,03	19±3,86	16,48±4,29
Lym 10^9/l	21,63±4,56	20,87±3,7	20±3,55	21,73±3,64
Mon 10^9/l	2,18±1,84	0,27±0,06	0,18±0,06	0,3±0,16
Eos 10^9/l	2,11±0,49	3,66±0,57	2,53±0,5	2,84±1,08
Bas 10^9/l	0,16±0,06	0,05±0,01	0,22±0,04	0,09±0,03
RBC10^{12}/1	2,13±0,06	1,99±0,18	1,98±0,05	2,08±0,14
HGB g/l	125,33±5,36	122±10,12	123,33±2,73	125,33±4,33
HCT%	26,7±1,01	24,23±2,14	24,13±0,72	25,93±1,14
MCV fl	125,2±1,43	121,8±0,61	121,77±0,91	125±3,58
MCH pg	58,67±0,96	61,5±0,9	62,33±0,2*	60,53±3,35
MCHC g/l	133,45±132,4	505±4,93	512±3,61	483,67±12,68
RDW-CV%	9,4±0,06	8,93±0,19	8,8±0,12*	8,97±0,29
RDW-SD fl	47,7±0,65	45,1±0,76	44,1±0,36*	46,03±2,26
PLT 10^9/1	0,67±0,33	1,33±0,67	1,67±0,33	0,33±0,33

*P≤0,05; **P≤0,01; ***P≤0,001.

Таким образом, насыщенность эритроцитов гемоглобином у цыплят, получавших кормовую добавку, находилась на высоком уровне, несмотря на снижение их количества. Следовательно, процессы дыхания и насыщения тканей и органов кислородом были активными [16].

Биохимические анализы крови, включая уровни белков, ферментов, глюкозы, липидов, позволяют получить информацию о метаболических процессах и функциональном состоянии разных систем органов. Изменения в этих показателях могут свидетельствовать о токсическом воздействии или о других негативных эффектах исследуемой добавки [7, 9].

Изучение биохимических показателей крови бройлеров является важным инструментом для ветеринаров и специалистов по кормлению. Эти данные помогают оптимизировать здоровье птиц и улучшить их продуктивность, обеспечивая необходимую поддержку для достижения высоких результатов в птицеводстве. Биохимические показатели сыворотки крови характеризуют адаптационные возможности организма [11]. Вводимая добавка способствовала изменению углеводного обмена – в частности, снижению уровня глюкозы (ниже контроля во всех опытных группах на 18,65%; 40,27%; 23,87% соответственно) (рис. 3). В результате активного роста в организме может наблюдаться снижение уровня глюкозы в крови, которая расходуется на метаболические и ферментативные процессы. При такой динамике исключаются также поражение эндокринной системы и стресс [2, 6].

Общий белок зафиксирован ниже контроля во всех группах, получавших нанокомпозит цинка (на 33,38%; 9,62%; 44,5% соответственно) (рис. 4). Альбумин был в пределах нормы, превышение контроля во всех опытных группах одинаковое – на 13,96%. Повышение концентрации альбуминов в сыворотке крови указывает как на активный синтез белков в организме, так и на нормализацию или усиление функциональной активности печени [17].

При биохимическом анализе сыворотки крови цыплят-бройлеров отмечалось усиление активности ферментов аланинаминотрансферазы и аспартатаминотрансферазы. Эти показатели были выше контроля во всех опытных группах (АЛТ на 49,67, 58,18, 14,76%; АСТ на 47,26, 88,82, 50,6% соответственно). Благодаря усилению белоксинтезирующей функции печени в организме опытных цыплят-бройлеров происходило изменение активности трансаминаз. Высокие показатели активности объясняются тем, что обмен веществ у цыплят-бройлеров находится на высоком физиологическом уровне [18]. Аспартатаминотрансфераза считается показателем активности митохондрий в клетках организма. Увеличение активности АСТ в результате воздействия нанокомпозита цинка указывает на более активное использование свободных аминокислот в цикле Кребса, что в свою очередь может свидетельствовать о повышении энергетической интенсивности метаболических процессов [17]. Кроме того, изменение проницаемости клеточных мембран может повлиять также на транспорт нутриентов и метаболитов, чем объясняются изменения в обмене веществ. Если ультрадисперсные частицы влияют на мембранный потенциал или структуры мембран, это может способствовать более эффективному введению аминокислот и других субстратов в клетку, что также будет поддерживать реакции биосинтеза [19].

Во всех опытных группах наблюдалось снижение билирубина относительно контроля (на 27,57; 73,3; 47,92%) (рис. 5), что свидетельствует о нормальном билирубиновом обмене [2].

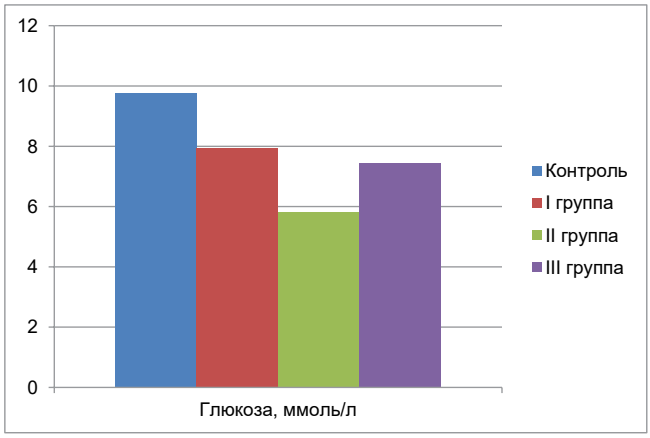

Рис. 3. Уровень глюкозы в крови цыплят-бройлеров

Figure 3. Glucose level in the blood of broiler chickens

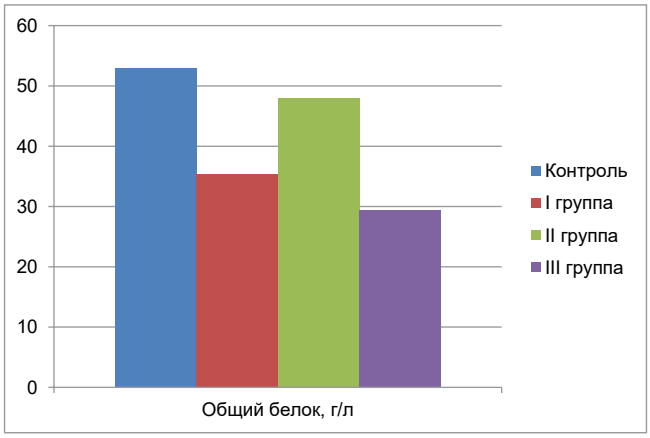

Рис. 4. Общий белок в крови цыплят-бройлеров

Figure 4. Total protein in the blood of broiler chickens

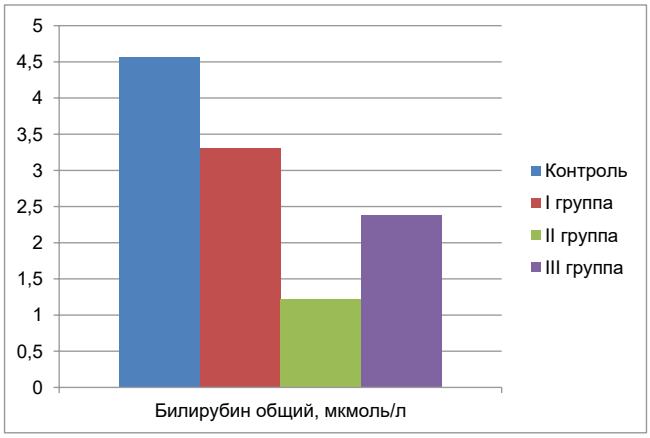

Рис. 5. Билирубин в крови цыплят-бройлеров

Figure 5. Bilirubin in the blood of broiler chickens

Холестерин и триглицериды во всех опытных группах были в пределах нормы, отклонение от контрольной группы незначительное. Холестерин является важным компонентом клеточных мембран и может варьировать в зависимости от типа корма, генетики, возраста и общего состояния здоровья птицы. Триглицериды служат основным способом хранения энергии в организме. Они образуются из свободных жирных кислот и глицерина, а их уровень в крови зависит от питания, энергетического баланса и интенсивности обмена веществ. Концентрации холестерина и триглицеридов в сыворотке крови могут служить важными индикаторами липидного обмена у цыплят-бройлеров и их общего метаболического состояния. Повышение триглицеридов часто коррелирует с интенсивным ростом, указывая на эффективное использование энергетических ресурсов [2].

Мочевина и креатинин превышали физиологическую норму только в III группе. В этой же группе зафиксировано наибольшее превышение данных показателей относительно контрольной группы на 184,29 и 35,32%. При активном белковом откорме птицы наблюдается повышение уровня мочевины в крови. Когда птицы получают корма с высоким содержанием белка, происходит повышение аминокислот в организме. Эти аминокислоты используются для синтеза белков, необходимых для роста и других физиологических процессов. Излишние аминокислоты преобразуются в печени в аммоний и мочевину, которая затем циркулирует в крови и выводится из организма.

Таким образом, при высоком белковом питании уровень мочевины в крови может повышаться по причине увеличения продукции мочевины в ответ на избыточный белок [9, 13]. Мочевая кислота оказалась ниже контроля во всех опытных группах на 32,86; 45,8 и 27,3%. У цыплят-бройлеров опытных групп при активном росте выведение почками креатинина и мочевины происходило интенсивно. Возможно, сказался также токсический эффект на значении уровня мочевины и креатинина. Если уровень мочевой кислоты в плазме крови снижается, то большее количество аминокислот используется для синтеза белков, а не превращается в азотистые отходы – такие, как мочевая кислота. Птицы более эффективно усваивают белки из корма и используют их для построения мышечной массы и других жизненно важных процессов, что приводит к увеличению производительности бройлеров [17, 20].

Минеральный обмен у бройлеров – это важный аспект их питания и общего здоровья, который включает в себя способы усвоения, распределения и использования минералов в организме птиц. Минералы необходимы для многих физиологических функций включая формирование костей, синтез белков, поддержание водно-солевого баланса и функционирование клеток. Обеспечение бройлеров сбалансированным рационом, содержащим необходимые минералы в правильных пропорциях, имеет ключевое значение для их здоровья, роста и продуктивности. Оптимальный минеральный обмен способствует не только росту птиц, но и повышению их устойчивости к болезням и улучшению качества конечного продукта [1, 13]. Кальций и фосфор во всех опытных группах были в пределах физиологической нормы, но относительно контроля происходило снижение кальция во всех опытных группах. Только в I группе наблюдалось повышение фосфора относительно контроля на 8,91%.

Выводы

Conclusions

Цинк, входящий в группу эссенциальных элементов, принимает участие в процессах кроветворения, обновления клеток, синтезе ферментов, способствует антиоксидантной защите организма, необходим для формирования оперения и скорлупы, влияет на обмен веществ и развитие организма [4, 8, 12].

Включение более низких концентраций нанокомпозита цинка в наших исследованиях способствовало большей биодоступности цинка и лучшему ростостимулирующему эффекту. В наноформе интенсивность высвобождения металлов ниже в сравнении с ионными формами, что дает основание рассматривать нанокомпозиты металлов как более выгодную альтернативу минеральным солям [13, 19].

Применение нанокомпозита цинка в рационе цыплят-бройлеров демонстрировало положительное влияние на гематологические показатели, что связано с множеством факторов, способствующих улучшению здоровья и продуктивности этих птиц. Зафиксированы увеличение количества нейтрофилов, эозинофилов и лимфоцитов, увеличение содержания и концентрации гемоглобина в эритроцитах, снижение уровня глюкозы, повышение альбуминов, усиление активности ферментов, а также снижение концентрации билирубина, триглицеридов. Улучшение этих показателей говорит о позитивном влиянии добавления данного компонента в рацион птиц, что может привести к улучшению их роста, здоровья и продуктивности. Исследования в этой области необходимо продолжать для получения дополнительных данных о механизмах действия и долгосрочных эффектах использования нанокомпозитов в птицеводстве.

Список источников

1. Мустафина А.С., Мустафин Р.З. Влияние различных доз диоксида кремния на концентрацию органических кислот и микроэлементов в печени цыплят-бройлеров // *Животноводство и кормопроизводство*. 2022. Т. 105, № 1. С. 119–129. https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-119

2. Мусабаева Л.Л., Сизова Е.А., Лутковская Я.В., Иванищева А.П. Морфобиохимические показатели крови цыплят-бройлеров при применении кремнийсодержащей кормовой добавки // *Животноводство и кормопроизводство*. 2022. Т. 105, № 2. С. 95–106. https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-2-95

3. Сулейманова Г.В., Донкова Н.В. Возрастная динамика морфобиохимических показателей крови цыплят-бройлеров кросса «Арбор Айкрез» // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 12 (177). С. 199–204. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-12-199-204

4. Луговая И.С., Петрова Ю.В. Влияние витаминно-минеральных добавок на здоровье бройлеров // *Птицеводство*. 2016. № 7. С. 24–26. EDN: WICJNF

5. Дмитриев Н.О., Салаутин В.В., Пудовкин Н.А., Терентьева Е.Ю. Морфобиохимические показатели крови при применении добавки «Reasil® Humic Health» // *Аграрный научный журнал*. 2023. № 1. С. 77–80. https://doi.org/10.28983/asj.y2023i1pp77-80

6. Курилкина М.Я., Холодилина Т.Н., Муслюмова Д.М., Завьялова О.А. и др. Влияние препаратов высокодисперсных металлов на морфологические и биохимические показатели цыплят-бройлеров // *Животноводство и кормопроизводство*. 2018. Т. 101, № 3. С. 93–99. EDN: YLJONF

7. Мирошников С.А., Сизова Е.А. Наноматериалы в животноводстве (обзор) // *Вестник мясного скотоводства.* 2017. Т. 3, № 99. С. 7–22. EDN: ZJSLDD

8. Нечитайло К.С., Сизова Е.А., Рязанцева К.В., Кван О.В. Влияние ферментной добавки в сочетании с цинком в ультрадисперсной форме на продуктивные показатели цыплят-бройлеров // *Международный вестник ветеринарии*. 2023. № 4. С. 197–205. https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.4.197

9. Сизова Е.А., Нечитайло К.С., Иванищева А.П., Рябов Н.И. Перспективность использования ультрадисперсной формы металлов в кормлении животных // *Животноводство и кормопроизводство*. 2020. Т. 103, № 3. С. 177–189. https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-177

10. Лебедева Т.И., Красочко И.А., Красочко П.А. Влияние ветеринарных препаратов на основе наночастиц микроэлементов на здоровье животных и качество продукции // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2021. № 2 (54). С. 73–79. https://doi.org/10.35694/YARCX.2021.54.2.012

11. Нечитайло К.С., Сизова Е.А., Полякова В.С., Мустафина А.С. и др. Влияние фитобиотического экстракта в сочетании с ферментной добавкой и ультрадисперсными частицами цинка на морфобиохимические показатели цыплят-бройлеров // *Животноводство и кормопроизводство*. 2023. Т. 106, № 4. С. 121–134. https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-121

12. Севостьянова О.И., Шахова В.Н., Киреев И.В., Кастарнова Е.С. Влияние кормовых добавок на основе различных форм цинка на эффективность птицеводства // *Ветеринария и кормление*. 2024. № 3. С. 105–108. https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-3-20

13. Сизова Е.А., Мирошников С.А., Лебедев С.В., Левахин Ю.И. и др. Сравнительные испытания ультрадисперсного сплава, солей и органических форм Cu и Zn как источников микроэлементов в кормлении цыплят-бройлеров // *Сельскохозяйственная биология*. 2018. Т. 53, № 2. С. 393–403. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.2.393rus

14. Hidayat C., Wina E., Sumiati, Jayanegara A. Effect of zinc addition on the immune response and production performance of broilers: a meta-analysis. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2020;33(3):465-479. https://doi.org/10.5713/ajas.19.0146

15. Dinani O.P., Tyagi P.K., Tyagi J.S., Bhanja S.K. et al. Effect of feeding rice gluten meal with and without enzymes on hematobiochemical profile of broiler chickens. *Veterinary World*. 2020;13(10):2062-2069. https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2062-2069

16. Abang F.B.P., Anoh K.U., Izuki E.D., Nsa E.E. et al. Productive performance and hematological indices of broiler chicks fed biodegraded cassava root. *Online J Anim Feed Res*. 2023;13(4):274-278. https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.41

17. Ryazanov V., Duskaev G., Sheida E., Nurzhanov B. et al. Rumen fermentation, methane concentration, and blood metabolites of cattle receiving dieteticalphytobiotic and cobalt (II) chloride. *Veterinary World*. 2022;15(11):2551-2557. https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.2551-2557

18. Basit M.A., Abdul Kadir A., Loh T., Abdul Aziz S. et al. Effect of inclusion of different doses of Persicariaodorata leaf meal (POLM) in broiler chicken feed on biochemical and haematological blood indicators and liver histomorphological changes. *Animals*. 2020;10(7):1209. https://doi.org/10.3390/ani10071209

19. Rahimi G., Mohammad K.Sh., Zarei M., Shokoohi M. et al. Zinc oxide nanoparticles synthesized using *Hyssopus Officinalis* L. Extract Induced oxidative stress and changes the expression of key genes involved in inflammatory and antioxidant Systems. *Biological Research*. 2022;55:24. https://doi.org/10.1186/s40659-022-00392-4

20. Chodkowska K.A., Abramowicz-Pindor P.A., Tuśnio A., Gawin K. et al. Effect of phytobioticcomposition on production parameters, oxidative stress markers and myokine levels in blood and pectoral muscle of broiler chickens. *Animals*. 2022;12(19):2625. https://doi.org/10.3390/ani12192625

References

1. Mustafina A.S., Mustafin R.Z. The effect of different doses of silicon dioxide on the concentration of organic acids and trace elements in liver of broiler

chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;105(1):119-129. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-119

2. Musabaeva L.L., Sizova E.A., Lutkovskaya Ya.V., Ivanischeva A.P. Morphobiochemical parameters of blood of broilers using a silicon-containing feed additive. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(2):95-106. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-2-95

3. Suleimanova G.V., Donkova N.V. Age dynamics of blood morpho-biochemical indicators in cross "Arbor Aykrez" broiler chicken. *Bulletin of KSAU*. 2021;(12(177)):199-204. (In Russ.) https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-12-199-204

4. Lugovaya I.S., Petrova Yu.V. Influence of vitamin and mineral additives on broiler health. *Ptitsevodstvo.* 2016;(7):24-26. (In Russ.)

5. Dmitriev N.O., Salautin V.V., Pudovkin N.A., Terentyeva E.Yu. Morphobiochemical parameters of broiler blood when using the Reasil® Humic Health supplement. *The Agrarian Scientific Journal.* 2023;(1):77-80. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2023i1pp77-80

6. Kurilkina M.Ya., Kholodilina T.N, Muslyumova D.M., Zavyalov O.A. et al. Effect of highly dispersed metals on morphological and biochemical characteristics of broiler chickens' blood. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2018;101(3):93-99. (In Russ.)

7. Miroshnikov S.A., Sizova E.A. Nanomaterials in animal husbandry (review). *Vestnik myasnogo skotovodstva.* 2017;(3(99)):7-22. (In Russ.)

8. Nechitailo K.S., Sizova E.A., Ryazantseva K.V., Kvan O.V. Influence of enzyme additive in combination with zinc in ultra-fine form on productive indicators of broiler chickens. *International Bulletin of Veterinary Medicine.* 2023;(4):197-205. (In Russ.) https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.4.197

9. Sizova E.A., Nechitaylo K.S., Ivanishcheva A.P., Ryabov N.I. The prospects of using ultra-dispersed forms of metals in animal feeding. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):177-189. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-177

10. Lebedeva T.I., Krasochko I.A., Krasochko P.A. Effects of veterinary preparations based on microelement nanoparticles on animal health and product quality. *Vestnik APK Verkhnevolzhya.* 2021;(2(54)):73-79. (In Russ.) https://doi.org/10.35694/YARCX.2021.54.2.012

11. Nechitaylo K.S., Sizova E.A., Polyakova V.S., Mustafina A.S. et al. The influence of a phytobiotic extract in combination with an enzyme additive and ultrafine zinc particles on the morphobiochemical parameters of the blood of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):121-134. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-121

12. Sevostyanova O.I., Shakhova V.N., Kireev I.V., Kastarnova E.S. The effect of feed additives from different forms of zinc on the poultry effectiveness. *Veterinaria i Kormlenie.* 2024;(3):105-108. (In Russ.) https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-3-20

13. Sizova E.A., Miroshnikov S.A., Lebedev S.V., Levakhin Yu.I. et al. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. *Agricultural Biology.* 2018;53(2):393-403. (In Russ.) https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.2.393rus

14. Hidayat C., Wina E., Sumiati, Jayanegara A. Effect of zinc addition on the immune response and production performance of broilers: a meta-analysis. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2020;33(3):465-479. https://doi.org/10.5713/ajas.19.0146

15. Dinani O.P., Tyagi P.K., Tyagi J.S., Bhanja S.K. et al. Effect of feeding rice gluten meal with and without enzymes on hematobiochemical

profile of broiler chickens. *Veterinary World*. 2020;13(10):2062-2069. https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2062-2069

16. Abang F.B.P., Anoh K.U., Izuki E.D., Nsa E.E. et al. Productive performance and hematological indices of broiler chicks fed biodegraded cassava root. *Online J Anim Feed Res*. 2023;13(4):274-278. https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.41

17. Ryazanov V., Duskaev G., Sheida E., Nurzhanov B. et al. Rumen fermentation, methane concentration, and blood metabolites of cattle receiving dieteticalphytobiotic and cobalt (II) chloride. *Veterinary World*. 2022;15(11):2551-2557. https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.2551-2557

18. Basit M.A., Abdul Kadir A., Loh T., Abdul Aziz S. et al. Effect of inclusion of different doses of Persicariaodorata leaf meal (POLM) in broiler chicken feed on biochemical and haematological blood indicators and liver histomorphological changes. *Animals.* 2020;10(7):1209. https://doi.org/10.3390/ani10071209

19. Rahimi G., Mohammad K.Sh., Zarei M., Shokoohi M. et al. Zinc oxide nanoparticles synthesized using *Hyssopus Officinalis* L. Extract Induced oxidative stress and changes the expression of key genes involved in inflammatory and antioxidant Systems. *Biological Research*. 2022;55:24. https://doi.org/10.1186/s40659-022-00392-4

20. Chodkowska K.A., Abramowicz-Pindor P.A., Tuśnio A., Gawin K. et al. Effect of phytobioticcomposition on production parameters, oxidative stress markers and myokine levels in blood and pectoral muscle of broiler chickens. *Animals*. 2022;12(19):2625. https://doi.org/10.3390/ani12192625

Сведения об авторах

Килякова Юлия Владимировна, канд. биол. наук, доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко»; 460018, Российская Федерация, Оренбургская область, г. Оренбург, пр-кт Победы, 13; e-mail: fish-ka06@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-2385-264X

Мирошникова Елена Петровна, д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко»; 460018, Российская Федерация, Оренбургская область, г. Оренбург, пр-кт Победы, 13; e-mail: elenaakva@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0003-3804-5151

Аринжанов Азамат Ерсаинович, канд. с.-х. наук, доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко»; 460018, Российская Федерация, Оренбургская область, г. Оренбург, пр-кт Победы, 13; e-mail: arin.azamat@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-6534-7118

Мингазова Марина Сергеевна, ассистент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко»; 460018, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-кт Победы, 13; аспирант 2 года обучения Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; 460000, Российская Федерация, Оренбургская область, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29; e-mail: zueva@ms-98.ru; https://orcid.org/0000-0002-2818-1312

Information about the authors

Yuliya V. Kilyakova, CSc (Bio) Associate Professor at the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko; 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation; e-mail: fish-ka06@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-2385-264X

Elena P. Miroshnikova, DSc(Bio), Professor; Head of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko; 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation; e-mail: elenaakva@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0003-3804-5151

Azamat E. Arinzhanov, CSc (Ag), Associate Professor at the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko; 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation; e-mail: arin.azamat@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-6534-7118

Marina S. Mingazova, Assistant at the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko; 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation; postgraduate student, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies RAS; 29 9-ogo Janvarya St., Orenburg, 460000, Russian Federation; e-mail: zueva@ms-98.ru; https://orcid.org/0000-0002-2818-1312

Научная статья
УДК 636.082/33.13
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-138-146

ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

Эффективность скрещивания маток эдильбаевской породы с баранами-производителями породы дорпер

Дмитрий Владимирович Николаев[1]✉, Иван Федорович Горлов[1], Марина Ивановна Сложенкина[1], Мария Александровна Квашнина[1], Аёна Юсупжановна Юлдашбаева[2], Тарам Амхатович Магомадов[2]

[1]Поволжский НИИ производства и переработки мясомолочной продукции, Волгоград, Россия
[2]Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** dmitriynikolaev1978@yandex.ru

Аннотация
Овцеводство занимает важное место в сфере животноводства России. Благодаря неприхотливости овец в содержании и кормлении, а также возможности получения разнообразной продукции данная отрасль играет важную роль в обеспечении продовольственной безопасности страны. Решение важной проблемы продовольственной безопасности страны напрямую связано с увеличением внутреннего производства животноводческой продукции, и особенно мяса, в том числе баранины. Одним из путей эффективного увеличения производства баранины является участие в технологии выращивания специализированных мясных пород, в том числе иностранной селекции, породы дорпер. Исследования проводились на баранчиках чистопородной эдильбаевской породы и их сверстниках (с кровностью ½ эдильбаевской породы и ½ породы дорпер), а также с кровностью ¼ эдильбаевской породы и ¾ породы дорпер. Изучено влияние межпородного скрещивания овец эдильбаевской породы с породой дорпер, с разной кровностью, на рост и развитие молодняка. Помеси первого поколения (с долей крови баранов дорпер) значительно превосходили по массе, темпам роста и убойным показателям своих чистопородных сверстников эдильбаевской породы на всех этапах исследований. При увеличении доли крови баранов дорпер у помесей положительный эффект гетерозиса ослабевал.

Ключевые слова
овцы, скрещивание, живая масса, мясная продуктивность, рост и развитие, порода, помеси

Благодарности
Работа выполнена в рамках Гранта РНФ и Волгоградской области № 25–26–20139.

Для цитирования
Николаев Д.В., Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Квашнина М.А. и др. Эффективность скрещивания маток эдильбаевской породы с баранами-производителями породы дорпер // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 138–146.

Efficiency of crossbreeding Edilbaev ewes with Dorper rams

Dmitriy V. Nikolaev[1]✉, Ivan F. Gorlov[1], Marina I. Slozhenkina[1], Maria A. Kvashnina[1], Aena Yu. Yuldashbaeva[2], Taram A. Magomadov[2]

[1]Povolzhsky Research Institute of Meat and Dairy Production and Processing, Volgograd, Russia
[2]Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agriculrural Academy, Moscow, Russia

✉**Corresponding author:** dmitriynikolaev1978@yandex.ru

Abstract
Sheep farming occupies an important place in the livestock sector of Russia. Due to the low maintenance and feeding requirements of sheep, as well as the potential for producing a wide variety of products, this industry plays a significant role in ensuring the country's food security. The issue of national food security is a crucial task, the solution of which is directly linked to increasing domestic production of livestock products, particularly meat, including mutton. One effective way to increase mutton production is to expand the use of specialised meat breeds, including foreign-bred Dorper rams. The research was conducted on purebred Edilbaev rams and their peers with different blood fractions: half-bred (½ Edilbaev and ½ Dorper) and one-quarter-bred (¼ Edilbaev and ¾ Dorper). The study examined the effect of crossbreeding Edilbaev ewes with Dorper rams at varying blood fractions on the growth and development of young animals. First-generation crossbreds (with a proportion of Dorper blood) significantly outperformed their purebred Edilbaev counterparts in weight, growth rate, and slaughter performance at all stages of the study. However, as the proportion of Dorper blood increased in crossbreeds, the positive heterosis effect weakened.

Keywords
sheep, crossbreeding, live weight, meat productivity, growth and development, breed, crossbreeds

Acknowledgments
This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Government of Volgograd Region No. 25–26–20139.

For citation
Nikolaev D.V., Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Kvashnina M.A. et al. Efficiency of crossbreeding Edilbaev ewes with Dorper rams. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):138–146.

Введение
Introduction

Овцеводство оказывает значительное влияние на развитие сельских территорий, обеспечивая рабочие места, создавая экономический стимул для занятости, а также играя важную роль в сохранении экологического баланса и функционировании агроландшафтов. Однако в постсоветский период отрасль столкнулась с серьезными трудностями и трансформациями, что затронуло как структуру производства, так и рынки сбыта, генетические ресурсы и социально-экономические основы функционирования отрасли.

На сегодняшний день особую важность и актуальность приобретает проблема продовольственной безопасности страны, решение которой напрямую связано

с увеличением внутреннего производства животноводческой продукции, и особенно мяса, в том числе баранины [1, 2].

Большую роль в решении продовольственной проблемы населения играет овцеводство. По мнению А.И. Ерохина, Х.А. Амерханова и многих других исследователей, увеличение производства баранины является важной задачей в сохранении сырьевой безопасности России.

В Волгоградской области имеется одна из наиболее крупных пород овец на территории России – эдильбаевская порода мясо-сального направления продуктивности. Эта порода овец широко распространена на территории Южного Федерального округа и хорошо адаптирована к данным природно-климатическим условиям, что вызывает необходимость изучения возможности увеличения производства получаемой от нее баранины [3, 4].

Одним из путей эффективного увеличения производства баранины является повышение участия в технологии выращивания специализированных мясных пород, в том числе иностранной селекции – например, породы дорпер [5-7].

Животные породы дорпер характеризуются довольно крепкой конституцией, обладают отменным здоровьем, высокой адаптационной способностью, но вместе с этим они являются бесшерстными. Порода дорпер – мясная порода овец, убойный выход мяса которых достигает 50-58%. Животные породы дорпер обладают высокой плодовитостью: от 150 до 225 ягнят на 100 маток [7-9].

Современные исследования в области овцеводства демонстрируют, что грамотно организованное промышленное скрещивание позволяет увеличить и улучшить основные показатели мясной продуктивности. В связи с вышеизложенным исследования возможности увеличения производства баранины за счет скрещивания маток эдильбаевской породы с баранами-производителями породы дорпер являются весьма перспективными и интересными.

Цель исследований: изучить влияние межпородного скрещивания овец эдильбаевской породы с породой дорпер на рост и развитие молодняка.

Методика исследований

Research method

Экспериментальная часть работы по скрещиванию, получению помесного молодняка, изучению зоотехнических и биологических показателей мясной продуктивности и биологической ценности баранины у баранчиков разного происхождения выполнена в условиях фермерского хозяйства А.В. Мирошкина «Подворье» Михайловского района Волгоградской области.

Лабораторные исследования проводили в лабораториях ЦКП РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции».

В качестве подопытных животных были отобраны 3 группы баранчиков (по 15 гол. в каждой): в группу I вошли баранчики чистопородной эдильбаевской породы (контрольная группа); в группу II – их сверстники (с кровностью ½ эдильбаевской породы и ½ породы дорпер); в группу III вошли баранчики с кровностью ¼ эдильбаевской породы и ¾ породы дорпер.

По результатам зоотехнического учета установлено, что участвующие в эксперименте животные были индивидуально взвешены в следующие периоды: при рождении; в возрасте 3 и 5 месяцев. Для расчета абсолютного и среднесуточного приростов использовали общепринятые методики.

Для контрольного убоя баранчиков было отобрано по 3 гол. типичных животных из каждой группы по методике ВИЖ 1978 г.

Достоверность полученных результатов определяли по методу Н.А. Плохинского (1970) с помощью пакета программ Excel при трех уровнях вероятности (P≥0,95*; 0,99** и 0,999***).

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Известно, что промышленное скрещивание позволяет получать высокопродуктивных гибридов первого поколения, которые превосходят обоих своих родителей по ряду признаков (эффект гетерозиса) [10]. Однако продолжение вливания крови другой породы может не оказать дальнейшего положительного влияния.

В связи с вышеизложенным возникла необходимость изучения роста и развития молодняка овец разной кровности по породе дорпер.

Взвешивание баранчиков при рождении показало, что животные подопытных групп отличались незначительно и недостоверно в пользу помесных животных (табл. 1).

Оценивая результаты (табл. 1), видим, что живая масса при рождении у животных II группы превосходит массу своих сверстников I (контрольной) и III групп на 0,14 кг, или на 2,57%, и 0,66 кг, или на 12,0%, соответственно. Вместе с тем животные I группы превосходят сверстников III группы на 0,52 кг, или на 9,79%.

Высокая скорость роста отразилась и на динамике среднесуточных приростов по каждому изучаемому животному. Баранчики II группы превосходят сверстников I и III групп по среднесуточному приросту в возрасте 3 месяцев на 37,49 г, или на 9,09% (P≥0,95), и на 50,74 г, или 12,31% (P≥0,95), соответственно. Необходимо отметить, что чистопородные животные I группы превосходили своих помесных сверстников из III группы на 13,26 г, или на 3,54%, хотя разница была недостоверной. Эта же тенденция отмечается и при расчете среднесуточных приростов от 3- до 5-месячного возраста. Баранчики II группы превосходили сверстников I и III групп по среднесуточным приростам живой массы на 25,11 г, или на 23,94% (P≥0,99), и на 9,78 г, или на 9,32%, соответственно. Между тем баранчики I группы превосходили сверстников III группы на 15,33 г, или на 16,12% (P≥0,95).

Таблица 1

Живая масса и среднесуточный прирост подопытного молодняка (n = 15)

Table 1

Live weight and average daily weight gain of experimental young animals (n=15)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Живая масса при рождении, кг	5,31±0,18	5,45±0,21	4,79±0,24
Среднесуточный прирост от рождения до 3 месяцев, г	374,59±11,22	412,07±11,35*	361,33±11,45
Среднесуточный прирост от 3- до 5-месячного возраста, г	95,11±4,52	104,89±4,45**	79,78±4,59*

Примечание: P≥0,95*; 0,99** и 0,999***.

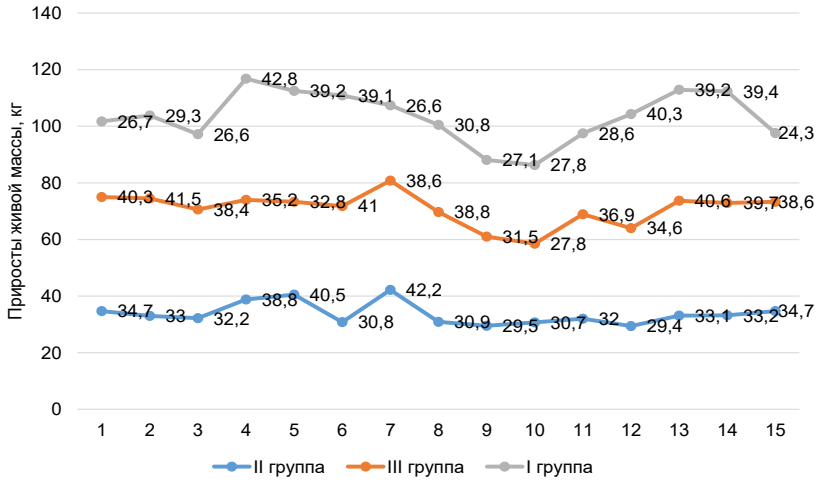

Рис. 1. Абсолютный прирост живой массы подопытных баранчиков в возрасте 3 месяцев, кг (n = 15)

Figure 1. Absolute weight gains of experimental rams at the age of three months, kg (n=15)

Показатели абсолютного прироста в 3-месячном возрасте по изучаемым группам представлены на рисунке 1. Как следует из данных рисунка, изучаемые животные по группам имели довольно существенные различия. В среднем по абсолютному приросту живой массы в 3-месячном возрасте баранчики II (33,71) и III групп (37,09 кг) превосходили сверстников I группы (32,52 кг) на 1,19 кг, или на 3,54%, и на 4,57 кг, или на 12,31% (P≥0,95), соответственно.

При выращивании подопытного молодняка до 5-месячного возраста баранчики II и III групп превосходили своих чистопородных сверстников из I группы по абсолютному приросту (рис. 2).

Из результатов, представленных на рисунке 2, следует, что баранчики II группы превосходили сверстников I и III групп по абсолютному приросту на 0,58 кг, или на 9,22% (P≥0,95), и на 1,50 кг, или на 23,85% (P≥0,99), соответственно. Вместе с тем животные III группы превосходили сверстников I группы на 0,92 кг, или на 16,11% (P≥0,95).

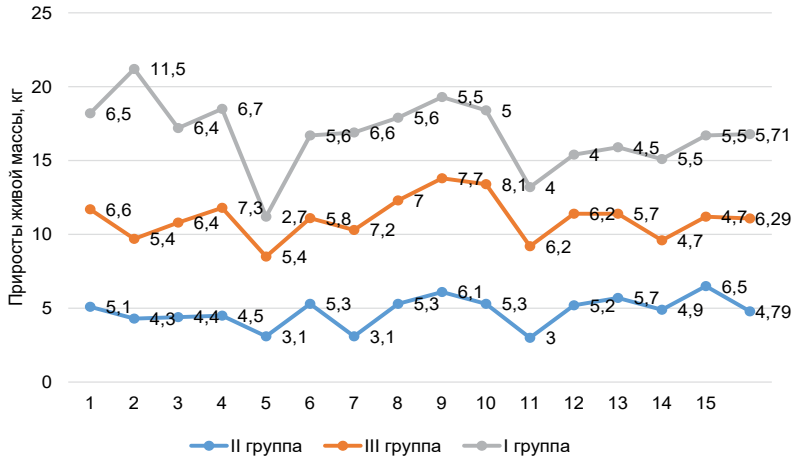

Рис. 2. Абсолютный прирост живой массы баранчиков от 3- до 5-месячного возраста

Figure 2. Absolute weight gains of rams from 3 to 5 months of age

Для установления наиболее полной картины мясной продуктивности изучаемых животных был осуществлен контрольный убой баранчиков в возрасте 5 месяцев (табл. 2).

Из данных, представленных в таблице 2, следует, что животные II и III групп превосходят сверстников I группы по предубойной массе на 5,28 кг, или на 11,32%, и на 0,47 кг, или на 0,47%; по массе парной туши – на 3,03 кг, или на 12,82%, и на 0,30 кг, или на 1,43%; по массе парной туши без курдюка – на 3,20 кг, или на 14,06%, и на 0,08 кг, или на 0,41%; по массе внутреннего жира – на 0,05 и 0,02 кг; по убойной массе – на 2,84 кг, или на 11,96%, и на 0,30 кг, или на 1,41%; по убойному выходу – на 0,39 и 0,17% соответственно.

Таблица 2

Результаты контрольного убоя подопытных баранчиков в возрасте 5 месяцев (n = 3)

Table 2

Results of the control slaughter of experimental rams at the age of five months (n=3)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Предубойная живая масса, кг	41,37±0,24	46,65±0,31***	41,84±0,26
Масса парной туши, кг	20,6±0,26	23,63±0,29**	20,9±0,28
Масса парной туши без курдюка, кг	19,56±0,15	22,76±0,17*	19,64±0,18
Масса внутреннего жира, кг	0,44±0,08	0,49±0,11	0,42±0,09
Убойная масса, кг	20,9±0,31	23,74±0,33**	21,2±0,39
Убойный выход, %	50,50±0,02	50,89±0,04	50,67±0,03

Примечание: P≥0,95*; 0,99** и 0,999***.

Выводы
Conclusions

Таким образом, в ходе эксперимента, в котором скрещивали овцематок эдильбаевской породы с баранами породы дорпер, выяснилось, что помеси первого поколения (с долей дорперской крови) значительно превосходили по массе и темпам роста своих чистопородных сверстников эдильбаевской породы на всех этапах исследований. Это касалось и убойных показателей. Такое превосходство объясняется скорее всего гетерозисом – явлением, когда помеси демонстрируют лучшие характеристики, чем их родители. Однако когда доля дорперской крови в последующих поколениях увеличивалась, темпы роста гибридных баранов снижались. Мы предполагаем, что это связано с повышенной требовательностью породы дорпер к условиям содержания и качеству кормов по сравнению с неприхотливой эдильбаевской породой. Эксперимент проводился, на наш взгляд, в условиях, оптимальных для эдильбаевской породы, но неполностью соответствующих потребностям овец породы

дорпер. Поэтому при увеличении доли дорперской крови у помесей положительный эффект гетерозиса ослабевал по причине недостаточного обеспечения животных необходимыми ресурсами.

Список источников

1. Врублевская В.В., Мамаева А.И. Оценка состояния мясного рынка и воспроизводственного процесса в условиях обеспечения продовольственной безопасности // *Статистика и экономика*. 2022. Т. 19, № 6. С. 21–27. https://doi.org/10.21686/2500-3925-2022-6-21-27

2. Косилов В.И., Юлдашбаев Ю.А., Кубатбеков Т.С., Рахимжанова И.Г. и др. Влияние генотипа баранчиков на липидный состав и экологическую безопасность мясной продукции // *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство*: *агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2024. Т. 9, № 4. С. 138–144. https://doi.org/10.52754/16948696_2024-4 (9)-17

3. Жумалдилаев Н.К. Создание высокопродуктивных линий животных в стаде овец едильбаевской породы // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. № 6 (92). С. 330–334. https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-92-6-330-334

4. Юлдашбаев Ю., Косилов В., Никонова Е., Миронова И. и др. Влияние генотипа баранчиков на химический состав длиннейшей мышцы спины // *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство*: *агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2023. № 3. С. 35–41. https://doi.org/10.52754/16948696-2023-3-4

5. Косилов В., Андриенко Д., Никонова Е., Салихов А. Морфологический состав туш молодняка овец казахской курдючной грубошерстной породы // *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство*: *агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2023. № 3. С. 58–65. https://doi.org/10.52754/16948696-2023-3-7

6. Турдубаев Т., Назаркулов К., Абдурасулов А. Рост и развитие баранчиков, полученных при скрещивании баранов мясного дорпера с овцематками отечественных пород // *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство*: *агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2024. № 3 (8). С. 132–141. https://doi.org/10.52754/16948696-2024-3(8)-16

7. Никонова Е.А., Рахимжанова И.А., Ребезов М.Б., Миронова И.В. и др. Эффективность выращивания чистопородных и помесных баранчиков // *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство*: *агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2023. № 4. С. 164–170. https://doi.org/10.52754/16948696-2023-4-24

8. Погодаев В.А., Сергеева Н.В., Юлдашбаев Ю.А., Ерохин А.И. и др. Хозяйственно-полезные качества и биологические особенности овец, полученных от скрещивания пород калмыцкая курдючная и дорпер в условиях аридной зоны // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2019. № 4. С. 58–76. https://doi.org/10.34677/0021-342-2019-4-58-76

9. Арилов А.Н., Базаев С.О., Юлдашбаев Ю.А., Савчук С.В. Биохимические показатели крови баранчиков породы дорпер при адаптации к условиям Калмыкии // *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2019. № 4. С. 44–46. EDN: ERPMYN.

10. Евдокимов Н.В., Алексеев В.А., Посадский Д.Л., Михайлова О. Промышленные скрещивания овец романовской породы с куйбышевскими и эдильбаевскими // *Вестник Чувашского государственного аграрного университета*. 2023. № 4 (27). С. 89–98. https://doi.org/10.48612/vchtfht-9t1v-1mkh

References

1. Vrublevskaya V.V., Mamaeva A.I. Assessment of the state of the meat market and the reproductive process in terms of ensuring food security. *Statistics and Economics*. 2022;19(6):21-27. (In Russ.) https://doi.org/10.21686/2500-3925-2022-6-21-27

2. Kosilov V.I., Yuldashbaev Yu.A., Kubatbekov T.S., Rakhimzhanova I.G. et al. The effect of the mutton genotype on the lipid composition and environmental safety of meat products. *Journal of Osh State University. Agriculture*: *Agronomy, Veterinary and Zootechnics*. 2024;(4(9)):138-144. (In Russ.) https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_17

3. Zhumaldilaev N.K. Creation of highly productive animal lines in a herd of sheep of the Edilbay breed. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(6(92)):330-334. (In Russ.) https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-92-6-330-334

4. Yuldashbaev Yu., Kosilov V., Nikonova E., Mironova I. et al. The effect of the sheep genotype on the chemical composition of the longest back muscle. *Journal of Osh State University. Agriculture*: *Agronomy, Veterinary and Zootechnics.* 2023;(3):35-41. (In Russ.) https://doi.org/10.52754/16948696_2023_3_4

5. Kosilov V., Andrienko D., Nikonova E., Salikhov A. Morphological composition of carcasses of young sheep of the kazakh short-tailed rough-haired breed. *Journal of Osh State University. Agriculture*: *Agronomy, Veterinary and Zootechnics.* 2023;(3):58-65. (In Russ.) https://doi.org/10.52754/16948696_2023_3_7

6. Turdubaev T., Nazarkulov K., Abdurasulov A. The growth and development of sheep obtained by crossing meat Dorper sheep with sheep of domestic breeds. *Journal of Osh State University. Agriculture*: *Agronomy, Veterinary and Zootechnics.* 2024;(3(8)):132-141. (In Russ.) https://doi.org/10.52754/16948696_2024_3(8)_16

7. Nikonova E.A., Rakhimzhanova I.A., Rebezov M.B., Mironova I.V. et al. The effectiveness of growing purebred and crossbred sheep. *Journal of Osh State University. Agriculture*: *Agronomy, Veterinary and Zootechnics.* 2023;(4):164-170. (In Russ.) https://doi.org/10.52754/16948696_2023_4_24

8. Pogodayev V.A., Sergeyeva N.V., Yuldashbaev Yu.A., Erokhin A.I. et al. Economically valuable qualities and biological peculiarities of sheep obtained from crossing the Kalmykian and the Dorper breeds under the conditions of the arid zone of Kalmykia. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2019;(4):58-76. (In Russ.) https://doi.org/10.34677/0021-342-2019-4-58-76

9. Arilov A.N., Bazaev S.O., Yuldashbaev Yu.A., Savchuk S.V. Biochemical blood parameters of Dorper rams during adaptation to the conditions of Kalmykia. *Ovtsy, kozy, sherstyanoe delo*. 2019;(4):44-46. (In Russ.)

10. Evdokimov N.V., Alekseev V.A., Posadsky D.L., Mikhailova O. Industrial crossing of Romanov sheep with Kuibyshev and Edilbaev sheep. *Vestnik Chuvash State Agrarian University.* 2023;(4(27)):89-98. (In Russ.) https://doi.org/10.48612/vchtfht-9t1v-1mkh

Сведения об авторах

Николаев Дмитрий Владимирович, д-р с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции»; 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Рокоссовского, 6; e-mail: dmitriynikolaev1978@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-9283-5299

Горлов Иван Федорович, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель, ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции»; 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Рокоссовского, 6; e-mail: niimmp@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8683-8159

Сложенкина Марина Ивановна, д-р биол. наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор, ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции»; 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Рокоссовского, 6; e-mail: niimmp@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9542-5893

Квашнина Мария Александровна, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции»; 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Рокоссовского, 6; e-mail: ma.kvashnina@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0009-5465-6906

Юлдашбаева Аёна Юсупжановна, аспирант, Институт зоотехнии и биологии, 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: aenaiuldashbaeva@mail.ru

Магомадов Тарам Амхатович, д-р с.-х. наук, профессор, Институт зоотехнии и биологии, 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: zootehnya@mail.ru

Information about the authors

Dmitriy V. Nikolaev, DSc (Ag), Leading Research Associate, Povolzhsky Research Institute of Meat and Dairy Production and Processing; 6 Rokossovskogo St., Volgograd, 400131, Russian Federation; e-mail: dmitriynikolaev1978@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-9283-5299

Ivan F. Gorlov, DSc (Ag), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director, Povolzhsky Research Institute of Meat and Dairy Production and Processing; 6 Rokossovskogo St., Volgograd, 400131, Russian Federation; e-mail: niimmp@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8683-8159

Marina I. Slozhenkina, DSc (Bio), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Povolzhsky Research Institute of Meat and Dairy Production and Processing; 6 Rokossovskogo St., Volgograd, 400131, Russian Federation; e-mail: niimmp@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9542-5893

Maria A. Kvashnina, Senior Research Associate, Povolzhsky Research Institute of Meat and Dairy Production and Processing; 6 Rokossovskogo St., Volgograd, 400131, Russian Federation; e-mail: ma.kvashnina@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0009-5465-6906

Aena Yu. Yuldashbaeva, postgraduate student, Institute of Animal Science and Biology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agriculrural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: aenaiuldashbaeva@mail.ru

Taram A. Magomadov, DSc (Ag), Professor, Institute of Animal Science and Biology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agriculrural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: zootehnya@mail.ru

Научная статья
УДК 636.2.084.523.087.72/.73
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-147-157

ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

Продуктивность и метаболические процессы ремонтных телок при скармливании органического хрома разных концентраций

Магомед Газиевич Чабаев, Инна Петровна Новгородова✉

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», п. Дубровицы, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** novg-inna2005@yandex.ru

Аннотация
Оптимизация системы кормления ремонтного молодняка представляет собой определяющий фактор, влияющий на последующую продуктивность животных. Целью исследований явилось установление оптимальной нормы кормления органическим хромом для молодняка крупного рогатого скота в возрасте 6–9 месяцев. Опыт проводился на базе ОАО «Предприятие ”Емельяновка”» (Московская область, Озерский р-н). Были сформированы три группы животных: 1-я группа (контроль) получала основной рацион (ОР), 2-я опытная группа – ОР + 3,75 мг/гол. в сутки неорганического хрома, 3-я опытная группа – ОР + 2,81 мг/гол. в сутки неорганического хрома. По достижении 9-месячного возраста показатели живой массы телок 2-й и 3-й опытных групп превысили результаты контрольной группы на 4,9 и 4,6% соответственно. Среднесуточный прирост в опытных группах достиг 1470,4 и 1493,2 г, превысив показатели контроля на 12,20 и 13,95%. Потребление энергии на 1 кг прироста было ниже в опытных группах на 8,3 и 9,8%. Также была отмечена положительная динамика морфологических и биохимических показателей крови в этих группах. На основании полученных данных установлено, что оптимальной суточной нормой введения органического хрома в рацион молодняка крупного рогатого скота в возрасте 6–9 месяцев является 2,81 мг/гол. в сутки.

Ключевые слова
ремонтный молодняк крупного рогатого скота, органический хром, живая масса, среднесуточный прирост, экономическая эффективность

Благодарности
Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке фундаментальных научных исследований Минобрнауки РФ № 124020200032–4 (FGGN №-2024–0016).

Для цитирования
Чабаев М.Г., Новгородова И.П. Продуктивность и метаболические процессы ремонтных телок при скармливании органического хрома разных концентраций // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 147–157.

Productivity and metabolic processes of replacement heifers when fed organic chromium at different concentrations

Magomed G. Chabaev, Inna P. Novgorodova✉

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry,
Dubrovitsy, Russia

✉ **Corresponding author:** novg-inna2005@yandex.ru

Abstract
Optimization of the feeding system of repair young animals is a determining factor affecting the subsequent productivity of animals. The study aimed to establish the optimal rate of organic chromium feeding for young cattle aged 6–9 months. The experiment was conducted on the basis of JSC Enterprise Yemelyanovka (Moscow region, Ozersk district). Three groups of animals were formed: group 1 (control) received the basic ration (BD), experimental group 2 received BD + 3.75 mg/head per day of inorganic chromium, and experimental group 3 received BD + 2.81 mg/head per day of inorganic chromium. Upon reaching the age of 9 months, the live weight indicators of heifers of the 2 nd and 3 rd experimental groups exceeded the results of the control group by 4.9% and 4.6%, respectively. The average daily increase in the experimental groups reached 1470.4 g and 1493.2 g, exceeding the control indicators by 12.20% and 13.95%. Energy consumption per 1 kg of gain was lower in the experimental groups by 8.3% and 9.8%. The positive dynamics of morphological and biochemical blood parameters in these groups was also noted. Based on the data obtained, it was found that the optimal daily intake of organic chromium in the diet of young cattle aged 6–9 months is 2.81 mg/head per day.

Keywords
replacement young cattle, organic chromium, live weight, average daily gain, economic efficiency

Acknowledgments
The work was carried out within the framework of the state assignment with financial support from fundamental scientific research of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 124020200032–4 (FGGN №-2024–0016).

For citation
Chabaev M.G., Novgorodova I.P. Productivity and metabolic processes of replacement heifers when fed organic chromium at different concentrations. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):147–157.

Введение
Introduction

Одним из ключевых факторов, определяющих дальнейшую продуктивность при выращивании ремонтного молодняка крупного рогатого скота, является полноценное сбалансированное кормление, соответствующее нормам [1, 2]. Особое внимание следует уделять качеству кормов. При нормировании питании для различных половозрастных групп животных и птицы учитывается наличие макро- и микроэлементов.

Среди микроэлементов наибольшее значение при кормлении имеют кобальт, йод, марганец, железо, цинк, селен, хром [3-5].

Известно, что микроэлементы играют важную роль в организме сельскохозяйственных животных. Они не только способствуют их росту и внутриклеточному метаболизму, но и принимают участие в важнейших процессах: дыхании, размножении, всасывании, синтезе, расходовании и выделении продуктов обмена, кроветворения и многих других. Микроэлементы входят в состав ферментов и многих белков, что способствует эффективной работе щитовидной железы и системы размножения, а также защищает организм от вирусов и бактерий.

Недостаток или дисбаланс микроэлементов в кормовых рационах различных половозрастных групп сельскохозяйственных животных могут привести к снижению их продуктивности, эндемическим расстройствам, метаболическим процессам, и как следствие – к различным заболеваниям. Современные научные исследования углубляют понимание физиологической роли и механизмов действия микроэлементов как в норме, так и при патологических состояниях, что подтверждается работами С.В. Кузнецова с соавт. (2003), Е.В. Шейды с коллегами (2020а, б), О.В. Шошина с исследователями (2022), F.S. Dalolio с сотрудниками (2018) и S. Lebedev с соавт. (2021) [6-11].

Биологическая роль хрома в организме сельскохозяйственных животных и птицы изучена недостаточно. Однако основываясь на данных источников литературы, можно сделать вывод о его жизненно важной роли для животных. Доказано, что включение хрома в рацион животных положительно влияет на обмен энергии. Кроме того, он способствует укреплению иммунитета и повышению устойчивости к стрессовым ситуациям. В результате снижается уровень кортизола в крови, что делает животных менее чувствительными по отношению к стрессам [12].

Хром потенцирует действие инсулина в регулируемых им метаболических процессах. Он повышает чувствительность к инсулину в белковом обмене, стимулируя транспорт аминокислот (глицина, серина, метионина) в ткани и их последующую утилизацию в синтезе белков – например, в миокарде [1]. Параллельно, в присутствии инсулина, хром интенсифицирует утилизацию глюкозы: ускоряет ее окисление в жировой ткани, облегчает трансмембранный транспорт и стимулирует липогенез [1].

До недавнего времени проблема дефицита микроэлементов в рационах различных половозрастных групп сельскохозяйственных животных решалась с помощью минеральных премиксов, которые содержали их неорганические соли. Однако биодоступность микроэлементов из таких соединений остается низкой.

Дефицит микроэлементов в рационах сельскохозяйственных животных компенсировали с помощью неорганических солей в составе минеральных премиксов, в связи с чем и возрастает интерес к использованию органических форм микроэлементов. Их получают путем ферментативного гидролиза растительных белков с последующим образованием хелатных соединений металлов с аминокислотами [13-15]. Эти комплексы, являясь структурными аналогами природных соединений корма, характеризуются высокой биодоступностью и функциональной активностью, что способствует улучшению продуктивных и репродуктивных показателей животных [13-15].

Цель исследований: установление оптимальной нормы ввода органического хрома в рацион для ремонтных телок в возрасте от 6 до 9 месяцев.

Методика исследований
Research method

Научно-хозяйственный эксперимент продолжительностью 92 дня проводился на 30 гол. ремонтных телок черно-пестрой голштинизированной породы с 6 до 9-месячного возраста в условиях ОАО Предприятие «Емельяновка» (АО ОСП АГРО, Московская область, Озерский район, село Емельяновка). Сформированы 3 группы животных (по 10 гол. в каждой) по методу пар-аналогов с учетом возрастных характеристик, живой массы при рождении и на начальном этапе исследований. Условия содержания (параметры микроклимата, плотность размещения) для всех групп соответствовали действующим зоогигиеническим нормативам.

Схема эксперимента: 1-я группа (контроль) получала основной рацион (ОР), 2-я группа (опытная) – ОР + органический хром 3,75 мг/гол. в сутки, 3-я группа (опытная) – ОР + органический хром 2,81 мг/гол. в сутки.

Оценку питательной ценности кормов выполняли в лаборатории химико-аналитических исследований в животноводстве ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. На протяжении эксперимента все группы получали основной рацион, сбалансированный согласно детализированным нормам кормления.

Для мониторинга интенсивности роста молодняка проводили индивидуальное ежемесячное взвешивание. Учет поедаемости кормов осуществляли с 15-дневным интервалом методом взвешивания заданных кормов и их остатков.

По завершении эксперимента были отобраны пробы крови для биохимического анализа. Исследование морфологического и биохимического состава крови проводили в лаборатории биохимических исследований ВИЖ им. Л.К. Эрнста на автоматическом анализаторе ChemWell (Awareness Technology, США).

Статистическую обработку данных выполняли с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) в программе STATISTICA 10 (StatSoft, Inc., 2011). Результаты представлены в формате M ± m (среднее арифметическое ± стандартная ошибка среднего). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$ и $p < 0,01$.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Результаты влияния различных доз органического хрома на показатели роста ремонтных телок в возрасте 6-9 месяцев представлены в таблице 1. Введение в рацион пиколината хрома в дозах 3,75 и 2,81 мг/гол/сутки (2-я и 3-я опытные группы) оказало значимое положительное влияние на живую массу животных. К концу эксперимента (9 месяцев) телки этих групп достигли массы 340,5 и 339,5 кг соответственно, что существенно превысило показатели контрольной группы.

Проведенный эксперимент выявил положительную динамику продуктивных показателей у ремонтных телок, получавших органический хром. К возрасту 9 месяцев значения среднесуточных привесов в опытных группах превосходили на 18,7 и 23,0% (в абсолютных значениях – 215,4 и 265,4 г) результаты животных контрольной группы.

В среднем за весь период проведения опыта среднесуточный прирост составил 1470,4 г (2-я опытная группа) и 1493,2 г (3-я опытная группа), что на 12,2 и 13,9% выше, чем у животных контрольной группы.

Таким образом, ремонтные телки, получавшие органический хром, достоверно превзошли сверстников из контрольной группы как по интенсивности роста (на 4,6-4,9% по конечной живой массе), так и по эффективности конверсии питательных веществ рациона.

Таблица 1

Показатели продуктивности ремонтных телок в возрасте от 6 до 9 месяцев (M ± m)

Table 1

Productivity indicators of repair heifers aged 6 to 9 months (M ± m)

Возраст, мес.	Группа		
	1 контрольная	2 опытная	3 опытная
Живая масса, кг			
6	206,9±5,4	208, 8±8,3	205,3±7,7
7	246,5±5,9	251,3±8,9	244,5±8,6
8	294,5±6,3	304,9±8,6	302,6±9,3
9	324,5±5,1	340,5±7,8	339,5±7,1
% к контролю	**100,0**	**104,9**	**104,6**
Приросты живой массы, кг			
7	39,6	42,5	39,2
8	48,0	53,6	58,1
9	30,0	35,6	36,9
В среднем	**38,2**	**43,9**	**44,7**
Среднесуточные приросты, г			
7	1365,5±47,6	1465,5±105,8	1351,7±98,7
8	1411,7±40,2	1576,5±37,6*	1708,8±80,4**
9	1153,8±32,7	1369,2±49,8**	1419,2±52,4**
В среднем	1310,3	1470,4	1493,2

*p<0,05.
**p<0,01.

Данные, приведенные в таблице 2, свидетельствует о более рациональном использовании кормовых ресурсов ремонтными телками 2-й и 3-й опытных групп. Отмечено снижение расхода энергетических кормовых единиц на 9,2 и 10,6%, а также сырого протеина на 8,3 и 9,8% соответственно на 1 кг прироста живой массы по сравнению с контрольными животными.

Таблица 2

Затраты кормов на 1 кг привеса

Table 2

Feed costs per 1 kg weight gain

Показатели	Группа		
	1 контрольная	2 опытная	3 опытная
ЭКЕ	5,83	5,34	5,27
% к контролю	100,0	109,2	110,6
Сырого протеина, г	740,3	683,8	674,1
% к контролю	100,0	108,3	109,8

Для оценки влияния органического хрома на метаболический статус был выполнен анализ морфологических и биохимических показателей крови (табл. 3).

Включение в рацион органического хрома в дозах 3,75 и 2,81 мг/гол. в сутки оказало положительное влияние на гематологический статус животных. По сравнению с контрольной группой у телок опытных групп отмечено достоверное повышение уровня эритроцитов на 2,4-5,4%, лейкоцитов на 5,9-6,0% и гемоглобина на 3,4-3,9%. Это свидетельствует об улучшении транспортировки кислорода в крови животных и активации иммунной системы.

Увеличение концентрации эритроцитов, лейкоцитов и гемоглобина в крови ремонтного молодняка свидетельствует о том, что скармливаемый микроэлемент (органический хром) оказывал направленное воздействие на улучшение дыхательной функции крови. Это в свою очередь положительно сказалось на усвоении питательных веществ кормов, и как следствие – на повышении продуктивности молодняка крупного рогатого скота.

Согласно данным таблицы 3 применение органического хрома в дозах 3,75 и 2,81 мг/гол. в сутки оказало благоприятное воздействие на белковый метаболизм. Концентрация общего протеина в сыворотке крови во 2-й и 3-й группах превысила показатели контрольной группы, соответственно, на 2,76 и 3,76 г/л (4,3 и 5,8%).

Уровень холестерина в сыворотке крови у телок 2-й и 3-й опытных групп ниже показателей животных в контрольной группе на 7,2 и 3,2%. Полученные значения находятся в пределах физиологической нормы (3,7 ммоль/л) и могут свидетельствовать об улучшении функционального состояния печени.

Содержание холестерина в сыворотке крови у телок опытных групп было ниже значений контрольной группы на 7,2 и 3,2%. Полученные показатели соответствуют физиологической норме (3,7 ммоль/л) и могут отражать улучшение функционального состояния печени.

Уровень билирубина в сыворотке крови достиг 0,67 мкмоль/л во 2-й группе и 0,64 мкмоль/л в 3-й группе, превысив контрольные значения на 17,5 и 12,3% соответственно. Полученные данные могут свидетельствовать об активизации липидного обмена под влиянием органической формы хрома.

Повышение активности аминотрансфераз (АСТ на 2,5-2,9% и АЛТ на 2,8-3,4%) в опытных группах указывает на активизацию метаболических процессов, связанных с аминокислотным обменом и энергетическим гомеостазом.

Таблица 3

Морфологические и биохимические показатели крови ремонтных телят (в среднем по группе, M±m, n = 5)

Table 3

Morphological and biochemical parameters of blood in repair calves (average for the group, M±m, n=5)

Показатели	Группа		
	1 контрольная	2 опытная	3 опытная
Эритроциты, 10^{12}/л	7,99±0,30	9,12±0,46	8,36±0,28
Лейкоциты, 10^{9}/л	9,28±1,63	9,84±0,73	9,83±0,92
Гемоглобин, г/л	116±3,72	120,6±8,27	120,00±3,99
Общий белок, г/л	64,34±1,18	67,10±2,42	68,10±1,39^{+}
Холестерин, ммоль/л	2,66±0,10	2,48±0,29	2,58±0,12
Билирубин общий, мкмоль/л	0,57±0,05	0,67±0,17*	0,64±0,08*
АЛТ, МЕ/л	28,60±1,89	29,32±1,21	29,42±0,44
АСТ, МЕ/л	66,56±4,88	68,84±5,65	68,42±3,85
Креатинин, мкмоль/л	97,00±4,79	105,48±3,84^{+}	106,05±3,22*
Мочевина, ммоль/л	6,06±0,34	6,22±0,34	6,34±0,38
Глюкоза, ммоль/л	4,96±0,11	5,28±0,10	5,36±0,14*$^{+}$
Кальций, ммоль/л	2,49±0,02	2,55±0,03^{+}	2,56±0,03
Фосфор, ммоль/л	3,16±0,04	3,23±0,04	3,23±0,07

*$p<0,05$, достоверно по отношению к контролю $^{+}$ при $p<0,05$.

Косвенным признаком интенсификации обменных процессов в организме ремонтного молодняка крупного рогатого скота является повышенная концентрация креатинина в плазме крови. Исследования показали, что концентрация этого метаболита в сыворотке крови животных из 2-й и 3-й опытных групп превышала контрольные значения на 8,7 и 9,3% соответственно.

Таким образом, повышение уровня креатинина в плазме крови ремонтного молодняка может быть связано с интенсификацией обменных процессов в их организме, а уровня креатинина – с активизацией метаболических процессов.

Содержание мочевины в плазме крови у животных опытных групп увеличилось, соответственно, на 2,6 и 4,6% относительно показателей контрольной группы. Наблюдаемые изменения указывают на интенсификацию белкового обмена и активизацию биосинтетических процессов в организме.

Уровень глюкозы в плазме крови ремонтных телок крупного рогатого скота является важным показателем обеспеченности животных энергией и отражает углеводный обмен в их организме. Концентрация глюкозы в сыворотке крови в опытных группах достоверно превышала показатель в контрольной группе (4,96 ммоль/л) на 6,4 и 8,1% соответственно (табл. 3).

Полученные данные свидетельствует о способности органической формы хрома активировать углеводный обмен и формировать легкодоступные энергетические резервы, обеспечивающие высокую продуктивность молодняка.

Введение хромсодержащей добавки положительно повлияло на минеральный обмен в организме животных. У телок опытных групп зафиксировано повышение уровня кальция в плазме крови на 2,4-2,8% и повышение концентрации неорганического фосфора на 2,2% относительно животных контрольной группы.

Оценка экономической эффективности показала, что применение органического хрома в рационах ремонтных телок обеспечило дополнительный экономический эффект в размере 34,04 и 39,24 руб. на 1 гол. в сутки для 2-й и 3-й опытных групп соответственно.

Выводы
Conclusions

Проведенные исследования позволяют рекомендовать в рацион для ремонтного молодняка крупного рогатого скота 6-9 месяцев к использованию оптимальную норму ввода органического хрома в количестве 2,81 мг/гол. в сутки, обеспечивающую стимуляцию обменных процессов и значительный рост продуктивности.

Список источников

1. Захаров В.М., Максимов В.И. Влияние обменных процессов на продуктивные качества животных // *Зоотехния.* 2021. № 2. С. 25–27. https://doi.org/10.25708/ZT.2021.19.64.007

2. Цис Е.Ю., Дуборезов В.М. Влияние скармливания пребиотической добавки коровам при разном уровне кормления на продуктивность и качество молока // *Вестник КрасГАУ.* 2025. № 7. С. 151–160. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-7-151-160

3. *Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных*: Справочное пособие. 3-е изд. / Под ред. А.П. Калашникова, В.И. Фисинина, В.В. Щеглова, Н.И. Клейменова. Москва, 2003. 456 с.

4. Боголюбова Н.В., Рыков Р.А. Возрастные аспекты биохимических и клинических показателей в организме крупного рогатого скота // *Молочное и мясное скотоводство.* 2023. № 2. С. 45–49. https://doi.org/10.33943/MMS.2023.25.98.009

5. Bailey C.H. Improved meta-analytic methods show no effect of chromium supplements on fasting glucose. *Biol. Trace Elem. Res.* 2014;157(1):1-8. https://doi.org/10.1007/s12011-013-9863-9

6. Кузнецов С.Г., Кузнецов А.С. Микроэлементы в кормлении животных // *Животноводство России.* 2003. № 3. С. 16.

7. Шейда Е.В., Лебедев С.В., Мирошников С.А., Гречкина В.В. и др. Воздействие ультрадисперсных частиц Fe на биохимический статус организма и экзокринную деятельность поджелудочной железы на фоне скармливания белковых рационов при выращивании крупного рогатого скота // *Животноводство и кормопроизводство.* 2020. № 103 (3). С. 190–203. https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-190

8. Шейда Е.В., Лебедев С.В., Мирошников С.А., Гречкина В.В. и др. Изменение активности пищеварительных ферментов панкреатического сока под влиянием ультрадисперсных частиц Cr_2O_3 на фоне скармливания белковых рационов при выращивании крупного рогатого скота // *Животноводство и кормопроизводство.* 2020. № 103 (4). С. 26–36. https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-4-26

9. Шошина О.В., Лебедев С.В., Шейда Е.В., Корнейченко Е.В. Сравнительный анализ влияния различных форм хрома на пищеварительные процессы в рубце телят // *Животноводство и кормопроизводство.* 2022. № 105 (1). С. 31–38. https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-31

10. Dalólio F.S., Albino L.F.T., Silva J.N. et al. Dietary chromium supplementation for heat-stressed broilers. *Worlds Poult. Sci. J.* 2018;74:101-116. https://doi.org/10.1017/S0043933917001064

11. Lebedev S.E., Sheida V.I., Vershinina I. et al. Use of chromium nanoparticles as a protector of digestive enzymes and biochemical parameters for various sources of fat in the diet of calves. *AIMS Agriculture and Food.* 2021;6(1):14-31. https://doi.org/10.3934/agrfood.2021002

12. Кокорев В.А., Федаев А.Н., Гибалкина Н.И. Нормирование хрома в рационах бычков // *Зоотехния.* 2000. № 4. С. 17–19. EDN: ZPZIGZ

13. Клементьев М.И., Чабаев М.Г., Цис Е.Ю., Некрасов Р.В. Влияние различных соединений селена на продуктивность, обменные процессы молодняка крупного рогатого скота // *Аграрная наука.* 2023. № 4. С. 87–93. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-369-4-87-93

14. Мысик А.Т., Клементьев М.И., Некрасов Р.В., Чабаев М.Г. и др. Апробация хелатных соединений селена в рационах свиноматок в условиях производства // *Зоотехния.* 2018. № 3. С. 4–9. EDN: XMGPXV

15. Assis J.R. Chromium in performance and metabolism of dairy cows. *Scientific Electronic Archives.* 2021;14(1):100-107. http://doi.org/10.36560/14120211280

References

1. Zakharov V.M., Maximov V.I. Influence of exchange processes on productive quality of animals. *Journal Zootekhniya.* 2021;(2):25-27. (In Russ.) https://doi.org/10.25708/ZT.2021.19.64.007

2. Tsis E.Yu., Duborezov V.M. Effect of feeding prebiotic supplement to cows at different feeding levels on milk productivity and quality. *Bulletin of KSAU.* 2025;(7):51-160. (In Russ.) https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-7-151-160

3. *Feeding standards and rations for farm animals*: a reference guide. 3rd ed. Kalashnikov A.P., Fisinin V.I, Shheglov V.V., Kleymenov N.I. (Eds). Moscow, Russia: 2003:456. (In Russ.)

4. Bogolyubova N.V., Rykov R.A. Age aspects of biochemical and clinical indicators in the body of cattle. *Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding.* 2023;(2):45-49. (In Russ.) https://doi.org/10.33943/MMS.2023.25.98.009

5. Bailey C.H. Improved meta-analytic methods show no effect of chromium supplements on fasting glucose. *Biol. Trace Elem. Res.* 2014;157(1):1-8. https://doi.org/10.1007/s12011-013-9863-9

6. Kuznetsov S.G., Kuznetsov A.S. Micronutrients in Animal Feeding. *Zhivotnovodstvo Rossii.* 2003;(3):16. (In Russ.)

7. Sheyda E.V., Lebedev S.V., Miroshnikov S.A., Grechkina V.V. et al. Influence of ultrafine fe on biochemical status of organism and exocrine activity of pancreas against the background of feeding with protein diets in raising cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2020a;(103(3)):190-203. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-190

8. Sheyda E.V., Lebedev S.V., Miroshnikov S.A., Grechkina V.V. et al. Changes in the activity of digestive enzymes of pancreatic juice under the influence of ultrafine particles of Cr_2O_3 against the background of feeding with protein diets raising cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2020;(103(4)):26-36. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-4-26

9. Shoshina O.V., Lebedev S.V., Sheyda E.V., Korneychenko V.I. et al. Comparative analysis of the effect of different chromium forms on digestive processes in the rumen of calves. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;(105(1)):31-38. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-31

10. Dalólio F.S., Albino L.F.T., Silva J.N. et al. Dietary chromium supplementation for heat-stressed broilers. *Worlds Poult. Sci. J.* 2018;74:101-116. https://doi.org/10.1017/S0043933917001064

11. Lebedev S.E., Sheida V.I., Vershinina I. et al. Use of chromium nanoparticles as a protector of digestive enzymes and biochemical parameters for various sources of fat in the diet of calves. *AIMS Agriculture and Food.* 2021;6(1):14-31. https://doi.org/10.3934/agrfood.2021002

12. Kokorev V.A., Fedaev A.N., Gibalkina N.I. Chromium norms in bull diets. *Zootechniya.* 2000;(4):17-19. (In Russ.)

13. Klementiev M.I., Chabaev M.G., Tsis E.Yu., Nekrasov R.V. Influence different form of selenium to production and metatabolic process of young cattle. *Agrarian Science.* 2023;4:87-93. (In Russ.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-369-4-87-93

14. Mysik A.T., Klement'ev M.I., Nekrasov R.V., Chabaev M.G. et al. Appobation helates compounds of selenium in sows diets at industrial conditions. *Zootechniya.* 2018;(3):4-9. (In Russ.)

15. Assis J.R. Chromium in performance and metabolism of dairy cows. *Scientific Electronic Archives.* 2021;14(1):100-107. http://doi.org/10.36560/14120211280

Сведения об авторах

Магомед Газиевич Чабаев, д-р с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник, отдел кормления сельскохозяйственных животных, ФГБНУ

«Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста» (ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста); 142132, Российская Федерация, Московская обл., г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60; e-mail: chabaev.m.g-1@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1889-6063

Инна Петровна Новгородова, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, отдел кормления сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста» (ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста); 142132, Российская Федерация, Московская обл., г.о. Подольск, п. Дубровицы, д. 60; e-mail: novg-inna2005@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-4617-1644

Information about the authors

Magomed G. Chabaev, DSc (Ag), Professor, Chief Research Associate at the Department of Feeding Farm Animals, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy Vlg., Podolsk, Moscow Region, 142132, Russian Federation; e-mail: chabaev.m.g-1@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1889-6063

Inna P. Novgorodova, CSc (Bio), Senior Research Associate at the Department of Feeding Farm Animals, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy Vlg., Podolsk, Moscow Region, 142132, Russian Federation; e-mail: novg-inna2005@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-4617-1644

Научная статья
УДК 338.43
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-158-173

ЭКОНОМИКА

Организационно-экономический механизм повышения эффективности хозяйственной деятельности сельскохозяйственных организаций

Тимофей Федорович Ануфриев, Нина Юрьевна Трясцина✉

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

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

Аннотация

В условиях современной государственной политики, ориентированной на укрепление продовольственной безопасности и достижение технологического суверенитета, особое значение приобретает системное устойчивое развитие агропромышленного комплекса. Стратегическими ориентирами выступают наращивание объемов производства сельхозпродукции, реализация импортозамещающих мероприятий посредством применения отечественных образцов техники и оборудования, использование национального семенного фонда и племенных ресурсов, а также интенсификация производства на инновационной технологической основе. Отмеченные обстоятельства обусловливают повышенные требования к эффективности функционирования сельскохозяйственных организаций как базового звена отраслевой структуры. Предложенные в статье методические подходы к формированию организационно-экономического механизма повышения эффективности в контексте совершенствования стратегического управления организациями АПК ориентированы на решение прикладных задач по выявлению и освоению неиспользованных возможностей роста результативности хозяйственной деятельности. С учетом приоритетных направлений развития агропромышленного производства и существенного влияния мер государственного регулирования на экономику сельхозорганизаций авторами осуществлена классификация интересов государства в экономической, социальной и экологической сферах. Разработанная модель организационно-экономического механизма базируется на необходимости согласования внутрихозяйственных задач повышения эффективности с общегосударственными целевыми установками и векторами отраслевого развития. Ключевое место в структуре данного механизма занимает оценочно-мониторинговый блок, формирующий информационно-аналитическую систему обеспечения управления процессами развития агропредприятий. Выполненный контент-анализ существующих научных подходов к оценке эффективности деятельности хозяйствующих субъектов позволил установить целесообразность применения интегральной оценки на базе матричной (динамической) модели с использованием непараметрических методов. Специфика производственных процессов в сельском хозяйстве предполагает выделение двух основных стадий: непосредственно производство продукции и последующие операции по ее первичной переработке, складированию и сбыту. Указанное разделение обосновывает необходимость управленческого функционального анализа и обособленной оценки эффективности производственной и коммерческой деятельности сельскохозяйственной организации. Итоговые данные выполненной оценки позволят научно обосновать приоритетные направления и разработать практические рекомендации по повышению эффективности бизнес-процессов организаций АПК.

Ключевые слова
организационно-экономический механизм, матричная модель, эффективность, оценка, анализ, факторы, индикаторы

Для цитирования
Ануфриев Т.Ф., Трясцина Н.Ю. Организационно-экономический механизм повышения эффективности хозяйственной деятельности сельскохозяйственных организаций // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 158–173.

ECONOMICS

Organizational and economic mechanism for improving the efficiency of economic activities of agricultural companies

Timofey F. Anufriev, Nina Yu. Tryastsina✉

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

✉**Corresponding author:** ntryastsina@rgau-msha.ru

Abstract
In the context of current state policy, focused on stable food security and achieving technological sovereignty, the systemic sustainable development of the agro-industrial sector becomes particularly important. Strategic priorities include increasing agricultural output, implementing import substitution measures through the use of domestically produced machinery and equipment, utilizing the national seed fund and breeding resources, and intensifying production using innovative technologies. These factors impose increased requirements on the efficiency of agricultural companies as the basic element of the sectoral structure. The methodological approaches proposed in the article for developing an organizational and economic mechanism to improve efficiency – in the context of enhancing strategic management of agricultural companies – aim to solve practical tasks of identifying and harnessing untapped opportunities to boost the business performance. Taking into account the priority objectives of developing agro-industrial production and the significant impact of state regulation measures on the economy of agricultural companies, the authors have classified state interests in the economic, social, and environmental spheres. The developed model of the organizational and economic mechanism is based on the need to align internal efficiency improvement objectives with national targets and sectoral development vectors. A key element in this mechanism is the assessment and monitoring block, which forms an information and analytical system to support the management of agribusiness development processes. A content analysis of existing scientific approaches to assessing the performance of economic entities has revealed the feasibility of applying an integral assessment based on a matrix (dynamic) model using non-parametric methods. The specifics of production processes in agriculture suggest two main stages: direct production of agricultural output and subsequent operations related to its primary processing, storage, and marketing. This division justifies the need for a management functional analysis and a separate assessment of the efficiency of an agricultural company's production and commercial activities. The final assessment data will allow for scientifically substantiated identification of priority areas and the development of practical recommendations for improving the efficiency of business processes in agricultural companies.

Keywords
organizational and economic mechanism, matrix model, efficiency, assessment, analysis, factors, indicators

For citation
Anufriev T.F., Tryastsina N.Yu. Organizational and economic mechanism for improving the efficiency of economic activities of agricultural companies. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):159–173.

Введение
Introduction

Факторами национального приоритета по обеспечению устойчивости и динамичности отечественной экономики выступают развитие агропромышленного комплекса и увеличение объемов производства продукции растениеводства и животноводства, что зафиксировано в Указе Президента РФ «О национальных целях…» [1]. Устойчивое развитие АПК определяется стратегической ролью сельского хозяйства, когда в качестве ключевых ориентиров государственной аграрной политики выступают рост эффективности отрасли, охрана земель, достижение полной занятости и повышение уровня жизни сельского населения [2].

Анализ финансовых результатов деятельности сельскохозяйственных организаций показал, что общероссийский уровень рентабельности по прибыли до налогообложения, составивший в 2024 г. 14,7%, недостаточен для расширенного воспроизводства. Следствием этого становится превышение числа закрывающихся хозяйств над вновь открывающимися, рост входных барьеров и сокращение общего количества субъектов рынка. В сегменте малого бизнеса за последние 4 года отмечено ухудшение финансового состояния и увеличение доли убыточных структур; положение средних и крупных предприятий осталось без существенных изменений. На фоне среднероссийских показателей резко выделяется Московская область, где рентабельность в 2024 г. оказалась более чем в 2 раза ниже (6,6%). Еще более драматичной является ситуация с предприятиями, получающими государственную помощь (без учета субсидий): их рентабельность приблизилась к нулю (1%) при среднероссийском уровне 15,2%. Соответственно и доля убыточных организаций в регионе существенно выше общенациональной (38% против 25,1%) [3].

В работе [4] зафиксированы положения о необходимости повышения урожайности сельскохозяйственных культур и продуктивности животных, увеличения производительности труда, снижения потерь и формирования ресурсосберегающих производств в сельском хозяйстве. Это обусловливает актуальность совершенствования организационно-экономического механизма в повышении эффективности хозяйственной деятельности сельскохозяйственных организаций. В связи с этим у сельскохозяйственных организаций возникла объективная потребность в научно обоснованном совершенствовании методического подхода к формированию организационно-экономического механизма повышения эффективности. Данный механизм должен опираться на принятую стратегию развития агропредприятия и при этом учитывать интересы его ключевых стейкхолдеров. Ключевым организационным этапом реализации механизма является стратегический контроллинг, предполагающий мониторинг и оценку эффективности производственно-коммерческой деятельности сельхозпредприятия с целью выработки и принятия оптимальных управленческих решений

Научная новизна исследований заключается в совершенствовании методических подходов к формированию организационно-экономического механизма по повышению эффективности хозяйственной деятельности сельскохозяйственных организаций.

Изучению различных аспектов функционирования организационно-экономических механизмов посвящено большое количество работ как отечественных,

так и зарубежных авторов. Так, теория и методология экономических механизмов развивались в работах таких авторов, как А. Кульман, Л.И. Абалкин, Л. Гурвич, Э. Маскин, Р. Майерсон, А.Н. Семин [5, 6]. Методологические вопросы формирования организационно-экономических механизмов в сельском хозяйстве отражены в работах Л.В. Поповой, Д.А. Коробейникова, О.М. Коробейниковой, В.В. Батмановой, С.А. Аржанцева, С.Л. Писарева, Я.Е. Давыдовой, Е.В. Колязиной [7, 8].

Теоретические основы экономической эффективности заложены и получили развитие в трудах Й.А. Шумпетера, Н.Д. Кондратьева, П. Самуэльсона, У. Нордхауса, А.Д. Шеремета, Р.С. Сайфулина, Е.В. Негашева, Г.В. Савицкой и др. [9]. Методические подходы к оценке эффективности в отрасли сельского хозяйства и факторов, которые оказывают на нее влияние, изложены в трудах И.Г. Ушачева, В.В. Масловой, Х.М. Рахаева, М.Н. Энеевой, А.М. Чочаева, Л.И. Хоружий и др. [10, 11].

В работах указанных авторов не рассматриваются, однако, методические и практические вопросы влияния интересов стейкхолдеров внешней среды на механизм повышения эффективности сельскохозяйственной организации.

Цель исследований: разработка методических подходов и практических рекомендаций к формированию организационно-экономического механизма повышения эффективности хозяйственной деятельности сельскохозяйственных организаций.

Цель исследований достигается путем выполнения следующих задач:

– обобщить методические подходы к формированию организационно-экономического механизма повышения эффективности;

– разработать модель организационно-экономического механизма повышения эффективности сельскохозяйственной организации;

– классифицировать подходы к оценке эффективности сельскохозяйственной организации;

– разработать методику оценки эффективности хозяйственной деятельности сельскохозяйственной организации;

– провести апробацию предложенной методики в сельскохозяйственных организациях Московской области.

Методика исследований
Research method

В процессе исследований использованы такие методы, как монографический, матрично-диагностический анализ, расчетно-конструктивный, системный подходы, коэффициентный анализ.

Информационно-эмпирическую базу исследований составили документы стратегического планирования по развитию национальной экономики и агропромышленного комплекса, официальные данные Федеральной службы государственной статистики, отраслевая отчетность сельскохозяйственных организаций Московской области за 2023-2024 гг.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Понятие «механизм» выступает междисциплинарной концепцией и представляет собой систему, которая позволяет запечатлеть сложные процессы и явления в качестве схемы взаимодействия отдельных элементов (зачастую на основе причинно-следственных связей), упрощая их исследование, описание, воспроизводство [12]. В рамках проведения теоретических и практических разработок по различным

направлениям экономистами было описано большое количество видов экономических механизмов, одним из которых является организационно-экономический механизм. Результаты проведенного исследования сущности данной категории свидетельствуют о том, что существуют два основных подхода к его определению.

В соответствии с первым подходом организационно-экономический механизм следует определить как систему отношений заинтересованных субъектов, сформированную с целью повышения эффективности [7].

В соответствии со вторым подходом в качестве подобного механизма выступает система методов и инструментов, с помощью которых субъекты оказывают регулирующее влияние на хозяйственную деятельность сельскохозяйственных организаций с целью повышения ее эффективности [8].

На уровне сельскохозяйственной организации организационно-экономический механизм повышения эффективности хозяйственной деятельности может быть определен как отношения субъектов стратегического, тактического и операционного уровней управления, направленные на выявление и использование резервов повышения эффективности, а также как система методов и инструментов, служащая достижению той же цели.

Осуществляемая сельхозпредприятиями хозяйственная деятельность и функционирование ее организационно-экономического механизма подвержены влиянию различных факторов внешней среды и затрагивают интересы различных внешних стейкхолдеров, ключевым из которых выступает государство. На основе результатов контент-анализа документов стратегического планирования [1, 2, 4, 13, 14] представим разработанную классификацию экономических, социальных и экологических интересов государства, влияющих на эффективность сельскохозяйственных организаций (табл. 1).

Представленные экономические, социальные и экологические интересы государства задают векторы государственной политики в агропромышленном комплексе и, следовательно, должны учитываться сельскохозяйственными организациями при формировании их стратегий развития. Оценку факторов целесообразно выполнять с использованием PESTEL-анализа и экспертных методов.

Организационно-экономический механизм повышения эффективности выступает в качестве инструмента реализации прямых интересов внутренних стейкхолдеров с оптимальным сочетанием косвенных интересов внешних заинтересованных сторон и поэтому должен быть логично встроен в механизм стратегического управления сельскохозяйственной организации в контексте составляющего его элемента. Организационные этапы функционирования такого механизма в системе адаптивного стратегического управления сельскохозяйственной организацией представлены на рисунке 1.

Стейкхолдеры организации АПК выступают как источники различных факторов внешней среды (финансово-экономических, технико-технологических, социально-демографических, политических, экологических, маркетинговых), которые необходимо идентифицировать, а также оценивать результаты их влияния на эффективность хозяйственной деятельности сельскохозяйственной организации. Классифицированные экономические, социальные и экологические интересы государства (табл. 1) играют ключевую роль при формировании векторов развития сельскохозяйственной отрасли и установлении стратегических целей.

На этапе бизнес-планирования предлагается осуществить декомпозицию целей, определить пути их достижения и требуемые для этого ресурсы, сформировать систему индикаторов для мониторинга и оценки показателей реализации стратегии, а также степени достижения установленного уровня эффективности.

Таблица 1

Классификация интересов государства, влияющих на эффективность сельхозпредприятий [составлено авторами по 1, 2, 4, 13, 14]

Table 1

Classification of state interests influencing the efficiency of agricultural companies [compiled by the authors based on references 1, 2, 4, 13, 14]

Категория	Ключевые интересы государства (как стейкхолдера агропредприятия)
Экономические интересы	Обеспечение продовольственной независимости страны
	Повышение технико-технологической независимости агропромышленного комплекса за счет применения отечественных достижений селекции и генетики, приобретения и использования российской сельскохозяйственной техники и оборудования
	Повышение эффективности производства в сфере сельского хозяйства за счет разработки и внедрения отечественных инновационных технологий и достижений
Социальные интересы	Повышение уровня занятости населения сельских территорий, в том числе в сельскохозяйственных организациях
	Обеспечение достойной заработной платы и условий труда
	Повышение производительности труда в сельском хозяйстве за счет роста человеческого капитала сельских территорий
	Обеспечение высокого качества сельскохозяйственной продукции и ее безопасности для здоровья человека, развитие «зеленого» сельского хозяйства
Экологические интересы	Рациональное землепользование, предотвращение деградации земель и почв сельскохозяйственного назначения
	Эффективное обращение с отходами сельскохозяйственного производства, их утилизация и повторное применение
	Рациональное водопользование в сельском хозяйстве, контроль за чистотой водных ресурсов
	Снижение уровня выбросов парниковых газов при осуществлении сельскохозяйственного производства
	Недопущение посева, выращивания и разведения генно-инженерно-модифицированных организмов, управление инвазионными видами

Стратегический и оперативный контроллинг позволит выявлять возникающие отклонения, чтобы, во-первых, разрабатывать мероприятия по повышению эффективности хозяйственной деятельности, во-вторых, осуществлять при необходимости корректировку принятых стандартов эффективности.

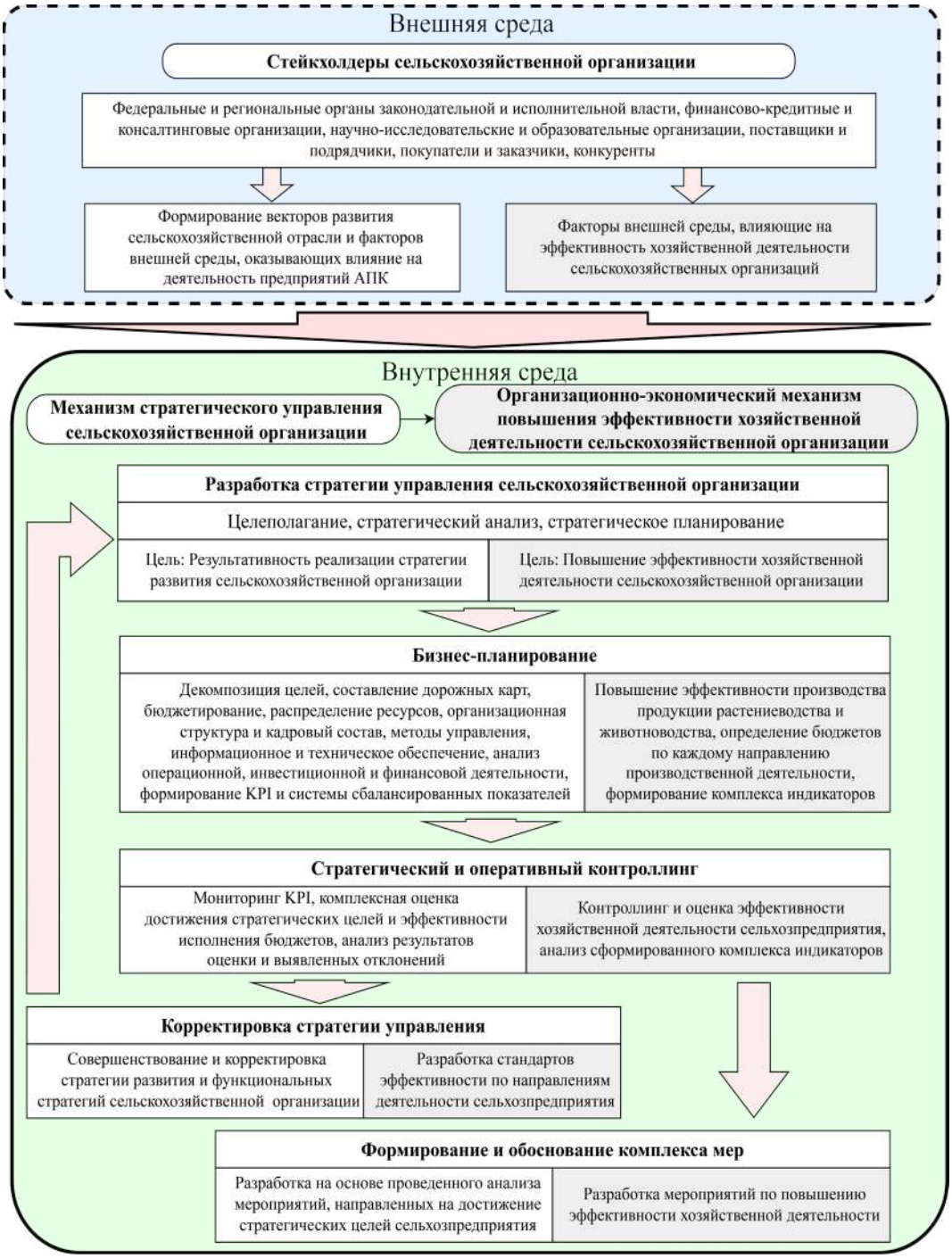

Рис. 1. Организационно-экономический механизм повышения эффективности в системе стратегического управления сельскохозяйственной организацией [составлено авторами]

Figure 1. Organizational and economic mechanism for improving efficiency in the strategic management system of an agricultural company [compiled by the authors]

В рамках данного блока предусматривается разработка процедуры анализа и оценки показателей эффективности. Анализ источников литературы показал, что на текущий момент нет единого подхода к оценке эффективности хозяйственной деятельности аграрных предприятий. В профильных источниках предлагается оценка на основе индивидуальных индикаторов эффективности или их комплекса, включающего в себя показатели урожайности, продуктивности, рентабельности и доходности сельскохозяйственного производства [10]. Другие авторы полагают, что оценка должна проводиться на основе интегрального подхода, подразумевающего расчет единого показателя эффективности [11].

Установлено, что применение интегрального подхода является наиболее целесообразным вследствие возможности системного учета различных факторов, отражающих особенности сельскохозяйственного производства, и универсальности обобщающего критерия эффективности. Представляется методологически оправданным при формировании системы показателей эффективности деятельности агропредприятия учитывать невысокий уровень товарности сельскохозяйственного производства в силу естественного внутрихозяйственного потребления продукции. В связи с этим предлагаем разделять производственную и коммерческую эффективность основных бизнес-процессов и проводить их оценку по каждому виду сельскохозяйственной продукции. Так, на рисунке 2 представлены области мониторинга и оценки эффективности хозяйственной деятельности в растениеводстве.

Рис. 2. Области мониторинга и оценки эффективности сельскохозяйственной организации в отрасли растениеводства [составлено авторами]

Figure 2. Areas of monitoring and efficiency assessment of an agricultural company in the crop production sector [compiled by the authors]

Выращенная продукция в отрасли растениеводства не реализуется в полном объеме – часть потребляется на внутренние нужды сельскохозяйственной организации, другая часть направляется на хранение для продажи в следующий отчетный период. Таким образом, целесообразным представляется расчет показателей прогнозируемой выручки и прибыли на основе данных о валовых сборах растениеводческой продукции и о средних реализационных ценах с учетом типа и качества сельхозпродукции:

$$ПВ = ВП \cdot Ц, \quad (1)$$

где ПВ – прогнозируемая выручка; ВП – валовый сбор продукции в натуральном выражении; Ц – средняя цена, по которой можно реализовать произведенную продукцию в текущем периоде.

$$ПП = ПВ - З, \quad (2)$$

где ПП – прогнозируемая прибыль; ПВ – прогнозируемая выручка; З – общая величина производственных затрат.

Рассмотрим методику оценки эффективности производства картофеля в одной из сельскохозяйственных организаций Московской области на основе матричной (динамической) модели. Первым этапом является отбор ключевых показателей, характеризующих состояние выбранного для анализа и оценки направления деятельности сельскохозяйственной организации. Отобранные показатели следует отразить в матрице в последовательности – от результатов к ресурсам (табл. 2): прогнозируемая прибыль (ПП), прогнозируемый доход за вычетом затрат на семена, средства защиты растений и удобрения (Д), прогнозируемая выручка (ПВ), валовый сбор продукции (ВС), площадь убранная (П), затраты на оплату труда (Т). На основе их значений формируются элементы квадратной матрицы C_{ij}, определяемые по формуле:

$$C_{ij} = \frac{B_j}{A_i}, \quad (3)$$

где C_{ij} – элементы матрицы; B_j – значение показателя для j-го столбца; A_i – значение показателя для i-той строки.

Для построения индикаторов и оценки эффективности необходимо формирование двух матричных моделей за текущий и сравниваемый период, на основе которых определяется индексная матрица, отражающая эффективность производства картофеля. Элементы матрицы определяются как индексы элементов текущей и базисной модели эффективности [15]. Результат построения такой матрицы на основе данных одной из сельскохозяйственных организаций Московской области представлен в таблице 3.

В общем виде совокупность частных индексов в матрице (I_{Cij}), расположенных под главной диагональю, образует взаимосвязанную систему индикаторов эффективности растениеводческого сегмента (табл. 4).

Комплексная оценка эффективности деятельности по выбранному направлению деятельности сельскохозяйственной организации выполняется с использованием интегрального показателя эффективности, рассчитываемого по формуле [15]:

$$I_{и} = \frac{2\sum_i \sum_j Ic_{ij}}{n^2 - n}, \quad (4)$$

где $I_{и}$ – интегральный индикатор матричной модели оценки эффективности; $2\sum_i \sum_j Ic_{ij}$ – удвоенная сумма всех частных индикаторов матрицы, расположенных под главной диагональю; n – число выбранных показателей матрицы.

Таблица 2

Матричная модель оценки эффективности производства картофеля в сельскохозяйственной организации [составлено авторами]

Table 2

Matrix model for assessing the efficiency of potato production in an agricultural company [compiled by the authors]

Bj / Ai	Прогнозируе-мая прибыль (ПП)	Прогнозируе-мый доход за вычетом затрат на семена, СЗР и удобрения (Д)	Прогнозируе-мая выручка (ПВ)	Валовый сбор (ВС)	Площадь убранная (П)	Затраты на оплату труда (Т)
ПП	1					
Д	ПП/Д = С12	1				
ПВ	ПП/ПВ = С13	Д/ПВ = С23	1			
ВС	ПП/ВС = С14	Д/ВС = С24	ПВ/ВС = С34	1		
П	ПП/П = С15	Д/П = С25	ПВ/П = С35	ВС/П = С45	1	
Т	ПП/Т = С16	Д/Т = С26	ПВ/Т = С36	ВС/ Т = С46	П/Т = С56	1

Таблица 3

Целевые элементы индексной матрицы эффективности производства картофеля в выбранной сельскохозяйственной организации Московской области в 2024 г. по сравнению с 2023 г. [расчеты авторов]

Table 3

Target elements of the index matrix for potato production efficiency in the selected agricultural company of the Moscow Region in 2024 compared to 2023 [the authors' calculations]

Bj / Ai	Прогнозируемая прибыль от продажи картофеля (ПП)	Прогнозируемый доход за вычетом затрат на семена, СЗР и удобрения (Д)	Прогнозируемая выручка от продажи картофеля (ПВ)	Валовый сбор картофеля (ВС)	Убранная площадь (П)	Затраты на оплату труда работникам, занятым на выращивании картофеля (Т)
ПП	1					
Д	0,63	1				
ПВ	0,48	0,76	1			
ВС	0,52	0,82	1,08	1		
П	0,38	0,60	0,78	0,73	1	
Т	0,25	0,40	0,52	0,49	0,67	1

В качестве порогового значения интегрального индикатора устанавливается величина, равная 1. Случай, когда $I_и > 1$, свидетельствует о росте эффективности производства и реализации картофеля. Если $I_и < 1$, то это указывает на снижение эффективности. Конкретное значение интегрального индикатора указывает на величину изменения уровня эффективности (снижение или увеличение), выраженную в процентах.

В результате расчетов было определено, что величина интегрального показателя составила 0,61. Отсюда следует вывод о снижении эффективности производства картофеля в сельскохозяйственной организации в 2024 г. по сравнению с 2023 г. на 39%.

Оценку коммерческой эффективности предлагаем также выполнять на основе построения матричной модели. В данном случае источниками информации выступают данные учета, отражающие объемы реализованной продукции и полученной выручки, себестоимость продаж, величина коммерческих и управленческих расходов. В таком случае матрица оценки эффективности реализации сельскохозяйственной организацией в текущем периоде будет иметь вид, представленный в таблице 5.

В результате расчетов на основе учетных данных за 2023 и 2024 гг. были определены индивидуальные индикаторы коммерческой эффективности (табл. 6).

Частные индикаторы коммерческой эффективности, представленные в таблице 6, можно использовать при выращивании любого вида растениеводческой продукции (табл. 7).

По результатам выполненной оценки следует сделать вывод о снижении коммерческой эффективности реализации картофеля в сельскохозяйственной организации. Величина интегрального показателя составила 0,89 и обусловлена большой долей коммерческих и управленческих расходов в общей величине затрат. Однако следует отметить увеличение индикаторов рентабельности С23 и С24 и доходности С34, что указывает на повышение возможностей организации по самофинансированию текущей деятельности.

Таблица 4

Частные индикаторы матричной модели эффективности растениеводства в сельскохозяйственной организации [составлено авторами]

Table 4

Particular indicators of the matrix model for potato production efficiency in an agricultural company [compiled by the authors]

№ группы	Название индикатора	Элементы матричной модели
1 группа	Индикаторы прогнозируемой рентабельности растениеводческой продукции	С13, С14, С16, С23, С24, С25
2 группа	Индикаторы прогнозируемой доходности растениеводства	С34, С35
3 группа	Индикаторы эффективности использования ресурсов в растениеводстве	С15, С25, С46, С56
4 группа	Индикатор влияния производственных затрат, за исключением затрат на семена, СЗР и удобрения, на величину прогнозируемой прибыли в растениеводстве	С12
5 группа	Индикатор прогнозируемой отдачи затрат на оплату труда	С36
6 группа	Индикатор урожайности сельскохозяйственной культуры	С45

Таблица 5

Матричная модель оценки коммерческой эффективности реализации картофеля собственного производства [составлено авторами]

Table 5

Matrix model for assessing the commercial efficiency of selling home-grown potatoes [compiled by the authors]

Bj / **Ai**	Прибыль от продаж (П)	Валовая прибыль (вП)	Выручка (В)	Реализовано продукции в натуральном выражении (РП)
П	1			
вП	П/вП = С12	1		
В	П/В = С13	вП/В = С23	1	
РП	П/РП = С14	вП/РП = С24	В/РП = С34	1

Таблица 6

Целевые элементы индексной матрицы коммерческой эффективности реализации картофеля в выбранной сельскохозяйственной организации Московской области в 2024 г. по сравнению с 2023 г. [расчеты авторов]

Table 6

Target elements of the index matrix of commercial efficiency of potatoes in the selected agricultural company of the Moscow region in 2024 compared to 2023 [authors' calculations]

Bj / **Ai**	Прибыль от продажи картофеля (П)	Валовая прибыль в картофелеводстве (вП)	Выручка от продажи картофеля (В)	Объем реализации картофеля в натуральном выражении (РП)
П	1			
ВП	0,42	1		
В	0,55	1,31	1	
РП	0,59	1,41	1,08	1

Эффективность хозяйственной деятельности сельскохозяйственной организации зависит от рентабельности производства продукции растениеводства и животноводства. Материальные затраты, составляющие значительную долю себестоимости продукции, требуют системного контроля с целью минимизации неэффективного расходования ресурсов. Особое внимание следует уделять оптимизации затрат на семена, удобрения, средства защиты растений и корма. Необходимо осуществлять непрерывный мониторинг и оценку их эффективности с точки зрения воздействия

на уровень урожайности сельскохозяйственных культур и продуктивности животных во взаимосвязи с влиянием на величину экономического эффекта. Данный эффект выражается в размере как доходов, полученных в результате реализации продукции сельского хозяйства (за вычетом расходов на перечисленные виды ресурсы), так и общей валовой прибыли и прибыли от продаж по отдельному направлению деятельности организации.

Для получения наиболее объективных данных о способности сельскохозяйственной организации обеспечить устойчивое развитие следует оценивать эффективность реализации продукции независимо от эффективности ее производства. Такой подход позволит выполнить детальную диагностику причин неэффективности и определить, на каком из этапов жизненного цикла сельскохозяйственной продукции происходят отклонения.

Реализация комплексного подхода, который учитывает указанные аспекты, посредством использования организационно-экономического механизма повышения эффективности позволяет выявлять требуемые для этого резервы и задействовать их в рамках хозяйственной деятельности, осуществляемой сельскохозяйственной организацией.

Таблица 7

Частные индикаторы матричной модели коммерческой эффективности растениеводческой продукции сельскохозяйственной организации [составлено авторами]

Table 7

Particular indicators of the matrix model for commercial efficiency of crop products in an agricultural company [compiled by the authors]

№ группы	Название индикатора	Элементы матричной модели
1 группа	Индикаторы рентабельности реализуемой продукции растениеводства	C13, C14, C23, C24
2 группа	Индикаторы доходности реализуемой растениеводческой продукции	C34
4 группа	Индикатор влияния коммерческих и управленческих расходов на прибыльность продажи растениеводческой продукции	C12

Выводы
Conclusions

Предлагаемая модель организационно-экономического механизма повышения эффективности хозяйственной деятельности учитывает классифицированные экономические, социальные и экологические интересы государства в области развития агропромышленного комплекса. Его взаимосвязь с системой стратегического управления сельскохозяйственной организации позволяет учитывать интересы внутренних стейкхолдеров. Таким образом, его функционирование будет не противоречить бизнес-стратегии предприятия, а способствовать ее реализации.

Разработанный методический подход, применяемый в рамках функционирования механизма повышения эффективности, позволяет обособленно выполнять оценку эффективности производственной и коммерческой деятельности в области растениеводства. Достигаемое за счет этого увеличение уровня контроля за объемами потребляемых ресурсов позволит выявлять потенциальные точки роста с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур, уровня ресурсосбережения в процессе производства, производительности труда и рентабельности продукции.

Апробация предлагаемой методики позволила выполнить оценку эффективности производства и реализации картофеля на примере сельскохозяйственного предприятия Московской области, определить направления повышения эффективности, к которым относятся увеличение урожайности картофеля, качества продукции и, соответственно, ее цены, снижение коммерческих и управленческих расходов.

Список источников

1. О национальных целях развития РФ на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента РФ от 7 мая 2024 г. № 309 // *КонсультантПлюс*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_475991/ (дата обращения: 01.03.2026).

2. О развитии сельского хозяйства: Федеральный закон от 29 декабря 2006 г. № 264-ФЗ, ред. от 31 июля 2025 г. // *КонсультантПлюс*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343386/ (дата обращения: 01.03.2026).

3. *Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации*. URL: https://rosstat.gov.ru (дата обращения: 01.03.2026).

4. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 // *КонсультантПлюс*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343386/ (дата обращения: 01.03.2026).

5. Измалков С., Сонин К., Юдкевич М. Теория экономических механизмов (Нобелевская премия по экономике 2007 г.) // *Вопросы экономики*. 2008. № 1. С. 4–26. EDN: JTXFZX

6. Семин А.Н. Научные основы формирования экономических механизмов: формы, типы, виды // *Агропродовольственная политика России*. 2012. № 5. С. 5–12. EDN: PWYUHL

7. Попова Л.В., Коробейников Д.А., Коробейникова О.М., Батманова В.В. Организационно-экономический механизм овощеводства открытого грунта // *Экономика*: *вчера, сегодня, завтра*. 2016. № 7. С. 301–314. EDN: WXMLCT

8. Аржанцев С.А., Писарев С.Л., Давыдова Я.Е., Колязина Е.В. Формирование организационно-экономического механизма агропромышленного комплекса: теоретические аспекты // *Прикладные экономические исследования*. 2017. № 5 (21). С. 9–14. EDN: YPKDJY

9. Савицкая Г.В. Показатели финансовой эффективности предпринимательской деятельности: обоснование и методика расчета // *Экономический анализ*: *теория и практика*. 2012. № 39 (294). С. 14–22. EDN: PDRPXL

10. Рахаев Х.М., Энеева М.Н., Чочаев А.М. Комплексная оценка эффективности сельского хозяйства Северного Кавказа: состояние, проблемы, перспективы // *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2021. № 5 (127). С. 58–66. EDN: IBYDHQ

11. Хоружий Л.И., Трясцина Н.Ю., Закиров Р.Р., Трясцин Н.А. Аналитические инструменты оценки эффективности деятельности агропредприятий в молочном скотоводстве // *Бухучет в сельском хозяйстве*. 2024. № 11. С. 752–762. EDN: FMQOSO

12. Machamer P., Lindley D., Craver C.F. Thinking about Mechanisms. *Philosophy of Science*. 2000;67(1):1-25. https://doi.org/10.1086/392759

13. О Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия: Постановление Правительства РФ от 14 июля 2012 г. № 717 // *КонсультантПлюс*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133795/ (дата обращения: 01.03.2026).

14. Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 8 сентября 2022 г. № 2567-р // *КонсультантПлюс*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_426435/ (дата обращения: 01.03.2026).

15. Tryastsina N.Yu., Khoruzhy L.I., Tryastsin N.A. Integrated assessment of the efficiency of dairy farming in agricultural companies. *AIP Conf. Proc.* 2026;3399(1):050001. https://doi.org/10.1063/5.0318698

References

1. On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the perspective up to 2036: Decree of the President of the Russian Federation dated May 7, 2024 No. 309. *ConsultantPlus*. (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_475991/ (accessed: March 1, 2026).

2. On the development of agriculture: Federal law dated December 29, 2006 No. 264-FZ. *ConsultantPlus*. (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343386/ (accessed: March 1, 2026).

3. *Federal State Statistics Service of the Russian Federation*. (In Russ.) URL: https://rosstat.gov.ru (accessed: March 1, 2026).

4. On the approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated January 21, 2020 No. 20. *ConsultantPlus*. (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343386/ (accessed: March 1, 2026).

5. Izmalkov S., Sonin K., Yudkevich M. Theory of economic mechanisms (Nobel Prize in Economics 2007). *Voprosy Ekonomiki*. 2007;(1):4-26. (In Russ.)

6. Semin A.N. Scientific foundations of the formation of economic mechanisms: forms, types, kinds. *Agro-Food Policy in Russia*. 2012;(5):5-12. (In Russ.)

7. Popova L.V., Korobeinikov D.A., Korobeinikova O.M., Batmanova V.V. An organizational-economic mechanism for vegetable growing in open ground. *Economics*: *Yesterday, Today and Tomorrow*. 2016;(7):301-314. (In Russ.)

8. Arzhantsev S.A., Pisarev S.L., Davydova Ya.E., Kolyazina E.V. Formation of the organizational-economic mechanism of agro-industrial sector: the teoretical aspects. *The Applied Economic Researches Journal*. 2017;(5(21)):9-14. (In Russ.)

9. Savitskaya G.V. Indicators of financial efficiency of entrepreneurial activity: justification and calculation methodology. *Economic Analysis*: *Theory And Practice*. 2012 ;(39(294)):14-22. (In Russ.)

10. Rakhaev H.M., Eneeva M.N., Chochaev A.M. Comprehensive assessment of agricultural efficiency north caucasus: state, problems, prospects. *Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2021;(5(127)):58-66. (In Russ.)

11. Khoruzhy L.I., Tryastsina N.Yu., Zakirov R.R., Tryastsin N.A. Analytical tools for assessing the efficiency of agro-enterprises in dairy cattle farming. *Accounting in Agriculture.* 2024;(11):752-762. (In Russ.)

12. Machamer P., Lindley D., Craver C.F. Thinking about Mechanisms. *Philosophy of Science*. 2000;67(1):1-25. https://doi.org/10.1086/392759

13. On the approval of the State Program for The Development of Agriculture and Regulation of Markets for Agricultural Products, Raw Materials, and Food: Resolution of the Government of the Russian Federation dated July 14, 2012 No. 717. *ConsultantPlus*. (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133795/ (accessed: March 1, 2026).

14. On the approval of the Strategy for the Development of the Agro-Industrial and Fisheries Complexes of the Russian Federation for the period up to 2030: Order of the Government of the Russian Federation dated September 8, 2022 No. 2567-r. *ConsultantPlus*. (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_426435/ (accessed: March 1, 2026).

15. Tryastsina N.Yu., Khoruzhy L.I., Tryastsin N.A. Integrated assessment of the efficiency of dairy farming in agricultural companies. *AIP Conf. Proc.* 2026;3399(1):050001. https://doi.org/10.1063/5.0318698

Сведения об авторах

Ануфриев Тимофей Федорович, аспирант кафедры экономической безопасности и права, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: work12v@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0004-9768-1427

Трясцина Нина Юрьевна, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры экономической безопасности и права, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: ntryastsina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/ 0000-0001-5600-624X

Information about the authors

Timofey F. Anufriev, postgraduate student of the Department of Economic Security and Law, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agriculrural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: work12v@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0004-9768-1427

Nina Yu. Tryastsina, CSc (Econ), Associate Professor at the Department of Economic Security and Law, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: ntryastsina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-5600-624X

Обзорная статья
УДК 338.43:336
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-174-194

ЭКОНОМИКА

Государственная финансовая поддержка сельского хозяйства России: регулирующее воздействие, новые вызовы и целевые ориентиры

Виктор Николаевич Овчинников[1], Виктория Викторовна Зундэ[2]✉, Каринэ Юрьевна Багратуни[2,3]

[1]Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
[2]Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия
[3]Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** Zunde.VV@rea.ru

Аннотация
В статье представлены проанализированные ключевые направления государственной финансовой поддержки сельского хозяйства России в 2019–2025 гг. На основе анализа данных Росстата, результатов реализации отраслевых программ и следования нормативным актам выявлены тренды: рост объемов производства, усиление региональной дифференциации, трансформация инструментов субсидирования, льготного кредитования и агрострахования. Показано, что вектор государственной политики смещается от компенсации текущих издержек к стратегическим инвестициям в технологическую модернизацию, развитие кадрового и научного потенциала аграрной сферы. Особое внимание уделено федеральному проекту «Развитие малого агробизнеса» (с 2026 г.), консолидирующему меры поддержки фермерских и личных подсобных хозяйств. Сформулированы рекомендации по повышению эффективности бюджетных расходов и адаптации механизмов государственной финансовой поддержки сельского хозяйства к региональным условиям.

Ключевые слова
государственная финансовая поддержка, сельское хозяйство, льготное кредитование, агрострахование, грантовая поддержка

Для цитирования
Овчинников В.Н., Зундэ В.В., Багратуни К.Ю. Государственная финансовая поддержка сельского хозяйства России: регулирующее воздействие, новые вызовы и целевые ориентиры // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 174–194.

State financial support for agriculture in Russia: regulatory impact, new challenges, and targets

Viktor N. Ovchinnikov[1], Viktoria V. Zunde[2]✉, Karine Yu. Bagratuni[2,3]

[1]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
[2]Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia
[3]Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

✉**Corresponding author:** Zunde.VV@rea.ru

Abstract
The article analyses the key areas of state financial support for agriculture in Russia in 2019–2025. Based on an analysis of Rosstat data, the outcomes of sectoral programs, and compliance with regulatory acts, the following trends were identified: growth in production volumes, increasing regional differentiation, and transformation of tools for subsidizing, preferential lending, and agricultural insurance. It is shown that the vector of state policy is shifting from compensating current costs towards strategic investments in technological modernization and the development of human and scientific potential in the agricultural sector. Particular attention is paid to the federal project "Development of Small-Scale Agribusiness" (starting in 2026), which consolidates support measures for farm households and private subsidiary plots. Recommendations are formulated to improve the efficiency of budget expenditures and adapt the mechanisms of state financial support for agriculture to regional conditions.

Keywords
state financial support, agriculture, preferential lending, agricultural insurance, grant support

For citation:
Ovchinnikov V.N., Zunde V.V., Bagratuni K.Yu. State financial support for agriculture in Russia: regulatory impact, new challenges, and targets. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):174–194.

Введение
Introduction

Государственная финансовая поддержка агропромышленного комплекса призвана не столько компенсировать текущие издержки, сколько создавать условия для системного наращивания потенциала развития этой жизненно важной сферы экономики страны и устойчивого повышения ее конкурентоспособности. В условиях высокой капиталоемкости, длительных производственных циклов и повышенных природно-климатических рисков именно государство выступает ключевым институтом, обеспечивающим концентрацию ресурсов на приоритетных направлениях: технологическая модернизация, развитие отечественной селекции и семеноводства, обновление машинно-тракторного парка, а также формирование кадрового и научного потенциала данной сферы. Такой подход позволяет не только нивелировать краткосрочные рыночные провалы, но и выстраивать долгосрочную траекторию роста, ориентированную

на технологический суверенитет, расширение экспортных возможностей и укрепление позиций российских сельхозтоваропроизводителей на внутренних и зарубежных рынках.

В современной повестке государственной политики развития сельского хозяйства реализуются решения на нормативно-плановом, стратегическом и тактическом уровнях, а также решения по импортозамещающим проектам, укреплению технологического суверенитета, обеспечению комплексного подхода к росту устойчивости аграрного сектора.

За последние годы стратегия развития российского сельского хозяйства трансформировалась. После успешного импортозамещения в 2014-2022 гг. для его развития настал новый этап технологического перевооружения в целях укрепления своих позиций в формате глобальной конкуренции.

Формирование мер государственной поддержки сельского хозяйства происходит на основе учета и реализации ряда условий: от экономических и политических до социально-технологических. При всем многообразии и изменениях воздействующих факторов главная задача остается неизменной: обеспечить стабильность функционирования сферы, продовольственную независимость и конкурентоспособность отечественных сельхозпроизводителей.

К числу наиболее результативных инструментов государственной финансовой поддержки сельского хозяйства относятся льготные кредитные механизмы и налоговые преференции, которые стимулируют аграриев расширять масштабы производства и внедрять передовые агротехнологии. Государственная поддержка в современных условиях перестает быть исключительно реакцией на краткосрочные конъюнктурные изменения внешней среды. Она приобретает стратегический характер, направленный на создание фундамента финансовой устойчивости и конкурентных преимуществ аграрной сферы через наращивание внутреннего воспроизводственного потенциала и обеспечение технологического суверенитета.

Цифровизация российской экономики выступает как ключевой вектор формирования новых государственных программ в аграрной сфере. Внедрение электронных платформ упрощает процедуры распределения субсидий, обеспечивает прозрачность движения бюджетных средств и усиливает контроль за их целевым использованием. В настоящее время используются цифровые платформы: ExactFarming (цифровые решения для переработчиков агросырья и производителей семян), SmartAgro (цифровое планирование сельскохозяйственных работ), РСМ «Агротроник» (цифровой сервис для менеджмента сельхозтехники) и др. Непосредственно Министерством сельского хозяйства курируется Единая цифровая платформа агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов (ЕЦП АПК), позволяющая обеспечить синергию системоформирующего взаимодействия информационных, финансовых и технических ресурсов.

Государственная финансовая поддержка сельского хозяйства реализуется с помощью широкого спектра инструментов, каждый из которых имеет функциональную целеориентацию. Так, механизм прямых субсидий – непосредственных выплат сельхозтоваропроизводителям – позволяет компенсировать им затраты на приобретение семенного материала, минеральных удобрений, комбикормов и горюче-смазочных материалов. Важным элементом господдержки также выступает система льготного налогообложения, включающая в себя снижение налоговых ставок или полное освобождение от уплаты отдельных видов налогов, что служит действенным стимулом для привлечения инвестиций в аграрную сферу.

Особое место в структуре поддержки сельскохозяйственного производства занимают страховые программы, которые реализуются через субсидирование страховых премий и предоставление государственных гарантий для покрытия убытков,

возникающих вследствие неблагоприятных погодных условий. Наряду с этим значительный блок мер господдержки посвящен инфраструктурному развитию: он направлен на создание и модернизацию объектов логистики, складских помещений, дорожной сети и инженерных коммуникаций в сельских территориях. Финансовое стимулирование также выражается в механизмах льготного кредитования, предполагающих выдачу заемных средств под пониженные проценты, и в грантовой поддержке, направленной на внедрение инноваций и развитие кооперативных форм хозяйствования.

Проблематика государственной финансовой поддержки аграрного сектора активно разрабатывается в научном дискурсе, где авторы анализируют различные аспекты развития сельского хозяйства и АПК, модели субсидирования. В научной литературе подчеркивается, что обоснованное определение приоритетов при оказании государственной поддержки (по мнению А.А. Саакяна [1]) позволяет повысить эффективность распределения бюджетных средств в русле долгосрочных стратегических ориентиров. В свою очередь, Д.М. Хомяков с соавт. [2] делают акцент на перспективных направлениях государственного содействия развитию АПК в рамках продовольственной политики, отмечая необходимость использования комплексного подхода на этапах планирования и последующего контроля.

Управленческая составляющая механизмов государственной поддержки, охватывающая налоговые преференции, грантовые инструменты и компенсационные меры, рассматривается в трудах Д.А. Зюкина [3]. Исследование, выполненное Е.П. Рябовой [4], заслуживает внимания с позиции оценки влияния реализуемых мер на социальное устройство сельских территорий. З.Ш. Бабаева [5], поддерживая данный подход, обращает внимание на необходимость адаптации механизмов субсидирования к российским реалиям с учетом региональных особенностей и имеющегося инновационного потенциала. Д.М. Назаров [6], сосредоточившись на проблемах цифровизации, подчеркивает важность создания электронных платформ для управления ресурсами сельского хозяйства, в том числе поступающими в рамках государственного финансирования.

Вместе с тем ряд исследователей обращает внимание на изъяны действующих механизмов предоставления государственной финансовой помощи. Г.В. Беспахотный указывал на необходимость совершенствования системы поддержки аграриев, предлагая конкретизировать поддержку по двум самостоятельным подсистемам: одна – для развития и модернизации аграрной сферы, другая – для регулирования продовольственного рынка и доходов сельскохозяйственных производителей [7]. Е.Е. Голова и О.А. Блинов в своих работах акцентируют внимание на проблеме сложности оформления заявочной документации, что препятствует участию значительной части фермеров в программах господдержки. По их мнению, целесообразной является разработка доступного алгоритма получения помощи, упрощающего восприятие требований к потенциальным получателям [8].

Проблематике государственной поддержки сельскохозяйственных товаропроизводителей посвящены труды О.К. Котар [9], Г.А. Иовлева [10], В.З. Мазлоева [11], С.В. Щурина [12], М.А. Чирской [13], Ш.И. Шарипова [14]. Необходимость совершенствования государственной финансовой поддержки аграрной отрасли признается исследователями единогласно. Так, С.А. Суслов и И.Н. Норенков указывают, что эффективность деятельности сельхозтоваропроизводителей четко коррелирует с размерами выделяемых субсидий и дотаций, а также проводимой налоговой и тарифной политики [15]. В работе И.В. Митиной определены барьеры, снижающие результативность финансирования агропромышленного сектора – такие, как недостаточность обоснования планируемых результатов направляемых инвестиций,

непоследовательность в применении индикаторов бюджетной эффективности, отсутствие методологической преемственности при расчетах нормативов ассигнований [16]. Аспекты импортозамещения анализируются в работе М.Б. Демехова и соавт. [17]. В работе В.В. Зундэ и соавт. анализируются результативность управления реализацией национальных проектов и необходимость внедрения комплексной системы их оценки [18]. Исследование проблем государственной поддержки развития экономики, ее финансовых механизмов и направлений совершенствования представлено в работах ряда авторов, рассматривающих данный вопрос в контексте налогового регулирования, инновационного развития, бюджетной политики и пространственной организации экономики.

Значительное внимание вопросам налогового стимулирования сельского хозяйства уделено в работе М.Е. Косова, который обосновывает зависимость отечественного АПК от импортных поставок. Исследователь подчеркивает важность решения проблем стабилизации продовольственной безопасности через совершенствование налоговых инструментов поддержки сельхозтоваропроизводителей, что согласуется с выводами нашего исследования о важности преференциального налогового режима для устойчивого развития аграрного сектора [19].

Вопросы макростратегического управления технологическими инновационными системами в аграрной сфере и их финансового обеспечения раскрыты в исследовании Б.Д. Матризаева. Автор рассматривает методологические принципы и механизмы управления динамикой технологических инноваций, подчеркивая значимость государственного финансирования как ключевого ресурса для технологического обновления сельского хозяйства. Данный подход перекликается с выводами статьи о необходимости перехода от императивов инерционного развития к стратегии обеспечения технологического суверенитета и повышения роли государственной поддержки в стимулировании инновационной активности в АПК [20].

Проблематика зеленого финансирования как фактора повышения эффективности природоохранной деятельности представлена в работе Н.А. Осокина. Несмотря на то, что исследование сфокусировано на утилизации промышленных отходов, предложенные автором подходы к использованию инструментов зеленого финансирования имеют значение и для аграрного сектора в части экологизации производства, внедрения биотехнологий и адаптации к климатическим изменениям, что дополняет рекомендательную часть настоящей статьи [21].

Фундаментальные аспекты казначейского управления денежными средствами в государственном секторе рассматриваются Э.А. Исаевым. Разработанная автором концептуальная модель кэш-менеджмента, интегрирующая цифровые инструменты и предиктивную аналитику, актуальна для совершенствования механизмов доведения бюджетных средств до сельхозтоваропроизводителей, повышения прозрачности и контроля за целевым использованием субсидий, что является одним из ключевых направлений совершенствования государственной поддержки АПК [22].

Современные приоритеты и инструменты бюджетной политики России проанализированы в работе М.Л. Васюниной. Автор выявляет ключевые структурные изменения в бюджетном финансировании, направленные на стимулирование технологического лидерства и пространственного развития. Полученные выводы корреспондируют с результатами представленных исследований, в которых отмечена высокая региональная дифференциация мер поддержки и необходимость адаптации бюджетных инструментов к локальным условиям [23].

Условия современного функционирования малого и среднего бизнеса в контексте пространственного развития России исследованы И.Н. Молчановым. Систематизация мер государственной поддержки МСП, выявление факторов, влияющих

на деловую активность, а также аргументация необходимости ускоренного включения субъектов малого бизнеса в цепочки создания добавленной стоимости напрямую соотносятся с выводами настоящей статьи о важности грантовой поддержки крестьянских (фермерских) хозяйств и сельскохозяйственных кооперативов, а также о запуске федерального проекта «Развитие малого агробизнеса» как инструмента консолидации мер поддержки [24].

Таким образом, анализ приведенных научных работ подтверждает многогранность проблемы государственной финансовой поддержки аграрной сферы, необходимость комплексного подхода к выбору инструментов, важность учета региональной специфики, а также целесообразность интеграции налоговых, бюджетных и кредитных механизмов для достижения технологического суверенитета в сельскохозяйственном секторе страны.

Цель исследований: проверка гипотезы о положительном влиянии мер государственной финансовой поддержки аграрного сектора в соответствии с целями Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, а также обоснование актуальных решений в области планирования и своевременной коррекции мероприятий государственной поддержки сельского хозяйства.

Методика исследований
Research method

Логика данных исследований определяет его общую методику, включающую в себя анализ механизмов государственной финансовой поддержки сельского хозяйства Российской Федерации в условиях укрепления продовольственного суверенитета и разработку мер их совершенствования в целях обеспечения технологической модернизации аграрной сферы.

Методы исследований включают в себя: анализ статистических данных; компаративный анализ и визуализацию его результатов, обоснование целесообразности дезагрегации и адаптации нормативно-правовых актов государственного финансового регулирования к конкретным условиям сельскохозяйственного производства; систематизацию мер результативной практики по обеспечению технологического суверенитета и конкурентоспособности аграрной сферы страны.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 4 апреля 2025 г. № 434 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» [1] и Указу Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [2] в стратегические приоритеты Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков

[1] О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации: Постановление Правительства Российской Федерации от 4 апреля 2025 г. № 434. [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504050017.

[2] О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542.

сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия[3] были внесены изменения. В рамках обновленной Государственной программы установлены следующие целевые показатели:

• достижение значения индекса производства продукции сельского хозяйства (в сопоставимых ценах) в 2030 г. в объеме 122,6% к уровню 2021 г.;

• достижение значения индекса производства пищевых продуктов (в сопоставимых ценах) в 2030 г. в объеме 124,2% по отношению к 2021 г.;

• достижение уровня среднемесячной начисленной заработной платы работников сельского хозяйства (без субъектов малого предпринимательства) в 2030 г. в размере 81 355 руб.;

• достижение объема экспорта продукции агропромышленного комплекса в размере $55,2 млрд к концу 2030 г. (в номинальных ценах)[4].

В структуре производства сельскохозяйственной продукции по категориям хозяйств в 2024 г. доля личных подсобных и других хозяйств населения увеличилась на 0,1 процентного пункта по сравнению с 2023 г. и достигла 25,4%. Рост данного показателя объясняется повышением деловой активности в этом секторе. Совокупный объем продукции сельского хозяйства за отчетный период составил 2,2 трлн руб., что на 4,8% превышает уровень предыдущего года. Прирост был обеспечен главным образом за счет животноводческой отрасли: ее продукция увеличилась на 9,1%, достигнув 1,2 трлн руб. (рис. 1).

Численность крестьянских (фермерских) хозяйств в 2024 г. снизилась относительно 2023 г., составив 14,2% в общей численности сельскохозяйственных организаций. В относительном выражении падение данного показателя оценивается в 4,1%. При этом абсолютный объем выпуска продукции в этом сегменте сохранился на уровне предыдущего года, составив 1,2 трлн руб.: 1 трлн руб. обеспечен растениеводством, а 0,2 трлн руб. – животноводством (рис. 2).

В 2025 г. параметры государственной поддержки агропромышленного комплекса сложились следующим образом:

– совокупный размер бюджетных ассигнований, направленных на реализацию отраслевых программ развития, достиг 507,4 млрд руб.;

– в объеме бюджетных ассигнований, направленных на реализацию Национального проекта «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности», льготные кредиты составили 6,6 млрд руб. (покупка сельскохозяйственной техники российского производства – 5,5 млрд руб., отечественных пищевых и кормовых добавок – 0,8 млрд руб., ветеринарных препаратов и вакцин – 0,3 млрд руб.).

– объем объединенной субсидии составил 49,4 млрд руб. (несвязанная поддержка по условиям субсидии направлена в регионы Сибирского и Дальневосточного федеральных округов по статьям: закладка и уход за многолетними насаждениями – дополнительно 1,8 млрд руб., на агрострахование – дополнительно 0,9 млрд руб., на традиционные подотрасли АПК – прирост на 0,2 млрд руб. [26].

---

[3] Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия: Постановление Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717. [Электронный ресурс]. URL: http://government.ru/rugovclassifier/815/events/.

[4] Паспорт Государственной программы (комплексной программы) Российской Федерации «Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия»: утв. решением Правительства РФ от 3 сентября 2025 г. № ДП-П11-32623. [Электронный ресурс]. URL: https://legalacts.ru/doc/pasport-gosudarstvennoi-programmy-kompleksnoi-programmy-rossiiskoi-federatsii-gosudarstvennaja-programma_4/.

Рис. 1. Объем производства растениеводства и животноводства, трлн руб. [25]

Figure 1. Volume of crop and livestock production, trillion rubles [25]

На реализацию программ льготного кредитования в 2025 г. предусмотрено около 48,7 млрд руб., что вдвое превышает объем финансирования, выделенного годом ранее. Процентные ставки по таким кредитам устанавливаются в плавающем формате и привязаны к ключевой ставке Банка России:

• при значении ключевой ставки 21% льготные кредиты предоставлялись по ставке от 1 до 8,3% годовых исключительно по приоритетным направлениям; по остальным направлениям ставка установлена на уровне 12,5%;

• объем субсидирования процентной ставки для приоритетных направлений составляет 70% от ключевой ставки, для прочих направлений – 50%.

С 2025 г. перечень направлений, доступных для льготного кредитования, был дополнен такими инструментами, как: кредиты инфраструктурного характера, предоставляемые для строительства, реконструкции и модернизации комплексов по разведению свиней; кредитование проектов, связанных с изготовлением кормов и технологических пищевых добавок; кредиты, направляемые на организацию выпуска ветеринарных лекарств и соответствующих препаратов [26].

Рис. 2. Объем производства в крестьянских (фермерских) хозяйствах, трлн руб. [25]

Figure 2. Volume of production in peasant (farm) households, trillion rubles [25]

В настоящее время приоритетное направление государственной поддержки аграрного сектора, на котором сосредоточено внимание Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, связано с развитием агрострахования. Общий объем бюджетных ассигнований на эти цели в 2025 г. определен в размере 7 млрд руб., что на 1 млрд руб. превышает показатель предыдущего года. Ожидается, что увеличение финансирования будет способствовать расширению числа застрахованных объектов.

К числу основных в сфере агрострахования относятся следующие новации:

– с 1 сентября 2024 г. в отношении безусловной франшизы введены новые ограничения: ее предельная величина в контрактах на страхование урожая сельхозкультур и многолетних насаждений уменьшена с половины до 30% страховой суммы.;

– дополнение перечня страховых рисков в животноводстве новыми событиями, включая изъятие поголовья, половодье и паводок [27].

Действующая в России система государственной поддержки в сфере агрострахования строится на принципах софинансирования: средства поступают как из федерального, так и из региональных бюджетов. Средства используются для возмещения части расходов сельхозтоваропроизводителей на уплату страховой премии по заключенным договорам.

Совершенствование страховых механизмов в агросфере происходит в связи с поправками в Федеральный закон № 260-ФЗ. Поправки по страхованию (вступили в силу с 1 сентября 2025 г.) предполагают следующие условия:

– сокращение максимально допустимого уровня безусловной франшизы (с 50 до 30% от страховой суммы) применительно к страхованию урожая и многолетних насаждений;

– выработка единообразного подхода к определению величины франшизы дифференцированно по культурам;

– расширение спектра покрываемых рисков в рамках страхования животных в сельском хозяйстве за счет включения событий: изъятие, наводнение и паводок.

По итогам 2024 г. отдельные регионы значительно превысили целевые показатели Государственной программы в области агрострахования. В растениеводстве наиболее существенное превышение зафиксировано в Челябинской области (фактический показатель – выше планового в 7,1 раза), во Владимирской области (в 6,1 раза), в Кабардино-Балкарской Республике (в 5,8 раза), в Республике Калмыкия (в 2,5 раза) и в Нижегородской области (в 2,2 раза). В сфере страхования производства продукции животноводства лидирующие позиции заняли Владимирская область (превышение плана в 8,9 раза), Краснодарский край (в 2,4 раза), Чеченская Республика (в 2,1 раза), Республика Адыгея (в 1,6 раза) и Нижегородская область (в 1,6 раза) [28]. Однако в Удмуртской Республике, Республике Саха (Якутия), в Смоленской, Костромской и Псковской областях имеет место отставание плановых показателей по площадям застрахованных посевов. В сфере животноводства план не выполнен в Республике Саха (Якутия) – фактически застраховано 10,02 тыс. усл. гол. при плане 14,53 тыс. усл. гол.), Карачаево-Черкесской Республике (1,12 тыс. усл. гол. при плане 13,41 тыс. усл. гол.), Республике Тыва (1,16 тыс. усл. гол. при плане 5,98 тыс. усл. гол.), Приморском крае (36,72 тыс. усл. гол. при плане 104,25 тыс. усл. гол.) и Тюменской области (196,14 тыс. усл. гол. при плане 271,63 тыс. усл. гол.).

Реализация мер по содействию малым формам аграрного бизнеса в 2024 г. осуществлялась за счет ассигнований, предусмотренных «консолидированной»

субсидией, в рамках федерального проекта, посвященного развитию отраслей и технической модернизации агропромышленного комплекса. Ресурсы направлялись на предоставление грантов и субсидий соответствующим категориям получателей. Из федерального бюджета на эти цели было выделено 5,4 млрд руб., что составило 11,1% от общего объема «объединенной» субсидии. Средства были разграничены таким образом: на содействие семейным фермерским хозяйствам – 4,16 млрд руб., на развитие материально-технической базы СПоК – 1,2 млрд руб., на мероприятия «Агропрогресс» – 0,02 млрд руб. Получателями грантов в 2024 г. явились 648 крестьянских (фермерских) хозяйств, 2 сельскохозяйственные организации и 99 СПоК. При этом семейные фермы сохранили право на дополнительное субсидирование для последующего развития. Динамика грантовой поддержки К(Ф)Х представлена в таблице 1

На развитие семейных ферм с 2012 по 2024 гг. включительно почти 9 тыс. крестьянских (фермерских) хозяйств получили грантовую поддержку. При этом на 2018-2024 гг. приходится 4 тыс. проектов, обеспеченных государственной поддержкой. До 2019 г. сельхозгранты направлялись на развитие животноводческих ферм. После 2020 г. агропроизводителям разрешено использовать гранты на реализацию растениеводческих проектов.

Сельскохозяйственные потребительские кооперативы (СПоК) начали получать гранты на укрепление материально-технической базы с 2015 г. За все время действия этой меры поддержки было одобрено 1 445 проектов.

Таблица 1

Динамика выданных грантов крестьянско-фермерским хозяйствам [28]

Table 1

Dynamics of grants awarded to peasant-farm households [28]

Грантовые программы	2023 г.			2024 г.			
	объем консолидированных средств, направленных на реализацию мероприятия, тыс. руб.	число получателей	средний размер гранта, тыс. руб.	объем средств, направленных на реализацию мероприятия, тыс. руб.		число получателей	средний размер гранта, тыс. руб.
				консолидированные	федеральные		
1. Гранты К(Ф)Х на развитие семейных ферм	5649408,6	529	10 679,4	3557591,9	2887370,8	258	13 991,1
2. Грант «Агропрогресс»	98 023,6	11	8911,2	21 459,2	19 384,74	2	10 729,6
3. Гранты для развития материально-технической базы СПоК	1619670,5	98	16 527,3	1405437,8	1180746,7	99	14 223,5
4. Субсидии на развитие семейных ферм	–	–	–	1482846,9	1267557,6	397	3716,4

Распределение средств по единой (консолидированной) субсидии между регионами характеризуется выраженной неравномерностью. В 2024 г. распределение средств рассматриваемой субсидии выглядело так: в Еврейской автономной области на развитие крестьянских (фермерских) хозяйств пришлось порядка 90% от объема этой поддержки. Для Хабаровского края и Сахалинской области доля грантов, направленных на К(Ф)Х и сельскохозяйственные потребительские кооперативы, составила свыше 50% от консолидированной субсидии. Однако в 28 субъектах РФ малые формы хозяйствования получили не более 10% от общего субсидирования. Отдельные регионы вовсе не использовали этот инструмент грантовой поддержки фермеров и кооперативов (Мурманская область, Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, а также города федерального значения Севастополь и Санкт-Петербург) [28].

С 2024 г. в правила предоставления грантов были внесены корректировки. В частности, право на получение средств для укрепления материально-технической базы получили начинающие СПоК – кооперативы, зарегистрированные не более чем за 12 месяцев до момента подачи заявки. Кроме того, был введен минимальный порог суммы гранта в размере 5 млн руб. (для начинающих СПоК данное ограничение не действует). Утвержденные средние размеры грантов значительно различаются по регионам. По линии поддержки семейных ферм самые скромные объемы финансирования (от 5 до 6 млн руб.) заложены для следующих регионов: Карачаево-Черкесская Республика, Республика Калмыкия, Республика Ингушетия, Республика Марий Эл.

Верхняя планка субсидий для агроферм варьируется от 25 до 30 млн руб. Такие объемы финансирования характерны для Московской, Тамбовской, Калининградской, Волгоградской, Свердловской, Магаданской и Сахалинской областей, а также для Хабаровского края. Что касается грантов на укрепление материально-технической базы сельхозпотребкооперативов, то их распределение также демонстрирует существенную региональную дифференциацию. Наименьшие усредненные показатели объемов грантов (на уровне 5-6 млн руб.) наблюдаются в Тамбовской, Оренбургской, Курганской, Кемеровской областях, а также в Республике Коми и Калмыкии. В то же время самый крупный средний размер этого вида гранта достигает 40 млн руб. и предусмотрен для Чувашской Республики.

Еще один инструмент государственной поддержки грантового характера – «Агропрогресс» – субсидировал сельхозтоваропроизводителей, включенных в единый реестр субъектов малого и среднего предпринимательства (в соответствии с Федеральным законом № 209-ФЗ). В 2023-2024 гг. в рамках «Агропрогресса» профинансировано 13 проектов развития организаций АПК. Средний размер гранта по этому направлению в 2024 г. составил 10,7 млн руб.

Для обновления парка сельхозтехники и технического перевооружения АПК за счет федерального бюджета предусмотрено субсидирование компании «Росагролизинг». За счет этих средств компенсируются потери в доходах, возникающие при перечислении лизингополучателями платежей по договорам финлизинга, которые заключаются на специальных (преференциальных) условиях. В числе регионов, получивших наибольшее количество сельхозмашин, оказались Татарстан, Башкортостан, Саратовская, Оренбургская, Тульская, Самарская, Ростовская и Новосибирская области, а также Ставрополье и Краснодарский край.

АО «Росагролизинг» в 2024 г. была поставлена на условиях лизинга сельскохозяйственная и автомобильная техника на общую сумму 118 572,75 млн руб., что выше уровня 2023 г. на 25,6% (табл. 2).

Таблица 2

Динамика предоставления сельскохозяйственной и автомобильной техники на условиях финансовой аренды (лизинга) [28]

Table 2

Dynamics of agricultural and automotive machinery provision under financial lease agreements [28]

Федеральный округ	Передано в лизинг в 2023 г.		Передано в лизинг в 2024 г.					
	все-го, шт.	на сумму, млн руб.	тракторов, шт.	комбайнов, шт.	другой сельхозтехники, шт.	автомобильной техники, шт.	всего, шт.	на сумму, млн руб.
Российская Федерация	15 089	94 384,6	2267	2309	12 688	1521	18 785	118 572,7
Центральный	2740	18 653,4	536	337	2425	543	3841	27 009,1
Северо-Западный	713	4406,3	63	27	165	356	611	3941,7
Южный	2821	14 593	326	389	2125	193	3033	17 507,1
Северо-Кавказский	1170	7788,6	241	137	806	38	1222	6150
Приволжский	5143	32 446,6	714	812	4478	310	6314	38 864,4
Уральский	615	3542,8	93	130	501	49	773	5076,6
Сибирский	1165	8030,2	173	383	1625	24	2205	14 512
Дальневосточ-ный	158	1313,8	54	27	308	2	391	2791,3

Объем выделенных АО «Россельхозбанк» кредитов на приобретение сельскохозяйственной техники в 2024 г. снизился на 14% относительно 2023 г. (табл. 3).

Для стимулирования инвестиционной активности аграриев доминирующими инструментами государственной поддержки в 2024 г. стали кредиты на льготных условиях, а также частичное возмещение расходов по уплате процентов по инвестиционным займам (кредитам), заключенным не позднее 31 декабря 2016 г. включительно. В качестве основного показателя оценки результативности данной формы государственной финансовой поддержки выступает сокращение остатка ссудной задолженности по инвестиционным кредитам (займам). Так, в 2024 г. фактически достигнутая величина сложилась на уровне 97,4153 млрд руб. при предусмотренном плановом значении 101,6998 млрд руб. Объемы льготных инвестиционных кредитов аграриям в 2024 г. приведены в таблицах 4, 5.

Таблица 3

Динамика предоставления сельскохозяйственной и автомобильной техники за счет кредитов АО «Россельхозбанк» [28]

Table 3

Dynamics of agricultural and automotive machinery provision financed through loans from AO Rosselkhozbank [28]

Федеральный округ	Тракторы		Зерно-уборочные комбайны		Кормо-уборочные комбайны		Кредиты, направленные на приобретение самоходной сельскохозяйственной техники, тыс. руб.		
	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	изме-нение, %
Российская Федерация	1 107	973	646	477	80	80	26 138000,2	22 379356,2	–14
Центральный	234	294	170	141	34	40	7717321,6	8909997,1	15
Северо-Западный	21	40	4	2	5	0	421 833,9	294 259	–30
Южный	149	172	53	24	3	0	1873958,4	1276399,8	–32
Северо-Кавказский	57	4	25	9	5	0	916 364,3	203 631,7	–78
Приволжский	364	271	205	130	25	32	7525170,7	5578953,7	–26
Уральский	52	47	34	27	2	2	952 149,6	530 527,6	–44
Сибирский	183	103	120	101	6	6	5433109	4482848,4	–17
Дальневосточный	47	42	35	43	0	0	1298092,8	1102738,9	–15

По договорам льготного инвестиционного кредитования с заемщиками из числа малых форм хозяйствования было оформлено 11,8 тыс. соглашений на общую сумму 145 457,14 млн руб., что соответствует 13,64% от общего числа кредитных договоров, заключенных в 2024 г. На развитие молочного скотоводства приходится 1 326 льготных кредитных договоров на сумму 147 684,62 млн руб., причем объем фактически перечисленных субсидий по ним в 2024 г. составил 3 010,94 млн руб.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2025 г. № 2110 с 1 января 2026 г. началась реализация нового федерального проекта «Развитие малого агробизнеса».

Актуальность использования специализированного механизма поддержки аграриев подтверждается их существенным вкладом в общий объем сельскохозяйственного производства. По данным Минсельхоза России, на долю крестьянских (фермерских) хозяйств приходится порядка 14% производства сельхозпродукции, а на весь малый агробизнес включая личные подсобные хозяйства (ЛПХ) – почти половина. По данным Ассоциации крестьянских (фермерских) хозяйств и сельскохозяйственных кооперативов России (Ак@@ОР), в 2023 г. на долю малых форм хозяйствования приходилось 55,3% совокупной сельскохозяйственной продукции, что подтверждает тезис о необходимости поддержки данного сектора как решения одной из приоритетных задач развития агропромышленного комплекса.

Новый федеральный проект нацелен на консолидацию всех мер государственной поддержки фермеров и кооперативов в рамках единой защищенной строки бюджета. Ранее средства, предназначенные для малых форм хозяйствования, были распределены по различным программам, что позволяло региональным властям перераспределять их. Новая архитектура Проекта призвана предотвратить практику, когда региональные власти направляли выделенные средства на поддержку МСП в аграрном сегмента на другие цели.

Таблица 4

Объемы выданных льготных инвестиционных кредитов сельхозпредпринимателям в сфероотраслевом разрезе [28]

Table 4

Volumes of preferential investment loans issued to agricultural entrepreneurs by sector [28]

Направление	Число кредитных договоров	Сумма по кредитным договорам, млн руб.	Фактически предоставлено кредитных средств, млн руб.
Всего	3 849	430 479,2	156 424,1
Растениеводство	130	58 139	15 094,5
Животноводство	130	114 695,4	23 751
Переработка продукции растениеводства и животноводства	233	110 818,8	43 434,3
Молочное скотоводство	242	63 933,4	20 759,6
Мясное скотоводство	17	312,8	302,3
Приобретение техники	3 097	82 579,9	53 082,4

Центральным элементом Проекта объявлено развитие инфраструктуры сбыта сельскохозяйственной продукции, предполагающее комплексный подход, сочетающий финансовую помощь с созданием эффективных логистических сетей. Ключевые механизмы поддержки в рамках этих направлений охватывают:

– переработку сельхозпродукции: субсидирование создания мощностей по сбору, хранению, переработке и обработке продукции малых форм хозяйствования включая личные подсобные хозяйства;

– автоматизацию, подразумевающую финансовую поддержку внедрения систем прослеживаемости продвижения продукции, что особенно актуально для ЛПХ, направленную на повышение доверия потребителей и выход на новые рынки;

– ценовую поддержку посредством агроагрегаторов через субсидирование агропроизводителей;

– сертификацию (компенсация затрат на сертификацию продукции, прежде всего – органической, обладающей улучшенными характеристиками). Такие поддерживающие решения способствуют росту технологического оснащения агропроизводителей, повышению их конкурентоспособности и активизации сбытовых возможностей на локальных (отечественных) и зарубежных рынках. Однако необходимо также учесть ряд системных проблем, от решения которых зависит успешность реализации данного Проекта.

Таблица 5

Объемы выданных льготных инвестиционных кредитов сельхозпредпринимателям в разрезе федеральных округов [28]

Table 5

Volumes of preferential investment loans issued to agricultural entrepreneurs by federal districts [28]

Федеральный округ	Число кредитных договоров	Сумма по кредитным договорам, млн руб.	Фактически предоставлено кредитных средств, млн руб.
Российская Федерация	3 849	430 479,2	156 424,1
Центральный	869	175 470,2	49 770,4
Северо-Западный	134	35 707,8	16 080,3
Южный	960	47 379,6	22 852,6
Северо-Кавказский	86	9 126,6	5 178,8
Приволжский	1 121	98 206,8	37 814,6
Уральский	181	12 401,9	4 576,4
Сибирский	389	36 082,9	15 338,8
Дальневосточный	109	16 103,4	4 812,2

Первый сдерживающий фактор – доступ аграриев к финансовым ресурсам. Критическое значение для развития малого агробизнеса имеет доступ к долгосрочным и льготным источникам финансирования. Малые формы хозяйствования имеют ограниченную доступность к кредитным ресурсам вследствие их оценки банковским сектором как категории повышенного риска. В 2024 г. доля государственной поддержки малого сектора сельскохозяйственного назначения составила 6%, тогда как вклад данной категории хозяйств в валовую сельскохозяйственную продукцию превышает 50%. Во-вторых, проблемой реализации проекта является административная и цифровая нагрузка. Внедрение федеральных государственных информационных систем (ФГИС) создает для малых производителей, особенно семейных ферм, дополнительные административные барьеры, обусловленные дефицитом временных, кадровых и технических ресурсов включая доступ к интернет-соединению. В качестве одного из возможных решений рассматривается создание единой универсальной цифровой платформы для малых форм хозяйствования при одновременном снижении общей административной нагрузки. В-третьих, существенной проблемой является кадровое обеспечение. Дефицит квалифицированных кадров в сегменте малого агробизнеса является более острым по сравнению с крупными сельскохозяйственными предприятиями, поскольку отсутствие специалистов способно оказать критическое влияние на результаты деятельности небольших хозяйств. В-четвертых, важным ограничением результативности Проекта является сложный процесс трансформации высокотоварных личных подсобных хозяйств в категорию крестьянских (фермерских) хозяйств, требующий инструментов стимулирования такого перехода. По данным Сельскохозяйственной микропереписи 2021 года, около 970 тыс. сельских семей используют ЛПХ в качестве основного или значимого дополнительного источника дохода, что формирует существенный резерв для их формализации. Вместе с тем в настоящее время фиксируется обратный процесс: регистрация малых фермерских хозяйств в статусе ЛПХ с целью снижения налогового и административного бремени. В качестве меры предлагается внесение изменений в Федеральный закон «О крестьянском (фермерском) хозяйстве» в части закрепления статуса семейных фермерских хозяйств и предоставления им налоговых преференций.

Выводы
Conclusion

Анализ накопленного опыта государственной финансовой поддержки сельского хозяйства России показывает, что формируется адаптивная система, ориентированная на получение конкретных, измеримых итогов. Государственная финансовая поддержка выступает в качестве не столько инструмента компенсации текущих издержек, сколько механизма укрепления финансовой устойчивости и конкурентоспособности сельхозтоваропроизводителей, результативность которой подтверждается позитивными сдвигами в развитии сельского хозяйства страны.

Для обеспечения динамического развития сельского хозяйства и повышения конкурентоспособности российских аграриев государственная финансовая поддержка должна быть ориентирована на стимулирование сельхозпроизводителей к ускоренному технологического обновлению, росту эффективности производства и повышению финансовой устойчивости хозяйствующих субъектов. Такой подход позволяет выстроить устойчивую воспроизводственную систему, результатом которой становится не только обеспечение продовольственной независимости, но и укрепление национальной безопасности России в целом.

Список источников

1. Саакян А.А. Зарубежный и отечественный опыт государственной поддержки развития АПК // *Наука и образование*: *хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление*. 2021. № 4 (131). С. 18–21. EDN: VALMND

2. Хомяков Д.М., Азиков Д.А. Значение, роль и перспективы государственной поддержки АПК в реализации продовольственной политики России // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2023. № 1 (173). С. 58–65. EDN: OSDVCZ

3. Зюкин Д.А., Святова О.В., Скрипкина Е.В., Латышева З.И. и др. Управление развитием АПК на основе инструментов государственной поддержки // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 5. С. 207–213. EDN: JDKHLS

4. Рябова Е.П., Петрова Е.И. Результаты государственной поддержки АПК // *Финансовый вестник*. 2022. № 4 (59). С. 78–82. EDN: KEBOXU

5. Бабаева З.Ш. Государственная поддержка в сфере АПК // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2018. № 6. С. 539–541. EDN: YODUCT

6. Назаров Д.М., Кондратенко И.С., Суцлимин В.В., Шведов В.В. Цифровизация сельского хозяйства на примере Румынии // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2022. № 6 (390). С. 622–624. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_622

7. Беспахотный Г.В. Проблемы государственной поддержки сельскохозяйственных товаропроизводителей // *Образование, наука и производство*. 2013. № 3 (4). С. 8–11. EDN: RWFTDX

8. Голова Е. Е., Блинов О.А. Государственная поддержка сельского хозяйства в условиях геополитических вызовов // *Экономика, предпринимательство и право*. 2023. Т. 13, № 9. С. 3555–3576. https://doi.org/10.18334/epp.13.9.118664

9. Котар О.К., Волощук Л.А., Пшенцова А.И., Минеева Л.Н. и др. Система государственной поддержки сельского хозяйства в регионах Российской Федерации в условиях возникновения чрезвычайной ситуации // *Экономика и предпринимательство*. 2023. № 1 (150). С. 82–86. https://doi.org/10.34925/EIP.2023.150.1.014

10. Иовлев Г.А., Шайхутдинов Ф.Р., Голдина И.И. Государственная поддержка сельского хозяйства России и регионов: исторический аспект и современные реалии // *Технический сервис машин*. 2020. № 2 (139). С. 171–185. https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-2-171-185

11. Мазлоев В.З., Кцоев А.Б. Механизм государственной поддержки: стимулы и ограничения в системе распределения субсидий // *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2011. № 9. С. 16–22. EDN: OFVQMV

12. Щурина С.В. Возможности государства по продвижению фермерства и сельской кооперации в России // *Экономика. Налоги. Право*. 2024. Т. 17, № 5. С. 50–66. https://doi.org/10.26794/1999-849x-2024-17-5-50-66

13. Чирская М.А., Нимченко М.В. Актуальные направления государственной поддержки сельского хозяйства в России: возможности использования мирового опыта // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. № 61-7. С. 43–46. https://doi.org/10.18411/lj-05-2020-142

14. Шарипов Ш.И. О роли личных подсобных хозяйств в развитии сельских территорий и подходах к их государственной поддержке // *Экономический анализ*: *теория и практика*. 2020. Т. 19, № (498). С. 402–415. https://doi.org/10.24891/ea.19.3.402

15. Суслов С.А., Норенков И.Н. Экономическая эффективность сельскохозяйственного производства: теоретические подходы и отраслевые особенности // *Вестник НГИЭИ*. 2025. № 4 (167). С. 114–124. https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-4-114-124

16. Митина И.В. Государственная поддержка: сущность и механизм распределения // *Вестник науки и образования*. 2019. № 10-4 (64). С. 59–61. https://doi.org/10.24411/2312-8089-2019-11005

17. Багратуни К.Ю., Демехова М.Б., Данилова Е.В., Азитов Р.Ш. и др. Импортозамещение и его место в современной экономической политике России // *Инновации и инвестиции*. 2023. № 10. С. 576–579. EDN: MPAETY

18. Зундэ В.В., Морозова А.И., Тирацуян В.Х., Мезенцева Е.Е. и др. Внедрение комплексной системы оценки управления реализацией национальных проектов РФ // *Экономика и предпринимательство*. 2021. № 1 (126). С. 47–53. https://doi.org/10.34925/EIP.2021.126.01.005

19. Косов М.Е., Голубцова Е.В., Новикова Е.С. Государственное налоговое регулирование в сельском хозяйстве в условиях политики импортозамещения // *Финансы*: *теория и практика*. 2023.Т. 27, № 2. С. 119–130. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-2-119-130

20. Матризаев Б.Д. Исследование методологических принципов и финансовых механизмов макростратегического управления динамикой технологических инновационных систем // *Финансы*: *теория и практика*. 2022. Т. 26, № 1. С. 144–155. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2022-26-1-144-155

21. Осокин Н.А., Никитушкина Ю.В., Золотова И.Ю. Инструменты зеленого финансирования как фактор повышения утилизации промышленных отходов в России // Финансы: теория и практика. 2022. Т. 26, № 6. С. 17–31. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2022-26-6-17-31

22. Исаев Э.А., Гусарова Л.В., Федченко Е.А. Фундаментальные проблемы развития кэш-менеджмента в государственном секторе // *Финансы*: *теория и практика*. 2026. Т. 30, № 1. С. 242–264. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2026-30-1-242-264

23. Васюнина М.Л., Демидова С.Е., Тюрина Ю.Г. Бюджетная политика России: современные приоритеты и инструменты // *Экономика. Налоги. Право*. 2026. Т. 19, № 1. С. 40–54. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2026-19-1-40-54

24. Молчанов И.Н. Малое и среднее предпринимательство в контексте пространственного развития России // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 6. С. 6–15. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-6-6

25. О*бъем продукции и индексы производства продукции сельского хозяйства по категориям хозяйств по Российской Федерации*. Росстат. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения: 20.02.2026)

26. П*риоритеты и нововведения господдержки АПК в 2025 году*. URL https://mcx.gov.ru/activity/state-support/measures/ (дата обращения: 20.02.2026)

27. Мороз О.Н., Медведский Д.А. Аналитический обзор тренд-изменений состояния экономической и организационно-технической бизнес-среды агропромышленного комплекса России // *Продовольственная политика и безопасность*. 2025. Т. 12, № 4. С. 953–982. https://doi.org/10.18334/ppib.12.4.124071

28. *Национальный доклад «О ходе и результатах реализации в 2024 году государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия»*. URL: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/61f/f11i4mk99phkqab8ic4yuyids3t5izrn.pdf (дата обращения: 20.02.2026)

References

1. Saakyan A.A. Foreign and domestic experience of state support for the development of the agro-industrial sector. *Nauka i obrazovanie*: *khozyaystvo i ekonomika; predprinimatelstvo; pravo i upravleniye*. 2021;4(131):18-21. (In Russ.)

2. Khomiakov D.M., Azikov D.A. The importance, role and prospects of state support for agriculture in the implementation of Russia's food policy. *Ispolzovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii.* 2023;91(173)):58-65. (In Russ.)

3. Zyukin D.A., Svyatova O.V., Skripkina E.V., Latysheva Z.I. et al. Agribusiness development management based on state support tools. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2022;(5):207-213. (In Russ.)

4. Ryabova E.P., Petrova E.I. Results of state support of the agro-industrial complex. *Finansoviy vestnik.* 2022;4(59):78-82. (In Russ.)

5. Babaeva Z.Sh. State support in the agro-industrial sector. *Actual Issues of the Modern Economy.* 2018;(6):539-541. (In Russ.)

6. Nazarov D.M., Kondratenko I.S., Sutzlimin V.V., Shvedov V.V. Digitalization of agriculture on the example of Romania. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal.* 2022;(6(390)):622-624. (In Russ.) https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_622

7. Bespakhotny G.V. Problems of state support for agricultural producers. *Obrazovanie, nauka i proizvodstvo.* 2013;3(4):8-11. (In Russ.)

8. Golova E.E., Blinov O.A. State support for agriculture amidst geopolitical challenges. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law.* 2023;13(9):3555-3576. (I n Russ.) https://doi.org/10.18334/epp.13.9.118664

9. Kotar O.K., Voloshchuk L.A., Pshentsova A.I., Mineeva L.N. et al. System of state support of agriculture in the regions of the Russian Federation in the conditions of an emergency situation. *Ekonomika i predprinimatelstvo.* 2023;(1(150):82-86. (In Russ.) https://doi.org/10.34925/EIP.2023.150.1.014

10. Iovlev G.A., Shaykhutdinov F.R., Goldina I.I. State support for agriculture of Russia and regions: historical aspect and modern realities. *Machinery Technical Service.* 2020;(2(139)):171-185. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-2-171-185

11. Mazloev V.Z., Ktsoev A.B. Mechanism of government assistance: inducements and restrictions of subsidy distribution system. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises.* 2011;(9):16-22. (In Russ.)

12. Shchurina S.V. The possibilities of the state to promote farming and rural cooperation in Russia. *Ekonomika. Nalogi. Pravo.* 2024;17(5):50-66. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849x-2024-17-5-50-66

13. Chirskaya M.A., Nimchenko M.V. Current trends of state support for agriculture in Russia: opportunities for using international experience. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya.* 2020;(61-7):43-46. (In Russ.) https://doi.org/10.18411/lj-05-2020-142

14. Sharipov Sh.I. On the role of private subsidiary farms in rural development and approaches to their support by the state. *Economic Analysis*: *Theory and Practice.* 2020;19 (3(498)):402-415. (In Russ.) https://doi.org/10.24891/ea.19.3.402

15. Suslov S.A., Norenkov I.N. Economic efficiency of agricultural production: theoretical approaches and industry features. *Vestnik NGIEI.* 2025;(4(167)):114-124. (I n Russ.) https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-4-114-124

16. Mitina I.V. Government support: the nature and allocation mechanism. *Vestnik nauki i obrazovaniya.* 2019;(10-4(64)):59-61. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/2312-8089-2019-11005

17. Bagratuni K.Yu., Demekhova M.B., Danilova E.V., Azitov R.Sh. et al. Import substitution and its place in the modern economic policy of Russia. *Innovations & Investments.* 2023;(10):576-579. (In Russ.)

18. Zunde V.V., Morozova A.I., Tiratsuyan V.Kh., Mezentseva E.E. et al. Implementation of a comprehensive assessment system for managing the implementation of national projects of the Russian Federation. *Ekonomika i predprinimatelstvo*. 2021;(1(126)):47-53. (In Russ.) https://doi.org/10.34925/EIP.2021.126.01.005

19. Kosov M.E., Golubtsova E.V., Novikova E.S. Government tax regulation in the agricultural sector in conditions of import substitution policy. *Finance*: *Theory and Practice.* 2023;27(2):119-130. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-2-119-130

20. Matrizaev B.D. Research of methodological principles and financial mechanisms of macro-strategic management of the dynamics of technological innovation systems. *Finance*: *Theory and Practice.* 2022;26(1):144-155. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/2587-5671-2022-26-1-144-155

21. Osokin N.A., Nikitushkina Yu.V., Zolotova I.Yu. Green finance instruments as a factor of increasing industrial waste utilization in Russia. *Finance*: *Theory and Practice*. 2022;26(6):17-31. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/2587-5671-2022-26-6-17-31

22. Isaev E.A., Gusarova L.V., Fedchenko E.A. Fundamental problems of cash management development in the public sector. *Finance*: *Theory and Practice.* 2026;30(1):242-264. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/2587-5671-2026-30-1-242-264

23. Vasyunina M.L., Demidova S.E., Tyurina Yu.G. Russia's budget policy: present priorities and implements. *Ekonomika. Nalogi. Pravo.* 2026;19(1):40-54. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2026-19-1-40-54

24. Molchanov I.N. Small and medium-sized enterprises in the context of Russia's spatial development. *Ekonomika. Nalogi. Pravo.* 2025;18(6):6-15. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-6-6

25. *Volume of Agricultural output and production indices by farm category in the Russian Federation.* Rosstat. (In Russ.) URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (accessed: February 20, 2026).

26. Priorities and innovations of state support for the agro-industrial sector in 2025. (In Russ.) URL: https://mcx.gov.ru/activity/state-support/measures/ (accessed: February 20, 2026).

27. Moroz O.N., Medvedsky D.A. Analytical review of trend changes in the economic, organizational and technical business environment of the Russian agro-industrial industry. *Food Policy and Security.* 2025;12(4):953-982. (In Russ.) https://doi.org/10.18334/ppib.12.4.124071

28. National report "On the progress and results of the implementation in 2024 of the state program for agricultural development and regulation of agricultural products, raw materials and food markets". (In Russ.) URL: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/61f/f11i4mk99phkqab8ic4yuyids3t5izrn.pdf (accessed: February 20, 2026).

Сведения об авторах

Овчинников Виктор Николаевич, д-р экон. наук, профессор, научный руководитель факультета управления, профессор кафедры управления развитием пространственно-экономических систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный

университет»; 344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42; e-mail: viktor.ov@inbox.ru; https://orcid.org/0000-0002-3975-0939

Зундэ Виктория Викторовна, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры национальной и региональной экономики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова»; 115054, Россия, г. Москва, Стремянный переулок, 36; e-mail: Zunde.VV@rea.ru; https://orcid.org/0000-0002-9601-5762

Каринэ Юрьевна Багратуни, канд. экон. наук, доцент кафедры общественных финансов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»; 125315, г. Москва, ул. Ленинградский проспект, 49; e-mail: KYUBagratuni@fa.ru; https://orcid.org/0000-0002-8077-1475

Information about the authors

Viktor N. Ovchinnikov, DSc (Econ), Professor, Scientific Director of the Faculty of Management, Professor at the Department of Management of Development of Spatial-Economic Systems, Southern Federal University; 105/42 Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; e-mail: viktor.ov@inbox.ru; https://orcid.org/0000-0002-3975-0939

Victoria V. Zunde, DSc (Econ), Associate Professor, Professor at the Department of National and Regional Economics, Plekhanov Russian University of Economics; 36, Stremyanny Ln., Moscow, 115054, Russian Federation; e-mail: Zunde.VV@rea.ru; https://orcid.org/0000-0002-9601-5762

Karine Yu. Bagratuni, CSc (Econ), Associate Professor at the Department of Public Finance, Financial University under the Government of the Russian Federation; 49 Leningradsky Ave., Moscow, 125315, Russian Federation; e-mail: KYUBagratuni@fa.ru; https://orcid.org/0000-0002-8077-1475

Научная статья
УДК 631.15:633.1
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-195-209

ЭКОНОМИКА

Система показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области с учетом ESG-принципов

Ярослав Евгеньевич Русаков✉, **Виктория Владимировна Рахаева**

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

✉**Автор, ответственный за переписку:** y.rusakov@rgau-msha.ru

Аннотация
В статье представлена авторская система показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области, интегрирующая экологические, социальные и управленческие критерии. Объектом исследований является зернопродуктовый подкомплекс Саратовской области. Разработана методология формирования интегрального показателя устойчивости, адаптированная к региональным особенностям. В результате исследований создана и обоснована система из 15 ключевых показателей (E, S, G), включающая в себя их весовые коэффициенты, пороговые значения и интегральную модель расчета индекса ESG, что позволяет количественно оценивать уровень сбалансированного развития подкомплекса. Предложены пороговые значения показателей и практические рекомендации по внедрению системы мониторинга. Результаты исследований могут быть использованы органами управления АПК для стратегического планирования и повышения конкурентоспособности регионального зернового производства в контексте глобальных трендов устойчивого развития.

Ключевые слова
ESG-принципы, зернопродуктовый подкомплекс, сбалансированное развитие, система показателей, устойчивое развитие, Саратовская область, агропромышленный комплекс

Для цитирования
Русаков Я.Е., Рахаева В.В. Система показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области с учетом ESG-принципов // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 195–209.

System of indicators for balanced development of the grain subcomplex of the Saratov Region incorporating ESG principles

Yaroslav E. Rusakov✉, **Victoria V. Rakhaeva**

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

✉**Corresponding author:** y.rusakov@rgau-msha.ru

Abstract

The article presents an authoring system of indicators for the balanced development of the grain subcomplex in the Saratov Region, integrating environmental, social, and governance (ESG) criteria. The object of the study is the grain subcomplex of the Saratov Region. A methodology for developing an integral sustainability indicator, adapted to regional specific features, has been designed. The study resulted in the creation and substantiation of a system comprising 15 key ESG indicators, including their weighting coefficients, threshold values, and an integrated ESG index calculation model. This enables a quantitative assessment of the level of balanced development within the subcomplex. Threshold values for the indicators are proposed, along with practical recommendations for implementing a monitoring system. The findings can be applied by agricultural sector authorities for strategic planning and enhancing the competitiveness of regional grain production, in line with global sustainable development trends.

Keywords

ESG principles, grain subcomplex, balanced development, indicators system, sustainable development, Saratov Region, agro-industrial sector

For citation

Rusakov Ya.E., Rakhaeva V.V. System of indicators for balanced development of the grain subcomplex of the Saratov Region incorporating ESG principles. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):195–209.

Введение
Introduction

Современный этап развития российского агропромышленного комплекса характеризуется необходимостью адаптации к новым вызовам глобальной экономики и усиливающимся требованиям к устойчивому развитию. В условиях усиления международных санкций обеспечение продовольственной безопасности как на региональном уровне, так в целом по стране, возможно только на основе импортозамещения и развития растениеводства при государственной поддержке [19]. Стоит отметить, что важную роль также играют изменения конфигурации международных рынков, которая имеет особое значение при переходе к модели развития АПК, основанной на принципах экологической ответственности, социальной справедливости и эффективного корпоративного управления.

Концепция ESG (Environmental, Social, Governance) становится ключевым фактором конкурентоспособности предприятий и отраслей в долгосрочной перспективе [13]. Как отмечают эксперты, ESG-подход станет одним из основополагающих

принципов работы сельскохозяйственной отрасли в ближайшие 5 лет [14]. Это обусловлено не только требованиями международных партнеров, но и внутренней потребностью повышения эффективности использования ресурсов, улучшения качества жизни сельского населения и обеспечения долгосрочной устойчивости агропроизводства.

Зернопродуктовый подкомплекс занимает особое место в структуре АПК России, являясь основой продовольственной безопасности страны и формируя значительную часть экспортного потенциала. Саратовская область, входящая в десятку ведущих зернопроизводящих регионов России, демонстрирует высокие результаты в производстве зерновых культур [14]. Регион занимает первое место в стране по валовому сбору сафлора и лидирующие позиции по производству нута, что подчеркивает его стратегическую важность в обеспечении диверсификации зернового производства. Однако существующие системы оценки эффективности функционирования зернопродуктового подкомплекса ориентированы преимущественно на экономические показатели и не учитывают в полной мере экологические и социальные аспекты развития. Отсутствие комплексной методологии оценки сбалансированного развития с учетом ESG-принципов затрудняет принятие обоснованных управленческих решений и снижает возможности привлечения инвестиций в долгосрочные проекты устойчивого развития [17].

Актуальность разработки системы показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса обусловлена необходимостью создания инструментария для комплексной оценки устойчивости развития, учитывающего региональную специфику и современные требования к ответственному ведению бизнеса в агропромышленном секторе.

Цель исследований: разработка системы показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области с учетом ESG-принципов, обеспечивающей комплексную оценку экологических, социальных и управленческих аспектов устойчивого развития.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

– проанализировать современное состояние и тенденции развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области;

– сформировать методологические основы интеграции ESG-критериев в систему оценки развития продуктовых подкомплексов АПК;

– разработать систему показателей сбалансированного развития по трем направлениям: экологическое (Environmental), социальное (Social) и управленческое (Governance);

– адаптировать предложенную систему показателей к специфическим условиям функционирования зернопродуктового подкомплекса Саратовской области;

– предложить практические рекомендации по внедрению системы мониторинга сбалансированного развития в практику управления региональным АПК.

Методика исследований

Research method

Методологической основой исследований является системный подход к анализу продуктовых подкомплексов агропромышленного производства, позволяющий рассматривать зернопродуктовый подкомплекс как сложную социально-экономическую систему, состоящую из взаимосвязанных элементов различных сфер АПК [4].

В работе применена концепция сбалансированной системы показателей (Balanced Scorecard), адаптированная к специфике агропромышленного производства

и дополненная принципами ESG-оценки. Данный подход обеспечивает комплексность анализа и учет причинно-следственных связей между различными аспектами устойчивого развития.

Методология ESG-оценки в агропромышленном секторе основывается на международных стандартах и лучших практиках, адаптированных к российским условиям [8, 18]. При формировании системы показателей использованы принципы релевантности, измеримости, достижимости, реалистичности и временной определенности (SMART-критерии).

Для определения весовых коэффициентов показателей применен метод экспертных оценок с использованием процедуры попарного сравнения. Нормирование показателей осуществлено методом отношения к эталонному значению с учетом направления воздействия показателя (стимулятор/дестимулятор).

Статистической базой исследований явились данные Федеральной службы государственной статистики, Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Министерства сельского хозяйства Саратовской области, а также отчеты ведущих агропредприятий региона за 2020-2024 гг. Для анализа временных рядов использованы методы трендового анализа и сглаживания.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Саратовская область обладает значительным агроклиматическим потенциалом для развития зернового производства. Регион характеризуется умеренно-континентальным климатом с достаточным количеством тепла и влаги для выращивания основных зерновых культур. Общая площадь сельскохозяйственных угодий составляет 8,4 млн га, из которых на пашню приходится 5,7 млн га.

Зернопродуктовый подкомплекс Саратовской области включает в себя более 1200 сельскохозяйственных организаций, около 3000 крестьянских (фермерских) хозяйств и свыше 300 тыс. личных подсобных хозяйств [15]. Структура производства характеризуется высокой долей пшеницы (около 60% посевных площадей зерновых), а также значительными объемами производства ячменя, подсолнечника и нишевых культур.

Основные показатели развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области в динамике представлены в таблице 1.

Анализ статистических данных показывает значительную волатильность производственных показателей зернопродуктового подкомплекса, что характерно для регионов рискованного земледелия. В 2021 г. Саратовская область заняла второе место в Приволжском федеральном округе по урожаю зерна, собрав 5,5 млн т при урожайности 24,8 ц/га. Неблагоприятные погодные условия 2022 г. привели к существенному снижению урожайности до 13,3 ц/га и валового сбора до 2,9 млн т. Восстановление производства в 2022-2023 гг. подтверждает адаптационные возможности подкомплекса и эффективность применяемых агротехнологий [16].

Анализ показывает стабильность функционирования зернопродуктового подкомплекса при некоторых колебаниях, связанных с погодными условиями. Положительная динамика урожайности свидетельствует о внедрении новых технологий и совершенствовании агротехнических приемов. Рост экспорта зерна подчеркивает конкурентоспособность региональной продукции на международных рынках.

Таблица 1

Основные показатели развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области в 2021-2025 гг. [16]

Table 1

Key indicators for the grain subcomplex development in the Saratov Region in 2021-2025 [16]

Показатель	2021	2022	2023	2024	2025*	Изменение 2021/2020, %	Изменение 2022/2021, %	Изменение 2023/2022, %	Изменение 2024/2023, %
Посевная площадь зерновых, тыс. га	2214,9	2193,8	2252,1	2349,7	2200,0	–0,9	+2,7	+4,3	–6,4
Валовой сбор зерна, тыс. т	5500	2913	6792,5	5925,2	5100	–47,0	+133,2	–12,8	–13,9
Урожай-ность зерновых, ц/га	24,8	13,3	30,2	25,2	23,2	–46,4	+127,1	–16,6	–7,9
Экспорт зерна, тыс. т**	1650	870	2040	1780	1530	–47,3	+134,5	–12,7	–14,0
Рентабель-ность зернового производ-ства, %**	32,1	18,5	41,2	28,7	26,4	–42,4	+122,7	–30,3	–8,0

*Оценочные данные.

**Расчетные данные на основе общероссийских трендов.

Зернопродуктовый подкомплекс как объект управления представляет собой сложную многоуровневую систему, включающую в себя производство средств производства для зернового хозяйства, непосредственно зерновое производство, переработку и реализацию зерна и продуктов его переработки [4]. Специфика подкомплекса определяется его системообразующей ролью в обеспечении продовольственной безопасности и высокой социально-экономической значимостью для развития сельских территорий.

ESG-принципы в агропромышленном производстве приобретают особую актуальность в связи с растущими требованиями к экологической безопасности продуктов питания, социальной ответственности агробизнеса и прозрачности управления [10]. Экологическая составляющая (Environmental) включает в себя вопросы рационального использования природных ресурсов, снижения негативного воздействия на окружающую среду, адаптации к климатическим изменениям. Социальная составляющая (Social) охватывает аспекты трудовых отношений, развития

человеческого капитала, поддержки сельских сообществ. Управленческая составляющая (Governance) предполагает обеспечение прозрачности деятельности, эффективности корпоративного управления, соблюдения этических норм ведения бизнеса.

Методические подходы к построению сбалансированной системы показателей основываются на принципах системности, комплексности, измеримости и практической применимости. Система должна обеспечивать возможность мониторинга ключевых факторов устойчивого развития, выявления проблемных зон и оценки эффективности принимаемых управленческих решений.

На основе анализа теоретических подходов и практики функционирования зернопродуктовых подкомплексов разработана система показателей сбалансированного развития, структурированная по трем группам в соответствии с концепцией ESG.

Экологические показатели (Environmental):

1. Удельная углеродоемкость производства зерна ($тCO_2$-экв/т) – характеризует объем выбросов парниковых газов на единицу произведенной продукции.

2. Водопотребление на единицу продукции ($м^3$/т) – отражает эффективность использования водных ресурсов.

3. Индекс сохранения почвенного плодородия – интегральный показатель, учитывающий содержание гумуса, кислотность почв, обеспеченность элементами питания.

4. Доля органического производства в общем объеме (%) – характеризует переход к экологически безопасным технологиям.

5. Энергоемкость производства (МДж/т) – показатель энергетической эффективности производственных процессов.

Социальные показатели (Social):

1. Уровень занятости в сельских территориях (%) – отражает социально-экономическое воздействие подкомплекса на развитие села.

2. Отношение средней заработной платы к региональному уровню (коэффициент) – характеризует социальную привлекательность отрасли.

3. Коэффициент производственного травматизма (случаев на 1000 работников) – показатель безопасности трудовых условий.

4. Обеспеченность социальной инфраструктурой (интегральный индекс) – учитывает доступность образования, здравоохранения, культуры в сельской местности.

5. Индекс гендерного равенства в управлении – характеризует представленность женщин в органах управления предприятиями подкомплекса.

Управленческие показатели (Governance):

1. Уровень цифровизации производственных процессов (%) – доля процессов, обеспеченных цифровыми технологиями.

2. Доля инновационных технологий в производстве (%) – характеризует технологическую модернизацию.

3. Индекс корпоративной прозрачности – интегральный показатель открытости финансовой и нефинансовой отчетности.

4. Эффективность государственной поддержки (руб. дополнительной выручки на рубль субсидий) – показатель результативности мер государственного регулирования.

5. Индекс соблюдения экологических стандартов – доля предприятий, соответствующих требованиям природоохранного законодательства.

Детализированная структура системы показателей с указанием весовых коэффициентов представлена в таблице 2.

Таблица 2

Система показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса [8, 9, 11]

Table 2

System of indicators for the balanced development of the grain subcomplex [8, 9, 11]

Группа показателей	Показатель	Единица измерения	Направление воздействия	Весовой коэффициент
Экологические (E)	Углеродоемкость производства	тCO_2-экв/т	Дестимулятор	0,08
	Водопотребление	м³/т	Дестимулятор	0,08
	Индекс почвенного плодородия	Индекс (0-1)	Стимулятор	0,12
	Доля органического производства	%	Стимулятор	0,06
	Энергоемкость производства	МДж/т	Дестимулятор	0,06
Социальные (S)	Уровень занятости	%	Стимулятор	0,10
	Отношение з/п к региональному уровню	Коэффициент	Стимулятор	0,08
	Коэффициент травматизма	Случаев/1000 чел.	Дестимулятор	0,04
	Социальная инфраструктура	Индекс (0-1)	Стимулятор	0,06
	Индекс гендерного равенства	Индекс (0-1)	Стимулятор	0,02
Управленческие (G)	Уровень цифровизации	%	Стимулятор	0,10
	Доля инноваций	%	Стимулятор	0,08
	Корпоративная прозрачность	Индекс (0-1)	Стимулятор	0,06
	Эффективность господдержки	Руб./руб.	Стимулятор	0,04
	Экологические стандарты	%	Стимулятор	0,02

Предложенная система показателей обеспечивает комплексную оценку всех аспектов устойчивого развития зернопродуктового подкомплекса с учетом их относительной значимости для региональных условий.

Для комплексной оценки сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса разработана интегральная модель, основанная на агрегировании нормированных частных показателей с учетом их весовых коэффициентов.

Формула расчета интегрального показателя имеет вид (1):

$$I_{ESG} = w_E \times I_E + w_S \times I_S + w_G \times I_G, \quad (1)$$

где I_{ESG} – интегральный показатель сбалансированного развития;

– I_E, I_S, I_G – субиндексы экологической, социальной и управленческой устойчивости;

– w_E, w_S, w_G – весовые коэффициенты групп показателей (0,4; 0,3; 0,3 соответственно).

Субиндексы рассчитываются как средневзвешенное значение нормированных показателей соответствующей группы (2):

$$I_k = \Sigma(w_i \times x_{inorm}), \quad (2)$$

где w_i – вес i-го показателя в группе k; x_{inorm} – нормированное значение i-го показателя.

Нормирование показателей-стимуляторов (3) –

$$x_{inorm} = x_i/x_{imax.} \quad (3)$$

Нормирование показателей-дестимуляторов (4) –

$$x_{inorm} = x_{imin}/x_{i.} \quad (4)$$

Для практического применения разработанной методологии определены пороговые значения интегрального показателя, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Пороговые значения показателей устойчивого развития для зернопродуктового подкомплекса Саратовской области
(разработано авторами)

Table 3

Threshold values for sustainable development indicators in the grain subcomplex of the Saratov Region [the authors' development]

Уровень устойчивости	Интегральный показатель I_{ESG}	Характеристика
Критический	< 0,4	Неустойчивое развитие, высокие риски
Низкий	0,4-0,55	Ограниченная устойчивость, необходимы корректирующие меры
Средний	0,55-0,7	Умеренная устойчивость, возможности для улучшения
Высокий	0,7-0,85	Высокая устойчивость, эффективное развитие
Эталонный	> 0,85	Сбалансированное устойчивое развитие

Представленная градация уровней устойчивости позволяет не только диагностировать текущее состояние подкомплекса, но и определить целевые ориентиры для стратегического планирования.

Разработанная модель позволяет не только оценить текущий уровень устойчивости, но и выявить проблемные области, требующие первоочередного внимания, а также отслеживать динамику изменений во времени. Концептуальная схема взаимосвязи элементов системы показателей представлена на рисунке 1.

Стратегические направления ESG-развития зернопродуктового подкомплекса отражены на рисунке 2.

Представленная стратегическая карта демонстрирует причинно-следственные связи между различными аспектами устойчивого развития и обеспечивает основу для формирования долгосрочной стратегии развития подкомплекса.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость исследований заключается в развитии теории устойчивого развития применительно к продуктовым подкомплексам агропромышленного производства. Впервые предложена комплексная методология интеграции ESG-принципов в систему оценки функционирования зернопродуктового подкомплекса на региональном уровне. Разработанный подход расширяет научно-методический инструментарий исследования сложных социально-экономических систем АПК и может быть адаптирован для других продуктовых подкомплексов и регионов.

Исследования вносят вклад в развитие региональной экономики через обоснование специфических факторов устойчивого развития территориальных агропромышленных систем. Предложенная система показателей учитывает не только экономические, но и экологические, и социальные аспекты развития, что соответствует современным трендам перехода к модели устойчивого развития.

Рис. 1. Концептуальная модель системы показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса (разработано авторами)

Figure 1. Conceptual model of the system of indicators for the balanced development of the grain subcomplex [the authors' development]

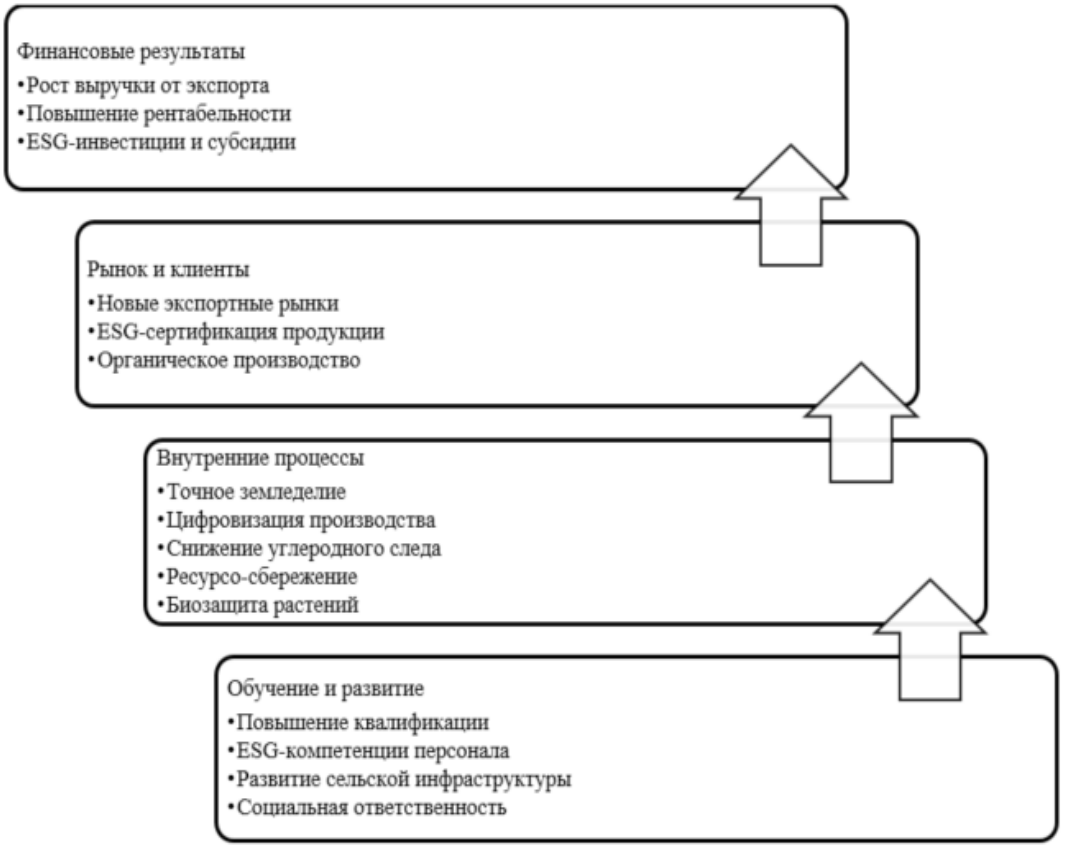

Рис. 2. Стратегическая карта ESG-развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области 2025-2030 гг. (разработано авторами)

Figure 2. Strategic map of ESG development of the grain subcomplex in the Saratov region for 2025-2030 [the authors' development]

Практическая значимость исследований определяется возможностью использования разработанной системы показателей органами управления АПК различных уровней для решения следующих задач:

1. Стратегическое планирование развития – система обеспечивает информационную основу для разработки долгосрочных программ развития зернопродуктового подкомплекса с учетом принципов устойчивости.

2. Мониторинг и контроль – регулярная оценка показателей позволяет отслеживать динамику развития, выявлять негативные тенденции и своевременно корректировать управленческие воздействия.

3. Распределение государственной поддержки – интегральная оценка устойчивости может служить критерием при принятии решений о предоставлении субсидий и льгот предприятиям подкомплекса.

4. Инвестиционное планирование – система показателей обеспечивает прозрачность оценки инвестиционной привлекательности проектов развития зернового производства для частных инвесторов и финансовых институтов.

5. Бенчмаркинг и рейтингование – методология может быть использована для сравнительной оценки эффективности функционирования зернопродуктовых подкомплексов различных регионов России.

Внедрение системы мониторинга сбалансированного развития создает предпосылки для повышения конкурентоспособности регионального зернового производства в условиях растущих требований международных рынков к соблюдению принципов устойчивого развития и корпоративной социальной ответственности.

Выводы
Conclusions

Проведенные исследования позволили разработать комплексную систему показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области, интегрирующую принципы ESG-оценки с учетом региональной специфики. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Обоснованы актуальность и необходимость перехода к модели устойчивого развития зернопродуктовых подкомплексов в условиях современных вызовов глобальной экономики и усиливающихся требований к экологической и социальной ответственности агробизнеса.

2. Разработана методологическая основа формирования системы показателей сбалансированного развития, основанная на интеграции концепции сбалансированной системы показателей с принципами ESG-оценки, адаптированными к специфике агропромышленного производства.

3. Сформирована система из 15 ключевых показателей, структурированных по трем группам (экологические, социальные, управленческие), с определением весовых коэффициентов и пороговых значений для Саратовской области.

4. Предложена интегральная модель оценки устойчивого развития, позволяющая получить комплексную характеристику состояния зернопродуктового подкомплекса и выявить приоритетные направления совершенствования.

5. Определена теоретическая и практическая значимость разработанной системы показателей для стратегического планирования, мониторинга и управления развитием зернопродуктового подкомплекса на региональном уровне.

Результаты исследований создают научно-методическую основу для перехода зернопродуктового подкомплекса Саратовской области к модели устойчивого развития, соответствующей современным требованиям ответственного ведения агробизнеса. Внедрение предложенной системы мониторинга будет способствовать повышению конкурентоспособности регионального зернового производства на национальном и международном рынках.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку цифровой платформы мониторинга показателей устойчивого развития, создание методики бенчмаркинга зернопродуктовых подкомплексов различных регионов России, а также адаптацию предложенного подхода к другим продуктовым подкомплексам АПК.

Список источников

1. Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 12 апреля 2020 г. № 993-р // *Консультант Плюс*. URL: https://docs.cntd.ru/document/564654448 (дата обращения: 30.12.2025).

2. О развитии сельского хозяйства: Федеральный закон от 29 декабря 2006 г. № 264-ФЗ, ред. от 25 декабря 2023 г. // *Консультант Плюс*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64930/ (дата обращения: 30.12.2025).

3. Государственная программа «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области» на 2019-2025 годы // *Официальный сайт Министерства сельского хозяйства Саратовской области*. URL: https://www.minagro.saratov.gov.ru/gosprogram²013_2020.php (дата обращения: 30.12.2025).

4. Амирова Э.Ф. Теоретические вопросы определения сущности зернопродуктового подкомплекса АПК // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2025. № 4(38). С. 5–9. https://doi.org/10.12737/17607

5. Брызгалина М.А., Лексина А.А. Модель механизма формирования и развития экспортно-ориентированного кластера зернопродуктового подкомплекса региона // *АПК*: *Экономика, управление*. 2023. № 9. С. 92–106. https://doi.org/10.33305/239-92

6. Волохова М.А. Методика выявления и оценки параметров кластера зернопродуктового подкомплекса в агломерационных микрозонах // *АПК*: *Экономика, управление*. 2023. № 6. С. 62–72. https://doi.org/10.33305/236-62

7. Брызгалина М.А., Лексина А.А., Брызгалин Т.В. Механизм государственной поддержки развития промышленного производства для экспорта готовой продукции зернопродуктового подкомплекса региона // *АПК*: *Экономика, управление*. 2023. № 6. С. 88–98. https://doi.org/10.33305/236-88

8. Зайцев А.Г., Хапилина С.И. Перспективы развития концепции ESG в условиях АПК // *Вестник аграрной науки*. 2022. № 2 (95). С. 120–125. https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.2.120

9. Трухачев В.И., Хоружий Л.И., Александров Д.С., Анисимова А.В. и др. *Зеленая экономика в контексте устойчивого развития агропромышленного комплекса*: Монография. Т. 1. Социально-экономические тенденции и информационно-аналитические инструменты развития АПК России в условиях зеленой экономики. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 564 с. EDN: NDXCCR

10. Бабанская А.С., Коломеева Е.С. Сравнительный анализ эффективности организаций растениеводства с учетом экологических характеристик // *Экономика сельского хозяйства России*. 2024. № 9. С. 16–24. https://doi.org/10.32651/229-16

11. ESG-подход станет основным принципом развития российского АПК // *Сфера*. 2025. URL: https://sfera.fm/news/esg-podkhod-stanet-osnovnym-printsipom-razvitiya-rossiiskogo-apk (дата обращения: 29.12.2025).

12. Концепция ESG и ее применимость в АПК России // *Панорама*. 2025. № 6. URL: https://panor.ru/articles/kontseptsiya-esg-i-ee-primenimost-v-apk-rossii/113692.html (дата обращения: 29.12.2025).

13. Внедрение ESG-практик в агросекторе по-прежнему актуально – эксперты // *Specagro*. 2023. URL: https://specagro.ru/news/202304/vnedrenie-esg-praktik-v-agrosektore-po-prezhnemu-aktualno-eksperty (дата обращения: 29.12.2025).

14. Саратовская область стала лидером по сбору нишевых агрокультур в 2024 году // *МК Саратов*. 2025. URL: https://saratov.mk.ru/social/2025/07/22/saratovskaya-oblast-stala-liderom-po-sboru-nishevykh-agrokultur-v-2024-godu.html (дата обращения: 28.12.2025).

15. Сельскохозяйственный потенциал Саратовской области // *Центр развития Саратовской агломерации.* 2024. URL: https://саратовская-агломерация.рф/

agglomerations/aglomeratsii/saratovskaya-aglomeratsiya/selskoe-khozyaystvo/ (дата обращения: 28.12.2025).

16. Сельское хозяйство Саратовской области. 2024: Статистический сборник // *Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Саратовской области.* Саратов, 2025. URL: https://64.rosstat.gov.ru/publication_collection/document/38433 (дата обращения: 03.03.2025).

17. Каткова Е.А., Русаков Я.Е., Катков Ю.Н. Развитие агробизнеса в Саратовской области: перспективы повышения экономической устойчивости фермерских хозяйств // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2024. № 6. С. 191–202. https://10.26897/0021-342X-2024-6-191-202

18. Сергеева Н.В., Рахаева В.В., Трясцина Н.Ю., Ковалева Е.В. и др. *Ресурсный потенциал устойчивого развития сельского хозяйства*. Москва: ИКЦ «Эксперт», 2023. 156 с. EDN: JBFYYS

19. Минаков И.А. Перспективы импортозамещения на региональном агропродовольственном рынке // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2017. № 1. С. 98–105. EDN: ZDWQAX

References

1. On approval of the Strategy for the development of the Agro-Industrial and Fisheries Complexes of the Russian Federation for the period up to 2030: Decree of the Government of the Russian Federation dated April 12, 2020 No. 993-r. *Consultant Plus*. (In Russ.) URL: https://docs.cntd.ru/document/564654448 (accessed: December 30, 2025).

2. On the development of agriculture: Federal Law dated December 29, 2006 No. 264-FZ (as amended on December 25, 2023). *Consultant Plus*. (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64930/ (accessed: December 30, 2025).

3. The State program “Development of agriculture and regulation of agricultural products, raw materials and food markets in the Saratov Region” for 2019-2025. *Official website of the Ministry of Agriculture of the Saratov Region*. URL: https://www.minagro.saratov.gov.ru/gosprogram²013_2020.php (accessed: December 30, 2025).

4. Amirova E.F. Theoretical questions of defining the essence of grain products subcomplex of agroindustry. *Vestnik of Kazan State Agrarian University.* 2015;10(4(38)):5-9. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/17607

5. Leksina A.A., Bryzgalina M.A. A model of the mechanism for the formation and development of an export-oriented cluster of a grain-product subcomplex of the region. *AIC*: *Economics, Management*. 2023;(9):92-106. (In Russ.) https://doi.org/10.33305/239-92

6. Volokhova M.A. Methodology for identifying and evaluating cluster parameters grain product subcomplex in agglomeration microzones. *AIC*: *Economics, Management.* 2023;(6):62-72. (In Russ.) https://doi.org/10.33305/236-62

7. Bryzgalina M.A., Leksina A.A., Bryzgalin T.V. The mechanism of state support for the development of industrial grain processing to increase export of finished products. *AIC*: *Economics, Management.* 2023;(6):88-98. (In Russ.) https://doi.org/10.33305/236-88

8. Zaitsev A.G., Khapilina S.I. Prospects for the development of the ESG concept in the agro-industrial complex. *Bulletin of Agrarian Science*. 2022;(2(95)):120-125. (In Russ.) https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.2.120

9. Trukhachev V.I., Khoruzhy L.I., Aleksanov D.S., Anisimova A.V. et. al. *Green economy in the context of sustainable development of the agro-industrial sector*: a monograph. Vol. 1. *Socio-economic trends and information and analytical tools for the development of the Russian agro-industrial complex in a green economy*. Moscow, Russia: I P R Media, 2023:564. (In Russ.)

10. Babanskaya A.S., Kolomeeva E.S. Comparative analysis of the effectiveness of crop production organizations taking into account environmental characteristics. *Economics of Agriculture of Russia*. 2024;(9):16-24. (In Russ.) https://doi.org/10.32651/229-16

11. The ESG approach will become the main principle of the development of the Russian agro-industrial sector. *Sphere*. (In Russ.) URL: https://sfera.fm/news/esg-podkhod-stanet-osnovnym-printsipom-razvitiya-rossiiskogo-apk (accessed: December 29, 2025).

12. The ESG concept and its applicability in the Russian agro-industrial sector. *Panorama.* 2025;(6). (In Russ.) URL: https://panor.ru/articles/kontseptsiya-esg-i-ee-primenimost-v-apk-rossii/113692.html (accessed: December 29, 2025).

13. Introduction of ESG practices in the agricultural sector is still relevant – experts. *Specagro.* 2023. (In Russ.) URL: https://specagro.ru/news/202304/vnedrenie-esg-praktik-v-agrosektore-po-prezhnemu-aktualno-eksperty (accessed: December 29, 2025).

14. Saratov Region became the leader in collecting niche agricultural crops in 2024. *MK Saratov*. (In Russ.) URL: https://saratov.mk.ru/social/2025/07/22/saratovskaya-oblast-stala-liderom-po-sboru-nishevykh-agrokultur-v-2024-godu.html (accessed: December 28, 2025).

15. Agricultural potential of the Saratov Region. *Tsentr razvitiya Saratovskoy aglomeratsii*. 2024. (In Russ.) URL: https://саратовская-агломерация.рф/agglomerations/aglomeratsii/saratovskaya-aglomeratsiya/selskoe-khozyaystvo/ (accessed: December 28, 2025).

16. Agriculture of the Saratov Region. 2024: statistics digest. *Territorialniy organ Federalnoy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po Saratovskoy oblasti,* Saratov, Russia, 2025. (In Russ.) URL: https://64.rosstat.gov.ru/publication_collection/document/38433 (accessed: March 03, 2025).

17. Katkova E.A., Rusakov Y.E., Katkov Y.N. Agribusiness development in the Saratov Region: prospects for improving the economic sustainability of farms. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2024;(6):191-202. (In Russ.) https://10.26897/0021-342X-2024-6-191-202

18. Sergeeva N.V., Rakhaeva V.V., Tryashtsina N.Yu., Kovaleva E.V. et al. *The resource potential of sustainable agricultural development*: a monograph. Moscow, Russia: IKTs “Expert”, 2023:56. (In Russ.)

19. Minakov I.A. Prospects of import substitution at the regional agro-food market. *The Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2017;(1):98-105. (In Russ.)

Сведения об авторах

Русаков Ярослав Евгеньевич, аспирант кафедры экономической безопасности и права, 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: y.rusakov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0009-0005-4129-2809

Рахаева Виктория Владимировна, канд. экон. наук, доцент кафедры экономической безопасности и права, 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: v_rahaeva@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8033-3416

Information about the authors

Yaroslav E. Rusakov, postgraduate student of the Department of Economic Security and Law, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: y.rusakov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0009-0005-4129-2809

Victoria V. Rakhaeva, CSc (Econ), Associate Professor at the Department of Economic Security and Law, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: v_rahaeva@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8033-3416

Научная статья
УДК 338.43:633.1(470.620)+339.564
DOI 10.26897/0021-342X-2026-2-210-225

ЭКОНОМИКА

Методология оценки экспортного потенциала зернового кластера

Дмитрий Геннадьевич Сергеев[1], Людмила Ивановна Хоружий[1], Константин Анатольевич Лебедев[1,2]✉, Ольга Евгеньевна Лебедева[2]

[1]Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[2]Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

✉**Автор, ответственный за переписку:** k.lebedev@rgau-msha.ru

Аннотация
Статья содержит разработанную методологию оценки экспортного потенциала зернового кластера, которая базируется на интеграции 5 функциональных блоков, включающих в себя производственно-ресурсные, логистико-инфраструктурные, рыночно-конъюнктурные, институциональные и финансово-инвестиционные показатели. Для количественного измерения предложен интегральный показатель, рассчитываемый путем нормализации частных индикаторов с последующим суммированием с весовыми коэффициентами. Апробация разработанного инструментария на материалах Краснодарского края позволила отнести регион к категории высокого экспортного потенциала. В ходе анализа выявлены ключевые ограничения, среди которых – значительный износ основных фондов, высокая доля элеваторных мощностей, эксплуатируемых с превышением нормативных сроков, а также недостаточная диверсификация экспортных рынков. Результаты сценарного моделирования показали, что реализация оптимистического сценария, предполагающего расширение портовых мощностей, модернизацию элеваторного хозяйства и повышение обеспеченности минеральными удобрениями, способна существенно увеличить интегральный показатель к 2030 г. Обоснована возможность реинвестирования части экспортной выручки в развитие агротуризма как перспективного направления диверсификации сельской экономики, что позволяет снизить зависимость сельских территорий от ценовой конъюнктуры мирового зернового рынка.

Ключевые слова
зерновой кластер, экспортный потенциал, методология, оценка, региональная экономика, экономика, сельское хозяйство

Для цитирования
Сергеев Д.Г., Хоружий Л.И., Лебедев К.А., Лебедева О.Е. Методология оценки экспортного потенциала зернового кластера // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2026. № 2. С. 210–225.

Methodology for assessing the export potential of a grain cluster

Dmitry G. Sergeev[1], Liudmila I. Khoruzhy[1], Konstantin A. Lebedev[1, 2]✉, Olga E. Lebedeva[2]

[1]Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
[2]Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

✉**Corresponding author:** k.lebedev@rgau-msha.ru

Abstract
The article develops a methodology for assessing the export potential of a grain cluster. The methodology is based on the integration of five functional blocks, which include production and resource indicators, logistics and infrastructure indicators, market and economic conjuncture indicators, institutional indicators, and financial and investment indicators. For quantitative measurement, an integral indicator is proposed. It is calculated by normalizing partial indicators and then summing them up with weighting coefficients. The testing of the developed tools on the materials of the Krasnodar Territory allowed classifying the region as high export potential. The analysis revealed key limitations, including significant depreciation of fixed assets, a high proportion of elevator facilities operated in excess of standard deadlines, as well as insufficient diversification of export markets. Scenario modelling results showed that implementing an optimistic scenario, which involves expanding port facilities, modernising the elevator infrastructure, and increasing the supply of mineral fertilizers, could significantly boost the integral indicator by 2030. The study also justifies the possibility of reinvesting a portion of export revenues into the development of agritourism as a promising avenue for diversifying the rural economy. This approach can help reduce the dependence of rural areas on price fluctuations in the global grain market.

Keywords
grain cluster, export potential, methodology, assessment, regional economy, economics, agriculture

For citation
Sergeev D.G., Khoruzhy L.I., Lebedev K.A., Lebedeva O.E. Methodology for assessing the export potential of a grain cluster. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy.* 2026;(2):210–225.

Введение
Introduction

Современное развитие агропромышленного комплекса Краснодарского края характеризуется устойчивым трендом на увеличение экспортных поставок зерновых, что обусловлено как благоприятной конъюнктурой мирового рынка, так и целенаправленной государственной политикой по стимулированию экспорта.

Краснодарский край, традиционно занимающий лидирующие позиции в производстве зерна, сталкивается с необходимостью не только наращивать валовые сборы, но и выстраивать системную работу по повышению конкурентоспособности своей продукции на внешних рынках. При этом в условиях усиления геополитической напряженности, трансформации глобальных продовольственных цепочек и ужесточения требований к качеству сельскохозяйственной продукции вопросы объективной оценки экспортного потенциала региональных зерновых кластеров приобретают особую значимость.

Ключевым становится не просто количественное измерение возможных объемов вывоза, но выявление структурных диспропорций, сдерживающих реализацию имеющегося потенциала. При этом теоретические и прикладные аспекты формирования и функционирования экспортно-ориентированных зерновых кластеров находят отражение в работах многих исследователей.

Д.А. Зюкин и И.А. Глушков обосновывают, что развитое зерновое хозяйство выступает базовым условием крупнотоварного сельскохозяйственного производства, однако само по себе наличие высоких валовых сборов не гарантирует успешной экспортной экспансии [1]. В развитие данных идей А.П. Несмыслёнов разрабатывает организационно-экономический механизм формирования экспортно-ориентированного кластера зернопродуктового подкомплекса в регионе, подчеркивая необходимость синхронизации производственных и логистических мощностей [2]. Автор справедливо указывает, что эффективность экспортной деятельности напрямую зависит от степени интеграции участников кластера и координации их усилий.

Значительный вклад в развитие методологических подходов к оценке кластерных структур вносят Д.В. Проскура, М.Л. Нечаева, Т.Н. Кутаева и А.А. Кутаев, предлагающие развернутую систему анализа зерновой отрасли на основе кластерного подхода [3]. Их разработки позволяют рассматривать зерновой кластер как сложную систему взаимосвязанных элементов, каждый из которых вносит вклад в формирование экспортного потенциала. В то же время, как отмечает Ш.М. Илмуратов, критерии деятельности зерновых кластеров должны включать в себя не только производственные, но и рыночные параметры, отражающие способность адаптироваться к изменениям внешней конъюнктуры [4].

Важным аспектом реализации экспортного потенциала выступает инвестиционное обеспечение развития отрасли. В.В. Еремин в своем исследовании показывает, что использование мультипликатора инвестиций позволяет снизить риски формирования ресурсного потенциала региона и повысить эффективность капиталовложений в инфраструктурные проекты [5]. При этом, по мнению К.В. Харченко, совершенствование кластерного ландшафта региона выступает ключевым фактором обеспечения экономической безопасности, что особенно актуально в условиях внешнего санкционного давления [6].

Особый интерес для настоящих исследований представляют работы, посвященные оценке пространственного развития агропромышленного комплекса. Е.А. Алешина и Д.В. Сердобинцев обосновывают необходимость пространственного развития АПК на основе оценки конкурентоспособности регионов и формирования экспортно-ориентированных зернопродуктовых кластеров [7]. В развитие этих идей К.В. Харченко разрабатывает методологические основы рейтингования умных территорий, что позволяет учитывать не только экономические, но и социально-экологические факторы при оценке потенциала регионов [8].

Не менее важным направлением выступает институциональное обеспечение экспортной деятельности. При этом Е.Р. Безсмертная анализирует российские инициативы в области устойчивого развития агломераций и территорий, подчеркивая необходимость корректировки подходов к управлению с учетом современных вызовов [9]. В то же время А.А. Ткаченко акцентирует внимание на том, что обеспечение достойного уровня жизни населения невозможно без создания новых источников занятости, что особенно важно для сельских территорий, задействованных в зерновом производстве [10].

Таким образом, анализ научной литературы свидетельствует о наличии значительного массива исследований, посвященных отдельным аспектам формирования и функционирования зерновых кластеров. Однако комплексные методологические подходы к оценке экспортного потенциала, учитывающие производственные, логистические, рыночные, институциональные и инвестиционные факторы в их взаимосвязи, разработаны недостаточно.

Большинство работ ориентировано либо на макроэкономические закономерности, либо на узкие технологические аспекты, что не позволяет сформировать целостный инструментарий для практического применения на региональном уровне. Кроме того, вопросы реинвестирования экспортной выручки в диверсификацию сельской экономики, в том числе развитие агротуризма, остаются за рамками традиционных подходов к оценке экспортного потенциала.

Цель исследований: разработка методологического подхода к оценке экспортного потенциала зернового кластера региона, учитывающего производственные, логистические, рыночные, институциональные и инвестиционные факторы в их взаимосвязи, и его апробации на материалах Краснодарского края с обоснованием направлений использования экспортной выручки для диверсификации сельской экономики.

Методика исследований
Research method

Теоретико-методологической основой работы явились положения системного подхода, в рамках которого зерновой кластер рассматривается как сложная многоуровневая структура, объединяющая производственные, логистические, рыночные и управленческие подсистемы, взаимодействие которых определяет эффективность экспортной деятельности.

Методология исследований базируется на принципах кластерного анализа, предполагающих выявление устойчивых связей между участниками производственной цепочки, а также на методах экономико-статистического моделирования, позволяющих количественно оценить вклад каждого фактора в формирование экспортного потенциала.

Для оценки пространственной дифференциации использованы методы сравнительного анализа, в качестве объектов сравнения выбраны регионы – лидеры зернового экспорта: Краснодарский край, Ростовская область и Ставропольский край. При этом количественная оценка динамики показателей осуществлялась на основе данных за период 2020-2024 гг. с применением методов трендового анализа и сценарного прогнозирования.

Информационное обеспечение исследований составили данные Федеральной службы государственной статистики о валовых сборах зерновых культур, структуре посевных площадей, объемах инвестиций в основной капитал и показателях финансово-хозяйственной деятельности сельскохозяйственных организаций Краснодарского края, Ростовской области и Ставропольского края. Дополнительно использованы материалы Министерства сельского хозяйства Российской Федерации о реализации государственных программ поддержки экспортно-ориентированных производителей, данные отраслевых агентств о ценовой конъюнктуре мирового рынка зерна, а также сведения о мощности портовых терминалов и состоянии элеваторного хозяйства, полученные из специализированных отраслевых обзоров.

Для верификации разработанной методологии проведена апробация на материалах Краснодарского края с использованием временных рядов за последние 5 лет. При этом ядром авторского методического подхода выступает система из 5 функциональных блоков, каждый из которых характеризует определенную сторону экспортной деятельности.

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

Разработанная методология оценки экспортного потенциала зернового кластера базируется на интеграции 5 функциональных блоков, каждый из которых характеризует определенную сторону экспортной деятельности. Первый

блок (производственно-ресурсный) включает в себя показатели валового сбора зерновых, урожайности, посевных площадей, обеспеченности минеральными удобрениями и средствами защиты растений. Второй блок (логистико-инфраструктурный) отражает мощность портовых терминалов, наличие и состояние элеваторных мощностей, пропускную способность железнодорожных путей и автомобильных подъездных путей к местам отгрузки. Третий блок (рыночно-конъюнктурный) включает в себя индикаторы ценовой конъюнктуры мирового рынка, курсовой динамики, спроса со стороны импортеров и уровня конкуренции на целевых рынках. Четвертый блок (институциональный) характеризует меры государственной поддержки экспортеров, наличие межправительственных соглашений, уровень административных барьеров и эффективность работы институтов развития. Пятый блок (финансово-инвестиционный) отражает доступность кредитных ресурсов, инвестиционную активность в отрасли, уровень износа основных фондов и рентабельность экспортных операций.

Для количественной оценки экспортного потенциала нами предложен интегральный показатель, рассчитываемый на основе нормализации частных индикаторов с последующим суммированием с весовыми коэффициентами. При этом нормализация осуществляется по формуле минимаксного преобразования, приводящей значения разнородных показателей к единой шкале от 0 до 1:

$$I_{norm} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

где x_i – фактическое значение показателя для оцениваемого региона; x_{min} и x_{max} – минимальное и максимальное значения показателя среди сравниваемых объектов (в качестве базы сравнения выступают регионы – лидеры зернового экспорта: Краснодарский край, Ростовская область, Ставропольский край).

Для показателей, имеющих обратную зависимость (уровень износа основных фондов, административные барьеры), применяется обратное преобразование:

$$I_{norm}^{rev} = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (2)$$

Интегральный показатель экспортного потенциала (E) предлагаем рассчитывать как сумму взвешенных нормализованных значений по всем блокам:

$$E = \sum_{j=1}^{5} \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} \cdot I_{norm,\,jk}, \quad (3)$$

где j – номер функционального блока; k – номер индикатора в блоке; w_{jk} – весовой коэффициент индикатора, определяемый экспертным методом на основе оценок профильных специалистов.

Весовые коэффициенты распределены следующим образом: производственно-ресурсный блок – 0,25; логистико-инфраструктурный – 0,30; рыночно-конъюнктурный – 0,20; институциональный – 0,15; финансово-инвестиционный – 0,10. Такое распределение отражает приоритетность факторов, наиболее существенно влияющих на реализацию экспортного потенциала в современных условиях.

В ходе апробации разработанной методологии на материалах Краснодарского края было установлено, что производственно-ресурсный потенциал Краснодарского края оценивается как высокий: валовой сбор зерновых в среднем за 2023-2025 гг. составил 12,4 млн т, а урожайность озимой пшеницы достигла 62,5 ц/га на орошаемых землях (табл. 1, 2).

Таблица 1

Система индикаторов оценки экспортного потенциала зернового кластера Краснодарского края

Table 1

System of indicators for assessing the export potential of the grain cluster of the Krasnodar Territory

Блок/Показатель	Обозначение	Весовой коэффициент	Значение (2024 г.)
Производственно-ресурсный блок			
Валовой сбор зерновых, млн т	x_{11}	0,10	12,4
Урожайность озимой пшеницы, ц/га	x_{12}	0,08	62,5
Посевные площади зерновых, тыс. га	x_{13}	0,04	1980,0
Обеспеченность минеральными удобрениями, кг д.в/га	x_{14}	0,03	48,0
Логистико-инфраструктурный блок			
Мощность портовых терминалов, млн т/год	x_{21}	0,12	18,5
Доля элеваторов со сроком службы более 30 лет, %	x_{22}	0,08	45,0
Пропускная способность ж/д путей, тыс. т/сут.	x_{23}	0,06	35,0
Потери зерна при хранении и транспортировке, %	x_{24}	0,04	3,2
Рыночно-конъюнктурный блок			
Доля экспорта в валовом сборе, %	x_{31}	0,08	55,0
Индекс диверсификации экспортных рынков (1-10)	x_{32}	0,06	4,2
Коэффициент ценовой волатильности (отн. ед.)	x_{33}	0,04	0,35
Уровень конкуренции на целевых рынках, балл	x_{34}	0,02	6,8
Институциональный блок			
Интегральный индекс господдержки (отн. ед.)	x_{41}	0,07	0,68
Уровень административных барьеров, балл	x_{42}	0,05	4,2
Наличие межправительственных соглашений (количество стран)	x_{43}	0,03	12,0
Финансово-инвестиционный блок			
Инвестиции в основной капитал, млрд руб/год	x_{51}	0,04	18,5
Уровень износа основных фондов, %	x_{52}	0,03	58,0
Рентабельность экспортных операций, %	x_{53}	0,03	14,2

Таблица 2

Нормализованные значения индикаторов экспортного потенциала Краснодарского края

Table 2

Normalized values of export potential indicators of the Krasnodar Territory

Блок/Показатель	Значение Краснодарского края	x_{min}	x_{max}	Нормализованное значение
Производственно-ресурсный блок				
Валовой сбор зерновых, млн т	12,4	5,2 (СК)	12,4 (КК)	1,00
Урожайность озимой пшеницы, ц/га	62,5	48,0 (СК)	62,5 (КК)	1,00
Посевные площади зерновых, тыс. га	1980,0	1100,0 (СК)	1980,0 (КК)	1,00
Обеспеченность удобрениями, кг д.в/га	48,0	42,0 (СК)	55,0 (РО)	0,46
Итого по блоку с весами				0,93
Логистико-инфраструктурный блок				
Мощность портовых терминалов, млн т/год	18,5	12,0 (СК)	18,5 (КК)	1,00
Доля элеваторов со сроком службы более 30 лет, %	45,0	35,0 (РО)	55,0 (СК)	0,50
Пропускная способность ж/д путей, тыс. т/сут.	35,0	25,0 (СК)	42,0 (РО)	0,59
Потери зерна при хранении, %	3,2	2,5 (РО)	4,5 (СК)	0,65
Итого по блоку с весами				0,77
Рыночно-конъюнктурный блок				
Доля экспорта в валовом сборе, %	55,0	32,0 (СК)	58,0 (РО)	0,88
Индекс диверсификации рынков (1-10)	4,2	3,5 (РО)	5,2 (СК)	0,41
Коэффициент ценовой волатильности	0,35	0,25 (РО)	0,45 (СК)	0,50
Уровень конкуренции, балл	6,8	5,0 (РО)	8,0 (СК)	0,40
Итого по блоку с весами				0,66

Окончание табл. 2

Блок/Показатель	Значение Краснодарского края	x_{min}	x_{max}	Нормализованное значение
Институциональный блок				
Интегральный индекс господдержки	0,68	0,55 (СК)	0,72 (РО)	0,76
Уровень административных барьеров, балл	4,2	3,5 (РО)	5,0 (СК)	0,53
Наличие межправительственных соглашений (кол-во стран)	12,0	8,0 (РО)	12,0 (КК)	1,00
Итого по блоку с весами				0,74
Финансово-инвестиционный блок				
Инвестиции в основной капитал, млрд руб.	18,5	12,0 (СК)	20,5 (РО)	0,72
Уровень износа основных фондов, %	58,0	48,0 (РО)	62,0 (СК)	0,29
Рентабельность экспортных операций, %	14,2	12,0 (РО)	15,5 (СК)	0,69
Итого по блоку с весами				0,61

Примечание. В скобках указан регион-эталон для минимального и максимального значения (КК – Краснодарский край, РО – Ростовская область, СК – Ставропольский край).

Однако анализ динамики показателей показывает, что прирост валовых сборов в последние годы достигался преимущественно за счет экстенсивных факторов – расширения посевных площадей, тогда как интенсивные факторы (рост урожайности) практически исчерпали свой потенциал. Это подтверждается данными о замедлении темпов внедрения высокопродуктивных сортов и недостаточной обеспеченности минеральными удобрениями (48 кг д.в/га), что на 15-20% ниже уровня, характерного для стран – лидеров зернового экспорта (Франция, Германия). При этом расчетная оценка показывает, что увеличение обеспеченности удобрениями до 70 кг д.в/га позволило бы повысить урожайность на 8-10 ц/га, что эквивалентно дополнительному сбору порядка 1,6-2,0 млн т.

Логистико-инфраструктурный блок выявил наиболее существенные ограничения. При этом мощность портовых терминалов в Краснодарском крае оценивается в 18,5 млн т в год, что при существующих объемах производства (12,4 млн т) создает определенный резерв, однако в пиковые периоды отгрузок (июль-сентябрь) возникают очереди и простои.

Кроме того, значительная часть элеваторных мощностей (45% со сроком службы более 30 лет) эксплуатируется с превышением нормативных сроков, что приводит к потерям зерна при хранении, достигающим 3,2% от общего объема. В то же время

на примере Краснодарского края видим, что диспропорция между растущими объемами производства и ограниченными возможностями отгрузки приводит к росту логистических издержек и снижению конкурентоспособности. Кроме того, расчетная оценка показывает, что сокращение доли изношенных элеваторов до 25% позволило бы снизить потери при хранении до 2,0-2,2%, что эквивалентно дополнительному экспортному потенциалу в размере 0,4-0,5 млн т.

Рыночно-конъюнктурный блок продемонстрировал высокую чувствительность экспортного потенциала региона к внешним факторам. Анализ ценовой динамики за период 2020-2024 гг. показывает, что колебания мировых цен на пшеницу достигали 30-40% в годовом исчислении, что создает высокие риски для экспортеров. При этом географическая структура экспорта остается недостаточно диверсифицированной: индекс диверсификации (рассчитанный как обратная величина к индексу Херфиндаля-Хиршмана) составляет 4,2 по 10-балльной шкале, что указывает на концентрацию поставок в ограниченном числе стран.

Около 60% экспорта приходится на страны Ближнего Востока и Северной Африки (Египет, Турция, Алжир). При этом такая концентрация повышает уязвимость перед политическим и экономическим шоком в регионе. В то же время расчеты показывают, что увеличение индекса диверсификации до 6,0 позволило бы снизить волатильность экспортной выручки на 15-20%.

Институциональный блок выявил как позитивные, так и негативные тенденции. Интегральный индекс государственной поддержки, рассчитанный на основе объема субсидий на развитие экспортной инфраструктуры, компенсации транспортных расходов и льготного кредитования, составил 0,68 (при максимальном значении 1,0).

С одной стороны, меры государственной поддержки, реализуемые в рамках федеральных программ, позволили частично компенсировать рост транспортных издержек и повысить доступность кредитных ресурсов. С другой стороны, уровень административных барьеров оценивается в 4,2 балла по 5-балльной шкале (где 1 – минимальные барьеры, 5 – максимальные). Основные сложности связаны с получением фитосанитарных сертификатов, а также с неравномерностью распределения экспортных квот.

Финансово-инвестиционный блок позволил выявить недостаточный уровень активности инвестиций в модернизацию основных фондов. При этом износ элеваторного хозяйства в Краснодарском крае превышает 58%, а темпы обновления парка сельскохозяйственной техники остаются неудовлетворительными. Кроме того, объем инвестиций в основной капитал в 2024 г. составил 18,5 млрд руб., что на 10-12% ниже уровня, необходимого для поддержания конкурентоспособности.

По оценкам Е.А. Алешиной и Д.В. Сердобинцева, пространственное развитие АПК невозможно без привлечения инвестиций в инфраструктурные проекты, обеспечивающие интеграцию производителей с перерабатывающими и логистическими предприятиями [1]. На примере отдельных предприятий Краснодарского края видим, что предприятия, осуществившие модернизацию элеваторов и внедрившие технологии бережливого хранения зерна, демонстрируют более высокую рентабельность экспортных операций (на 3-5 процентных пункта выше средней) и меньшие потери при хранении.

Интегральная оценка экспортного потенциала зернового кластера Краснодарского края, рассчитанная на основе разработанной методологии, показала, что его значение составляет 0,78 по шкале от 0 до 1, что соответствует категории «высокий». Однако анализ структуры интегрального показателя выявил существенную дифференциацию, то есть максимальные значения получены по производственно-ресурсному блоку (0,93), тогда как финансово-инвестиционный блок демонстрирует значения

ниже средних (0,61), а логистико-инфраструктурный блок (0,77) и институциональный блок (0,74) находятся на среднем уровне. Это указывает на необходимость переориентации управленческих усилий на устранение выявленных диспропорций, прежде всего – в части модернизации основных фондов и повышения инвестиционной привлекательности отрасли.

Сценарное моделирование, проведенное в рамках исследований, позволило оценить динамику экспортного потенциала при различных вариантах развития событий. Оптимистический сценарий предполагает реализацию крупных инфраструктурных проектов (расширение портовых мощностей до 25 млн т/год, строительство новых элеваторов, снижение доли изношенных мощностей до 30%), а также рост обеспеченности удобрениями до 65 кг д.в/га. Данный сценарий позволит увеличить интегральный показатель до 0,87 к 2030 г. При этом валовой сбор возрастет до 14,5 млн т, а доля экспорта в валовом сборе достигнет 62% (табл. 3).

Базовый сценарий, учитывающий текущие темпы инвестиционной активности и сохранение существующих институциональных условий, дает прирост интегрального показателя до 0,81. Пессимистический сценарий, связанный с сохранением внешнеторговых ограничений, недостаточным объемом инвестиций и ускоренным износом основных фондов, может привести к снижению показателя до 0,69 вследствие дальнейшего ухудшения логистической инфраструктуры и потери конкурентоспособности.

Сравнительный анализ по отношению к другим зернопроизводящим регионам (Ростовская область, Ставропольский край) показывает, что конкурентные преимущества Краснодарского края базируются на более благоприятных природно-климатических условиях и развитой портовой инфраструктуре. Вместе с тем в Ростовской области, где в последние годы реализованы крупные инвестиционные проекты по модернизации элеваторов и развитию железнодорожной логистики, темпы прироста экспортного потенциала оказались выше: интегральный показатель региона за период 2020-2024 гг. вырос с 0,65 до 0,74, тогда как в Краснодарском крае – с 0,72 до 0,78. Данный факт подтверждает, что инвестиции в инфраструктуру способны нивелировать природные преимущества конкурентов. При этом Ставропольский край делает ставку на развитие сухопутных логистических коридоров и переработку зерна в продукты с высокой добавленной стоимостью, что обеспечивает более стабильную рентабельность экспортных операций.

Важным результатом исследований стало выявление латентных факторов, влияющих на экспортный потенциал, которые не всегда учитываются в традиционных подходах. К таким факторам можно отнести: уровень координации между участниками кластера (оцененный по числу совместных проектов и долгосрочных контрактов); наличие долгосрочных контрактов с импортерами (охватывающих не менее 30% экспортных поставок); степень интеграции производителей с перерабатывающими предприятиями (доля зерна, направляемая на глубокую переработку); развитость сервисной инфраструктуры (наличие аккредитованных лабораторий по оценке качества зерна, консалтинговых услуг по выходу на внешние рынки).

Как подчеркивает А.А. Лексина и др., формирование сырьевой базы экспортно-ориентированного кластера невозможно без учета этих «мягких» факторов [11]. В Краснодарском крае доля зерна, направляемая на глубокую переработку (производство крахмала, глютена, биоэтанола), составляет лишь 5-7%, что значительно ниже уровня, характерного для развитых зерновых кластеров (США, Канада – 20-25%). При этом расчеты показали, что повышение данного показателя до 15% позволило бы дополнительно генерировать порядка 8-10 млрд руб. добавленной стоимости в год.

Таблица 3

Сценарные оценки динамики экспортного потенциала Краснодарского края до 2030 года

Table 3

Scenario based assessments of the dynamics of the Krasnodar Territory export potential up to 2030

Показатель	Базовый период (2024)	Оптимистический сценарий	Базовый сценарий	Пессимистический сценарий
Производственно-ресурсный блок				
Валовой сбор, млн т	12,4	14,5	13,2	11,8
Урожайность, ц/га	62,5	68,0	64,5	60,0
Обеспеченность удобрениями, кг д.в/га	48,0	65,0	52,0	44,0
Нормализованное значение блока	0,93	0,98	0,95	0,85
Логистико-инфраструктурный блок				
Мощность портов, млн т/год	18,5	25,0	20,0	18,0
Доля изношенных элеваторов, %	45,0	30,0	40,0	52,0
Потери зерна, %	3,2	2,2	2,8	3,8
Нормализованное значение блока	0,77	0,89	0,81	0,68
Рыночно-конъюнктурный блок				
Доля экспорта в валовом сборе, %	55,0	62,0	57,0	50,0
Индекс диверсификации	4,2	6,0	4,8	3,8
Нормализованное значение блока	0,66	0,78	0,70	0,58
Институциональный блок				
Интегральный индекс господдержки	0,68	0,82	0,71	0,60
Уровень административных барьеров	4,2	3,2	3,8	4,5
Нормализованное значение блока	0,74	0,85	0,78	0,65
Финансово-инвестиционный блок				
Инвестиции, млрд руб/год	18,5	28,0	21,0	15,0
Уровень износа основных фондов, %	58,0	48,0	53,0	62,0
Нормализованное значение блока	0,61	0,79	0,67	0,52
Интегральный показатель экспортного потенциала	0,78	0,87	0,81	0,69

В процессе исследований была также оценена роль государственной поддержки в реализации экспортного потенциала. При этом компенсация части транспортных расходов (до 30% от затрат на доставку), субсидирование процентных ставок по инвестиционным кредитам (до 5 процентных пунктов), а также поддержка участия российских экспортеров в международных выставках и ярмарках доказали свою эффективность. Однако существующие механизмы поддержки, по мнению Ф.Б. Махмадизода, требуют адаптации к специфике зернового кластера, где ключевое значение имеют не столько прямые субсидии, сколько создание условий для долгосрочного планирования и снижения транзакционных издержек [12]. В частности, целесообразно развитие механизмов форвардных закупок и биржевой торговли зерном с участием государственных агентов, что позволило бы стабилизировать ценовую конъюнктуру и снизить риски экспортеров.

Опыт функционирования зернового кластера Краснодарского края демонстрирует, что ключевым условием реализации экспортного потенциала является синхронизация производственных, логистических и рыночных процессов. При этом нарушение баланса между данными компонентами приводит к тому, что даже при высоких валовых сборах часть продукции оказывается невостребованной на внешних рынках или реализуется по заниженным ценам.

В 2023 г., несмотря на рекордный урожай (более 13 млн т), экспорт зерна из Краснодарского края сократился на 8% по сравнению с предыдущим годом вследствие логистических ограничений и роста запасов в портах. В этой связи разработанная методология, ориентированная на интегральную оценку, позволяет своевременно выявлять возникающие диспропорции и корректировать управленческие решения.

Кроме того, предложенный инструментарий может быть использован региональными органами управления АПК при разработке стратегий развития экспортно-ориентированного зернового производства, а также для мониторинга эффективности мер государственной поддержки.

Столь значительные объемы экспортной выручки, генерируемые зерновым кластером Краснодарского края, открывают возможности для диверсификации региональной экономики через реинвестирование части полученных доходов в смежные сферы. При этом в качестве одного из перспективных направлений выступает агротуризм, который позволяет не только извлечь дополнительную выгоду из уникального аграрного ландшафта, но и снизить зависимость сельских территорий от ценовой конъюнктуры мирового зернового рынка.

Переход от моноотраслевых моделей к полифункциональным, где сельское хозяйство, туризм и сервис формируют единую экосистему, становится важным условием устойчивого развития агломераций [13-15]. В контексте Краснодарского края, где традиционно высоки сборы зерновых и сосредоточены крупные перерабатывающие мощности, агротуризм способен стать дополнительным каналом капитализации аграрного наследия, одновременно создавая новые рабочие места и повышая привлекательность сельской местности для жизни и бизнеса.

Реинвестирование части экспортной выручки в развитие агротуристической инфраструктуры обладает выраженным мультипликативным эффектом. Средства, направляемые на строительство агроусадеб, создание маршрутов по зерновым хозяйствам, организацию дегустационных залов хлебопродуктов и образовательных фермерских школ, работают одновременно на нескольких уровнях.

Во-первых, они повышают занятость в сельских районах, что особенно важно в условиях структурной трансформации экономики, когда обеспечение достойного уровня жизни населения напрямую зависит от создания новых, не связанных с традиционным производством источников дохода. Во-вторых, агротуризм позволяет

повысить добавленную стоимость, получаемую с 1 га земли, без дополнительной нагрузки на пахотные угодья. В-третьих, он способствует сохранению культурного ландшафта и аграрных традиций, что согласуется с принципами экологизации и индустриализации.

Выводы
Conclusions

Проведенные исследования подтверждают, что разработанная методология оценки экспортного потенциала зернового кластера, основанная на интеграции 5 функциональных блоков (производственно-ресурсного, логистико-инфраструктурного, рыночно-конъюнктурного, институционального и финансово-инвестиционного), позволяет не только фиксировать текущее состояние, но и выявлять структурные диспропорции, сдерживающие развитие экспортной деятельности.

Апробация данного инструментария на материалах Краснодарского края показала, что интегральный показатель экспортного потенциала региона составляет 0,78 по шкале от 0 до 1, что соответствует категории «Высокий». Однако за этой обнадеживающей цифрой скрывается существенная внутренняя дифференциация: при максимальных значениях производственно-ресурсного блока (0,93) финансово-инвестиционный блок демонстрирует заметно более низкие показатели (0,61), что указывает на необходимость переориентации управленческих усилий на модернизацию основных фондов и повышение инвестиционной привлекательности отрасли.

Ключевым ограничением реализации экспортного потенциала выступает состояние логистико-инфраструктурного комплекса, то есть значительная доля элеваторных мощностей (45%) эксплуатируется с превышением нормативных сроков службы, что приводит к потерям зерна при хранении на уровне 3,2%, а износ основных фондов в целом по отрасли превышает 58%. В то же время сравнение с соседними регионами (Ростовской областью и Ставропольским краем) показывает, что инвестиции в инфраструктурные проекты способны нивелировать природные преимущества. Например, в Ростовской области, где в последние годы активно модернизируются элеваторы и развивается железнодорожная логистика, темпы прироста экспортного потенциала оказались выше, чем в Краснодарском крае, обладающем более благоприятными агроклиматическими условиями.

Сценарное моделирование позволило установить, что при сохранении текущих тенденций (базовый сценарий) интегральный показатель экспортного потенциала может возрасти до 0,81 к 2030 г., тогда как реализация оптимистического сценария, предполагающего расширение портовых мощностей до 25 млн т/год, снижение доли изношенных элеваторов до 30% и повышение обеспеченности удобрениями до 65 кг д.в/га, способна увеличить данный показатель до 0,87. При этом пессимистический сценарий, связанный с недостаточным объемом инвестиций и сохранением внешнеторговых ограничений, несет риски снижения интегрального показателя до 0,69, что может привести к утрате конкурентных позиций региона на мировом рынке зерна.

Список источников

1. Зюкин Д.А., Глушков И.А. Развитое зерновое хозяйство как условие крупнотоварного сельскохозяйственного производства в регионах // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2023. № 8. С. 184–191. EDN: HSGJFP

2. Несмыслёнов А.П. Организационно-экономический механизм формирования экспортно-ориентированного кластера зернопродуктового

подкомплекса в регионе // *АПК*: *экономика, управление*. 2023. № 3. С. 41–51. https://doi.org/10.33305/233-41

3. Проскура Д.В., Нечаева М.Л., Кутаева Т.Н., Кутаев А.А. Кластерный подход к развитию зерновой отрасли // *Экономический анализ*: *теория и практика*. 2024. Т. 23, № 7 (550). С. 1272–1287. https://doi.org/10.24891/ea.23.7.1272

4. Илмуратов Ш.М. Критерии деятельности зерновых кластеров и пути повышения их эффективности // *Экономика и предпринимательство*. 2025. № 11 (184). С. 1389–1394. https://doi.org/10.34925/EIP.2025.184.11.243

5. Еремин В.В. Использование мультипликатора инвестиций для снижения рисков формирования ресурсного потенциала региона // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 2. С. 119–128. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-119-128

6. Харченко К.В. Совершенствование кластерного ландшафта региона как фактор обеспечения экономической безопасности // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 2. С. 98–106. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-98-106

7. Алешина Е.А., Сердобинцев Д.В. Пространственное развитие АПК на основе оценки конкурентоспособности регионов и формирования экспортно-ориентированных зернопродуктовых кластеров // *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2025. № 12 (131). С. 151–162. https://doi.org/10.33938/2512-151

8. Харченко К.В. Рейтинг умных территорий: методологические основы и ключевые показатели // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 5. С. 79–90. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-5-79-90

9. Безсмертная Е.Р. Российские инициативы в области устойчивого развития агломераций и территорий: работа над ошибками ESG // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 5. С. 60–68. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-5-60-68

10. Ткаченко А.А. Обеспечение достойного уровня жизни населения: возможности и реальность // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 3. С. 6–18. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-3-6-18

11. Лексина А.А., Фирсов А.И., Шеленок А.В. Формирование сырьевой базы экспортно-ориентированного кластера // *Экономика сельского хозяйства России*. 2023. № 12. С. 66–74. https://doi.org/10.32651/2312-66

12. Махмадизода Ф.Б. Особенности формирования аграрных экспортоориентированных кластеров // *Вестник Таджикского национального университета. Серия социально-экономических и общественных наук*. 2024. № 8. С. 204–214. EDN: GZORJS

13. Перская В.В. Экологизация индустриализации как новый этап развития мировой экономики // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 2. С. 19–30. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-19-30

14. Сахаров Д.М. Развитие российского финансового рынка в условиях структурной трансформации мировой финансовой системы // *Финансы*: *теория и практика*. 2025. Т. 29, № 4. С. 49–70. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-4-49-70

15. Сергеева Н.В. Совместные предприятия как инструмент повышения занятости населения в условиях трансформации экономики // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. Т. 18, № 5. С. 69–78. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-5-69-78

References

1. Zyukin D.A., Glushkov I.A. Developed grain farming as a condition large agricultural production in the regions. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2023;(8):184-191. (In Russ.)

2. Nesmyslenov A.P. Organizational and economic mechanism for the formation of an export-oriented cluster of grain products subcomplex in the region. *AIC*: *Economics, Management*. 2023;(3):41-51. (In Russ.) https://doi.org/10.33305/233-41

3. Proskura D.V., Nechaeva M.L., Kutaeva T.N., Kutaev A.A. Cluster approach to the grain industry development. *Economic Analysis*: *Theory and Practice.* 2024;23(7(550)):1272-1287. (In Russ.) https://doi.org/10.24891/ea.23.7.1272

4. Ilmuratov Sh.M. Criteria for the operation of grain clusters and ways to improve their efficiency. *Ekonomika i predprinimatelstvo*. 2025;(11(184)):1389-1394. (In Russ.) https://doi.org/10.34925/EIP.2025.184.11.243

5. Eremin V.V. Using the investment multiplier to reduce the risks of developing the region's resource potential. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2025;18(2):119-128. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-119-128

6. Kharchenko K.V. Improving the cluster landscape of the region as a factor of ensuring economic security. *Ekonomika. Nalogi. Pravo.* 2025;18(2):98-106. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-98-106

7. Aleshina E.A., Serdobintsev D.V. Spatial development of agro-industrial complex based on assessment of competitiveness of regions and formation of export-oriented grain food clusters. *Economics, Labor, Management in Agriculture*. 2025;(12(131)):151-162. (In Russ.) https://doi.org/10.33938/2512-151

8. Kharchenko K.V. Smart territories rating: methodological foundations and key indicators. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2025;18(5):79-90. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-5-79-90

9. Bezsmertnaya E.R. Russian initiatives in the field of sustainable development of agglomerations and territories: working on the mistakes of ESG. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2025;18(5):60-68. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-5-60-68

10. Tkachenko A.A. Ensuring a decent standard of living for the population: opportunities and reality. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2025;18(3):6-18. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-3-6-18

11. Leksina A.A., Firsov A.I., Shelenok A.V. Formation of the raw material base of the export-oriented cluster. *Agricultural Economics of Russia*. 2023;(12):66-74. (In Russ.) https://doi.org/10.32651/2312-66

12. Mahmadizoda F.B. Features of formation of agrarian export-oriented clusters. *Vestnik Tadzhikskogo natsionalnogo universiteta. Seriya sotsialno-ekonomicheskikh i obshchestvennykh nauk.* 2024;(8):204-214. (In Russ.)

13. Perskaya V.V. Greening of industrialization as a new stage in the development of the global economy. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2025;18(2):19-30. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-19-30

14. Sakharov D.M. Development of the Russian financial market in the context of the structural transformation of the global financial system. *Finance*: *Theory and Practice*. 2025;29(4):49-70. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-4-49-70

15. Sergeeva N.V. Joint ventures as a tool to increase employment in the context of economic transformation. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2025;18(5):69-78. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-5-69-78

Сведения об авторах

Дмитрий Геннадьевич Сергеев, аспирант кафедры экономики и организации производства, 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: sergeevdg@gmail.com

Людмила Ивановна Хоружий, д-р экон. наук, профессор, директор Института экономики и управления АПК, 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: hli@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3061-1374

Константин Анатольевич Лебедев, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры бухгалтерского учета, финансов и налогообложения, 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: k.lebedev@rgau-msha.ru; профессор кафедры международного бизнеса, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве РФ»; 125167, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 49/2; e-mail: kalebedev@fa.ru; https://orcid.org/0000-0003-2896-2060

Ольга Евгеньевна Лебедева, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры туризма и гостиничного бизнеса, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»; 125167, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 49/2; e-mail: oelebedeva@fa.ru; https://orcid.org/0000-0001-6896-3717

Information about the authors

Dmitry G. Sergeev, postgraduate student of the Department of Economics and Production Organization, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: sergeevdg@gmail.com

Liudmila I. Khoruzhy, DSc (Econ), Professor, Director of the Institute of Economics and Management in Agribusiness, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: hli@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3061-1374

Konstantin A. Lebedev, DSc (Econ), Professor at the Department of Bookkeeping, Finance and Tax Assessment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: k.lebedev@rgau-msha.ru; Professor at the Department of International Business, Financial University under the Government of the Russian Federation; 49/2, Leningradsky Ave., Moscow, 125167, Russian Federation; e-mail: kalebedev@fa.ru; https://orcid.org/0000-0003-2896-2060

Olga E. Lebedeva, CSc (Econ), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Tourism and Hotel Business, Financial University under the Government of the Russian Federation; 49/2, Leningradsky Ave., Moscow, 125167, Russian Federation; e-mail: oelebedeva@fa.ru; https://orcid.org/0000-0001-6896-3717

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ТИМИРЯЗЕВКИ

Трухачев В.И., Оришев А.Б., Тлепцок Р.А. Тимирязевская академия в историческом пространстве России: преемственность поколений и трансформация научных школ.. 5

АГРОХИМИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ

Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Сухарев А.И., Грачева Т.А. Влияние подвижности почвенных коллоидов на водоудерживающую способность почв..... 20

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Алборов А.Ю., Басиева Л.Ж., Козырев А.Х., Цугкиева В.Б., Цагараева Э.А. Продукционный процесс сортов сои в зависимости от предпосевной обработки семян 32

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

Зайцева С.М., Киракосян Р.Н., Болотина Е.А. Влияние ауксинов на каллусогенез микроклонов *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. 45
Лущенко Г.В., Гасиев В.И. Влияние термической обработки на качество семян люцерны 57
Новиков А.И., Лебедев А.В., Новикова Т.П. Нормализованные спектральные индексы эпидермиса семян как предиктор прорастания средозащитных культур в технологии адаптивного растениеводства..... 67

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, РАСТЕНИЕВОДСТВО, ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Писарева И.Н., Белошапкина О.О. Оценка применимости методов ПЦР для диагностики бактериального рака томата..... 84

ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

Греченева А.В., Латынина Е.С., Акимушкина М.А., Бакнин М.Д. Алгоритм адаптивной дискретизации видеопотока для повышения точности детекции реперных анатомических ориентиров КРС в задачах оценки их упитанности 105
Килякова Ю.В., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е., Мингазова М.С., Биологическое действие нанокомпозита Zn-C на морфобиохимические показатели крови цыплят-бройлеров 123
Николаев Д.В., Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Квашнина М.А., Юлдашбаева А.Ю., Магомадов Т.А. Эффективность скрещивания маток эдильбаевской породы с баранами-производителями породы дорпер 138
Чабаев М.Г., Новгородова И.П. Продуктивность и метаболические процессы ремонтных телок при скармливании органического хрома разных концентраций 147

ЭКОНОМИКА

Ануфриев Т.Ф., Трясцина Н.Ю. Организационно-экономический механизм повышения эффективности хозяйственной деятельности сельскохозяйственных организаций..... 158
Овчинников В.Н., Зундэ В.В., Багратуни К.Ю., Государственная финансовая поддержка сельского хозяйства России: регулирующее воздействие, новые вызовы и целевые ориентиры 174
Русаков Я.Е., Рахаева В.В. Система показателей сбалансированного развития зернопродуктового подкомплекса Саратовской области с учетом ESG-принципов..... 195
Сергеев Д.Г., Хоружий Л.И., Лебедев К.А., , Лебедева О.Е. Методология оценки экспортного потенциала зернового кластера..... 210

CONTENTS

SCIENTISTS OF TIMIRYAZEV ACADEMY

Trukhachev V.I., Orishev A.B., Tleptsok R.A. Timiryazev Academy in the historical space of Russia: continuity of generations and the transformation of scientific schools 5

AGROCHEMISTRY, SOIL SCIENCE, ECOLOGY

Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Suharev A.I., Gracheva T.A. Effect of soil colloid mobility on soil water retentivity 20

AGRONOMY, CROP PRODUCTION, PLANT PROTECTION

Alborov A.Yu., Basieva L.Zh., Kozyrev A.Kh., Tsugkieva V.B., Tsagaraeva E.A. Production process of soybean varieties depending on the pre-sowing seed treatment 32

GENETICS, BIOTECHNOLOGY, BREEDING AND SEED PRODUCTION

Zaytseva S.M., Kirakosyan R.N., Bolotina E.A. Effect of auxins on the callusogenesis in microclones of *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. 45
Lushchenko G.V., Gasiev V.I. Effect of thermal treatment on alfalfa seed quality 57
Novikov A.I., Lebedev A.V., Novikova T.P. Normalized spectral indices of seed coat as a predictor of germination in shelterbelt crops for adaptive farming technology 67

AGRONOMY, CROP PRODUCTION, PLANT PROTECTION

Pisareva I.N., Beloshapkina O.O. Applicability assessment of PCR methods for the diagnosis of bacterial canker in tomato 84

LIVESTOCK BREEDING, BIOLOGY AND VETERINARY MEDICINE

Grecheneva A.V., Latynina E.S., Akimushkina M.A., Baknin M.D. An adaptive video stream sampling algorithm for improving the detection accuracy of reference anatomical landmarks in cattle for their body condition assessment 105
Kilyakova Yu.V., Miroshnikova E.P., Arinzhanov A.E., Mingazova M.S. Biological effect of Zn-C nanocomposite on morphobiochemical blood parameters of broiler chickens 123
Nikolaev D.V., Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Kvashnina M.A., Yuldashbaeva A.Yu., Magomadov T.A. Efficiency of crossbreeding Edilbaev ewes with Dorper rams 138
Chabaev M.G., Novgorodova I.P. Productivity and metabolic processes of replacement heifers when fed organic chromium at different concentrations 147

ECONOMICS

Anufriev T.F., Tryastsina N.Yu. Organizational and economic mechanism for improving the efficiency of economic activities of agricultural companies 158
Ovchinnikov V.N., Zunde V.V., Bagratuni K.Yu. State financial support for agriculture in Russia: regulatory impact, new challenges, and targets 174
Rusakov Ya.E., Rakhaeva V.V. System of indicators for balanced development of the grain subcomplex of the Saratov Region incorporating ESG principles 195
Sergeev D.G., Khoruzhy L.I., Lebedev K.A., Lebedeva O.E. Methodology for assessing the export potential of a grain cluster 210

Журнал «ИЗВЕСТИЯ ТИМИРЯЗЕВСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ»

e-mail: izvtsha@rgau-msha.ru
тел.: (499) 976–07–48

Подписано в печать 7.04.2026 г. Формат 70×100/16 Бумага офсетная
Гарнитура шрифта «Times New Roman» Печать офсетная. 14,25 печ. л.
Тираж 500 экз.

Отпечатано в ООО «ЭйПиСиПаблишинг»
127550, г. Москва, Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8
Тел.: (499) 976–51–84