

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРИЯ АГРАРНЫХ НАВУК. 2026. Т. 64, № 3

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ АГРАРНЫХ НАУК. 2026. Т. 64, № 3

Журнал основан в январе 1963 г.

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 396 от 18.05.2009

Главный редактор

Петр Петрович Казакевич – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

В. В. Азаренко – Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
(заместитель главного редактора)

Е. Ф. Борисова (ведущий редактор)

С. А. Касьянчик – Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Д. И. Комлач – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Беларусь

С. А. Кондратенко – Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

С. В. Кравцов – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по земледелию,
Жодино, Беларусь

А. П. Лихацевич – Институт мелиорации, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

З. В. Ловкис – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию,
Минск, Беларусь

В. Л. Маханько – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству
и плодоовощеводству, Самохваловичи, Беларусь

А. В. Мелешеня – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию,
Минск, Беларусь

В. К. Пестис – Гродненский государственный аграрный университет, Гродно, Беларусь

- А. В. Пилипук** – Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. И. Портной – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь
П. В. Расторгуев – Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. Н. Тимошенко – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь
Ю. К. Шашко – Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционный совет:

- И. М. Богдевич** – Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь
Ф. И. Василевич – Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К. И. Скрябина, Москва, Россия
Г. В. Гавардашвили – Институт водного хозяйства им. Ц. Е. Мирцхулава Грузинского технического университета, Тбилиси, Грузия
В. И. Долженко – Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия
А. И. Иванов – Почвенный институт имени В. В. Докучаева, Москва, Россия
В. М. Косолапов – Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса, Лобня, Россия
П. А. Красочко – Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышеслесского, Минск, Беларусь
А. Б. Лисицын – Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия
Я. П. Лобачевский – Отделение сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Россия
А. Б. Молдашев – Казахский научно-исследовательский институт экономики агропромышленного комплекса и развития сельских территорий, Алматы, Казахстан
Е. Н. Седов – Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, Жилина, Россия
Н. И. Стрекозов – Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, Дубровицы, Россия
В. Г. Сычев – Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова, Москва, Россия
И. Г. Ушачев – Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия
И. П. Шейко – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь

Журнал рецензируется. Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

*Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: agro-vesti@mail.ru
vestiagr.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия аграрных наук. 2026. Т. 64, № 3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *Е. Ф. Борисова*
Компьютерная верстка *С. Н. Костюк*

Подписано в печать 16.07.2026. Выход в свет 29.07.2026. Формат 60×84^{1/8}. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 52 экз. Заказ 144.
Цена номера: индивидуальная подписка – 16,33 руб., ведомственная подписка – 36,06 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук, 2026

PROCEEDINGS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

AGRARIAN SERIES. 2026, vol. 64, no. 3

The Journal was founded in 1963

Issued four times a year

Founded is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. no. 396

The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database of the Russian Scientific Citation Index (RSCI)

Editor-in-Chief

Petr P. Kazakevich – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Board:

Vladimir V. Azarenko – Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
(Deputy Editor-in-Chief)

Elena F. Borisova (Lead Editor)

Svetlana A. Kasyanchyk – Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Dmitry I. Komlach – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Belarus

Svetlana A. Kondratenko – Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Siarhei U. Krautsou – Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Arable Farming, Zhodino, Belarus

Anatol P. Likhatchevich – Institute for Land Reclamation, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Zenon V. Lovkis – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuff, Minsk, Belarus

Vadim L. Makhanko – Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, Samokhvalovich, Belarus

Aleksey V. Meleshchenya – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuff, Minsk, Belarus

Vitold K. Pestis – Grodno State Agrarian University, Grodno, Belarus

Andrey V. Pilipuk – Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aliaksandr I. Partny – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding, Zhodino, Belarus

Petr V. Rastorgouev – Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir N. Timoshenko – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus
for Animal Breeding, Zhodino, Belarus
Yury K. Shashko – Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l C o u n c i l :

Iosif M. Bogdevich – Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus
Fedor I. Vasilevich – Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA by K. I. Skryabin,
Moscow, Russia
Givi V. Gavardashvili – Institute of Water Management named after T. Mirtskhulava of the Georgian Technical University,
Tbilisi, Georgia
Victor I. Dolzhenko – All-Russian Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Pushkin, Russia
Andrey L. Ivanov – V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Federation, Moscow, Russia
Vladimir M. Kosolapov – Federal Williams Research Centre of Forage Production and Agroecology, Lobnya, Russia
Petr A. Krasochko – S. N. Vysheselsky Institute of Experimental Veterinary Medicine, Minsk, Belarus
Andrey B. Lisitsyn – V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia
Yakov P. Lobachevsky – Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Altynbek B. Moldashev – Kazakh Research Institute of Economy of Agro-Industrial Complex and Rural Development,
Almaty, Kazakhstan
Evgeny N. Sedov – All-Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Zhilina, Russia
Nikolay I. Strekozov – Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst,
Dubrovitsy, Russia
Victor G. Sychev – All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov,
Moscow, Russia
Ivan G. Ushachev – Federal Research Center of Agrarian Economy and Social Development of Rural Areas –
All-Russian Research Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia
Ivan P. Sheyko – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding,
Zhodino, Belarus

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

*Address of the Editorial Office:
1, room 118, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: + 375 17 374-02-45; e-mail: agro-vesti@mail.ru.
vestiagr.belnauka.by*

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Agrarian series, 2026, vol. 64, no. 3
Printed in Russian, Belarusian and English

Editor *E. F. Borisova*
Computer imposition *S. N. Kostsyuk*

It is sent of the press 16.07.2026. Appearance 29.07.2026. Format 60×84^{1/8}. Offset paper. The press digital.

Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 52 copies. Order 144.

Number price: individual subscription – 16,33 byn., departmental subscription – 36,06 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka"

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2,
2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina St., 220084, Minsk,
Republic of Belarus

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series, 2026

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

ЗМЕСТ**ЭКАНОМІКА**

- Пашкевич О. А.** Экономический инструментарий повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве 183

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНаВОДСТВА

- Бойко С. В., Немкевич М. Г.** Доминирующие виды вредителей кукурузы и эффективность химической защиты в агроценозах Беларуси 197
- Сачивко Т. В., Босак В. Н., Семашко Т. В.** Усовершенствование методики оценки селекционного материала лука многоярусного 213
- Найяб Хина, Айеша Муштак, Фарида Бехлил, Фаррух Башир, Сабина Ризван, Джахангир Хан.** Влияние наночастиц диоксида кремния на сорта пшеницы (*Triticum aestivum* L.) из Белуджистана, выращиваемые на засоленных почвах (на английском языке) 221

ЖЫВЁЛАГАДОЎЛЯ І ВЕТЭРЫНАРНАЯ МЕДЫЦЫНА

- Мамедов М. И., Турабов У. Т., Ганджаев И. Ф.** Метаанализ SNP-маркеров, ассоциированных с признаками молочной продуктивности крупного рогатого скота голштинской породы, на основе данных Animal QTLdb и GenBank 232
- Гукежев В. М., Хуранов А. М.** Связь полиморфизма генов молочных белков с удоем коров-первотелок – дочерей быков красно-пестрой голштинской породы 246

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ

- Бирюк Е. Н., Жабанос Н. К., Соглаева А. А., Савельева Т. А., Корягина Д. С.** Генотипирование газо- и ароматобразующих заквасочных культур с использованием молекулярных методов 252

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

CONTENTS**ECONOMICS**

Pashkevich V. A. Economic tools for improving employment efficiency in agriculture.....	183
--	-----

AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

Boiko S. V., Nemkevich M. G. Dominant species of maize pests and the efficacy of chemical crop protection in Belarus	197
Sachyuka T. U., Bosak V. M., Semashko T. V. Improvement of the methodology for assessing breeding material of multi-tiered onion.....	213
Nayab Hina, Ayesha Mushtaq, Farida Behlil, Farrukh Bashir, Sabeena Rizwan, Jahangir Khan. Impact of silica nanoparticles on wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) varieties from Balochistan grown in saline soils.....	221

ANIMAL HUSBANDRY AND VETERINARY MEDICINE

Mammadov M. I., Turabov U. T., Ganjaev I. F. Meta-analysis of SNP markers associated with milk production traits in Holstein cattle based on Animal QTLdb and GenBank data.....	232
Gukezhev V. M., Khuranov A. M. Relationship between milk protein gene polymorphism and milk yield in first-calving cows – daughters of Red-and-White Holstein bulls	246

PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS

Biruk A. N., Zhabanos N. K., Soglaeva A. A., Savelyeva T. A., Karahina D. S. Genotyping of gas- and aroma-forming starter cultures using molecular methods.....	252
--	-----

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

ЭКАНОМІКА**ECONOMICS**

УДК 631.158:658.310.82 (476)

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-183-196>

Поступила в редакцию 20.03.2026

Received 20.03.2026

О. А. Пашкевич*Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЗАНЯТОСТИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Аннотация. Изложены результаты системного анализа и обобщения передового опыта эффективного планирования и организации труда в новых социально-трудовых отношениях. Автором дана оценка действующему механизму базовой и дополнительной материальной поддержки работников в сельской местности, в том числе молодых специалистов. Выявлены негативные факторы увольнения молодых специалистов из сельскохозяйственных организаций. Систематизирован экономический инструментарий повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве, проведена его классификация на обязательную (согласно требованиям трудового законодательства) и добровольную (определяемую финансовыми возможностями нанимателя) части, обоснованы условия его внедрения в практику социально-трудовых отношений. Предложено правовой статус молодого специалиста закрепить в контракте. Для усиления значимости инструментария в достижении приоритетов экономической и социальной эффективности кадровой политики сельскохозяйственной организации рекомендовано соблюдать принцип взаимовыгодности для нанимателя и работника при формировании и обеспечении социального пакета, адресность компенсаций (потребности конкретной категории сотрудников), а также учитывать трудовое поведение работника. Результаты исследования могут быть использованы при обосновании, разработке и совершенствовании локальных правовых актов аграрных предприятий в области мотивации, стимулирования и оплаты труда, построения корпоративной культуры; нормативных правовых актов по привлечению молодежи в аграрный сектор экономики.

Ключевые слова: сельское хозяйство, инструментарий, труд, персонал, занятость, эффективность, мотивация, социальный пакет, вознаграждение, кадровая политика

Для цитирования: Пашкевич, О. А. Экономический инструментарий повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве / О. А. Пашкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 3. – С. 183–196. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-183-196>

Volha A. Pashkevich*Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus***ECONOMIC TOOLS FOR IMPROVING EMPLOYMENT EFFICIENCY IN AGRICULTURE**

Abstract. The results of a systemic analysis and a summary of best practices for effective planning and organization of labor in new social and labor relations are presented. The author assesses the current mechanism of basic and additional financial support for workers in rural areas, including young specialists. Negative factors contributing to the departure of young specialists from agricultural organizations are identified. Economic tools for increasing employment efficiency in agriculture are systematized, classified into mandatory (in accordance with labor legislation requirements) and voluntary (in accordance with the financial capabilities of the employer) components, and the conditions for their implementation in social and labor relations practices are substantiated. It is proposed that the legal status of young specialists be enshrined in contracts. To enhance the significance of these tools in achieving the priorities of economic and social efficiency in the HR policy of agricultural organizations, it is recommended to adhere to the principle of mutual benefit for both employer and employee when creating and providing a benefits package, ensuring that compensation is targeted to the needs of specific employee categories, and taking employee work conduct into account. The results of the study can be used to substantiate, develop, and improve local legal acts

of agricultural enterprises in the areas of motivation, incentives, and remuneration, as well as the development of a corporate culture; and regulatory legal acts for attracting young people to the agricultural sector of the economy.

Keywords: agriculture, tools, labor, personnel, employment, efficiency, motivation, benefits package, remuneration, HR policy

For citation: Pashkevich V. A. Economic tools for improving employment efficiency in agriculture. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 183–196 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-183-196>

Введение. Реализация Концепции государственной кадровой политики Республики Беларусь¹, а также Отраслевой программы кадрового обеспечения организаций агропромышленного комплекса «Кадры 2026–2030 гг.»², Государственной программы «АПК будущего» на 2026–2030 годы³ предопределяет выработку инструментария повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве, и в первую очередь для решения актуальной проблемы привлечения молодых кадров в аграрную отрасль. В Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 гг.⁴ в целях построения высокопроизводительного агропромышленного комплекса и достижения его индикаторов предусмотрена модернизация механизмов мотивации труда – совершенствование системы коллективного и индивидуального материального стимулирования за счет повышения личного интереса руководителей, специалистов и кадров массовых профессий, занятых в сельскохозяйственном производстве, в укреплении экономики сельскохозяйственных предприятий. Наряду с этим в числе конструктивных решений дальнейшего развития сельского хозяйства выступает достойная мотивация и комплекс условий по стимулированию и закреплению кадров. Это предопределило *цель статьи* – систематизировать экономический инструментарий повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве, предложить решения по его реализации субъектами хозяйствования аграрной сферы.

Решение проблемы привлечения и закрепления молодых специалистов в аграрной отрасли и в сельской местности позволит существенно повысить эффективность организаций АПК. Постоянная текучесть кадров, а также необходимость соблюдения технологических регламентов производства сельскохозяйственной продукции вынуждают руководителей аграрных предприятий постоянно подавать заявки в сельскохозяйственные учреждения высшего образования для распределения выпускников, чтобы заполнить вакантные рабочие места в сельскохозяйственных организациях. Порядка 55 % опрошенных руководителей ежегодно подают заявки на замещение выбывших специалистов после отработки молодыми специалистами положенного после распределения срока⁵. Оценка ситуации на современном рынке труда показывает, что он ориентирован на поиск потенциального сотрудника⁶. Это, в свою очередь, предполагает высокий уровень конкуренции за кадры [1–4]. В условиях, ориентированных на эффективную занятость трудовых ресурсов, возрастает роль кадровых технологий, которые используют наниматели, и в первую очередь системы вознаграждений и мотивации персонала. Кроме того, аспектам мотивации сотрудников уделяется пристальное внимание в соответствии с новыми критериями организации рабочего процесса и современными условиями ведения бизнеса [5–7]. Также в нынешних реалиях ритм и интенсивность работы и требования к выполнению должностных обязанностей значительно выросли.

¹ О Концепции государственной кадровой политики Республики Беларусь: Указ Президента Респ. Беларусь от 3 янв. 2024 г. № 1 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32400001> (дата обращения: 18.03.2026).

² Отраслевая программа кадрового обеспечения организаций агропромышленного комплекса «Кадры 2026–2030 гг.»: постановление М-ва сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь от 25 сент. 2025 г. № 91.

³ Государственная программа «АПК будущего» на 2026–2030 годы // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500814> (дата обращения: 11.01.2026).

⁴ Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы: решение Всебелорусского народного собрания 19 дек. 2025 г. № 1 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P925v0001> (дата обращения: 11.01.2026).

⁵ Дубежинский Е. В., Трапнянок Н. Г., Вильдфлуш Е. И. Профессиональные компетенции выпускников аграрных УВО и возможности работодателей для их привлечения и закрепления: информ.-аналит. бюл. Горки: БГСХА, 2024. 36 с.

⁶ Статистика рынка труда // Служба занятости. URL: <https://gsz.gov.by/directory/labour-market/58/> (дата обращения: 04.06.2026).

Социологические опросы, проведенные среди выпускников аграрных учреждений высшего образования, показывают востребованность совершенствования инструментов кадровой политики в части мотивации и условий труда, а также оснащенности рабочих мест, возможностей карьерного роста и самореализации, повышения уровня профессиональной компетентности¹.

В целях привлечения молодежи в аграрную сферу нами разработан и систематизирован инструментарий профессиональной идентификации при выборе будущей сферы трудоустройства, который включает: (I) структурно-логическую схему процесса профессиональной идентификации индивида при выборе профессии; (II) опросный лист «Авторитетная профессия», в котором приведен перечень критериев привлекательности будущей сферы занятости; (III) комплексную схему факторов, влияющих на выбор профессии и предопределяющих подготовку молодежи к сознательному выбору профессии с учетом способностей самого работника и ситуации на рынке труда; (IV) алгоритм оптимального выбора профессии [8]. Их востребованность подтверждена практикой и обусловлена тем, что кандидат выбирает будущее место работы и сферу приложения своего труда, а также строит карьерную траекторию, оценивая социальные возможности предприятия в удовлетворении его нужд и потребностей. Данные ожидания проецируются на действующую систему мотивации и стимулирования труда, различные социальные программы, сопоставляются с предложениями компаний-конкурентов.

Изучение практики реализации социальных программ показало, что их состав и содержание, а также соотношение форм, элементов, инструментов отличаются большим разнообразием как в страновом и отраслевом аспектах, так и среди субъектов бизнеса. Они включают подпрограммы, направленные на поддержание здоровья работника и образа его жизни [5, 9], оптимизацию условий труда на рабочем месте [10, 11], обеспечение работоспособности персонала [12, 13], предусматривают льготы для членов семей работников [14–16], пенсионные и молодежные программы [17–19]. Вместе с этим конкурентная среда предопределяет дифференциацию мотивационных пакетов на разных предприятиях отрасли, что выступает показателем уровня развития корпоративной культуры.

В современных условиях наниматели по согласованию с учредителем (собственником), соблюдая нормы законодательства в сфере социально-трудовых отношений, формируют системы оплаты труда, размеры стимулирующих выплат и устанавливают их в коллективном договоре. Он выступает основополагающим локальным правовым актом (ЛПА), регулирующим взаимоотношения между нанимателем и работниками в области корпоративной социальной защиты. Следует также добавить, что в коммерческих организациях меры материального стимулирования работников, включая молодых специалистов, определяются нанимателем в иных ЛПА в зависимости от финансовых возможностей организаций.

Безусловно, содержание мотивационного инструментария сельскохозяйственной организации зависит от ее финансовых возможностей, а также политики в области управления персоналом. Этим предопределяется выбор форм и основного содержания стимулирующих инструментов в системе мотивации труда. При этом важна осведомленность работника, так как он хотел бы влиять на выбор льгот и бонусов, входящих в потенциальный социальный пакет; оценивать уровень его привлекательности по сравнению с другими нанимателями.

Так, результаты проведенного нами системного анализа и обобщения передового опыта эффективного планирования и организации труда в новых социально-трудовых отношениях свидетельствуют, что конкретные достижения эффективной производственно-экономической деятельности сельскохозяйственных организаций рассматриваются в качестве привлекательных для потенциального молодого работника [20], в их числе:

относительно высокий уровень средней заработной платы работников в сравнении со средней по республике и региону;

деловая репутация и имидж нанимателя на рынке аграрного труда, наличие Кодекса корпоративной этики;

внедрение механизма наставничества в систему привлечения молодых кадров, с одной стороны, и повышения квалификации кадров – с другой;

¹ Дубежинский Е. В., Трапаянок Н. Г., Вильдфлуш Е. И. Целевая подготовка: состояние и перспективы. Горки: БГСХА, 2021. 47 с.

сбалансированный рабочий график и его соблюдение, оптимизация режимов труда и отдыха и др.

Как правило, к ним относятся аграрные предприятия с финансово устойчивым положением, высокими стандартами социальной ответственности и эффективной кадровой политикой, сочетающей в себе организационные, экономические и социальные критерии.

Изучение практики действенного управления персоналом, формирования и реализации кадровой политики показало, что эффективным экономическим инструментом привлечения кадров, повышения лояльности и в конечном итоге эффективной занятости выступает обеспечение социального пакета.

Ученые и практики едины во мнении, что его наличие и своевременное предоставление сотруднику позволяет: позиционировать нанимателя как социально ответственного работодателя и демонстрировать его конкурентные преимущества; сформировать лояльность у работника к предприятию и улучшить качество его трудовой жизни как носителя корпоративной культуры. Так, доказано положительное влияние наполняемости социального пакета на лояльность сотрудников, а именно в случае, если составляющие пакета соответствуют их ожиданиям [21]. Эксперты также подтверждают, что гибкий набор дополнительных бонусов обеспечивает долгосрочные трудовые отношения и повышение лояльности работников к компании [19].

В то же время практика свидетельствует, что предпочтительность и ценность соцпакета может различаться для конкретных работников, равно как и приоритетность компонентов.

Вместе с тем актуальна конкретизация требований к проектированию экономического инструментария повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве (форма, структура, размер и условия формирования отдельных его составляющих). При этом важно учитывать современные динамичные условия ведения агробизнеса, с одной стороны, и важность корпоративной культуры как инструмента трансформации практики мотивации труда – с другой. Обозначенные проблемы подчеркивают теоретическую и практическую значимость данной статьи.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ возрастной структуры руководящих работников и специалистов сельскохозяйственных организаций системы Минсельхозпрода показывает, что численность работников в возрасте до 31 года, по данным на начало 2026 г., составляет 20,1 %, и в последние годы наблюдается тенденция снижения данного показателя. Уровень закрепляемости молодых специалистов на первом рабочем месте по истечении двух лет работы по распределению составил: с высшим аграрным образованием в 2020 г. – 51 %; в 2024-м – 49,6 %; со средним специальным – 40 и 35,4 % соответственно.

Основными причинами увольнения (незаключения контракта на новый срок) являются:

напряженный график работы (непрерывность технологических процессов, сезонность и срочность работ, большое напряжение в определенные периоды года, ненормированность рабочего времени);

частая смена рабочих операций, выполняемых одним и тем же лицом, большая доля ручного труда;

отсутствие карьерного роста;

неустойчивое финансовое состояние отдельных сельскохозяйственных организаций;

невысокий уровень заработной платы относительно других отраслей экономики;

недостаточное развитие инфраструктуры в сельском населенном пункте;

нехватка благоустроенного жилья.

Порядка 11 % работников отрасли достигли общеустановленного пенсионного возраста. Среди руководителей сельскохозяйственных организаций работающие пенсионеры составляют 9,7 %, и только 3,4 % относятся к категории *молодых работников до 31 года*.

Разрыв в заработной плате по видам экономической деятельности, несбалансированность режима труда и отдыха остаются главными факторами, нарушающими естественный оборот кадров в сельском хозяйстве (таблица).

Оценка структуры, состава и динамики затрат нанимателей на рабочую силу на одного работника по территории Республики Беларусь показывает, что порядка 63–65 % в структуре занимает

Динамика численности кадров по виду экономической деятельности «Сельское, лесное и рыбное хозяйство»

Dynamics of the number of personnel by type of economic activity "Agriculture, forestry and fisheries"

Показатель	Год						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Принято работников, тыс. чел.	92,2	90,9	91,7	93,9	87,9	85,6	81,5
Уволено работников, тыс. чел.	104,0	101,9	95,5	106,1	94,1	95,5	92,5
Соотношение принятых и уволенных, %	88,7	89,3	96,0	88,4	93,4	89,6	88,1

Примечание. Таблица составлена автором по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь.

Note. The table was compiled by the author based on data from the National Statistical Committee of the Republic of Belarus.

оплата за отработанное время¹. Анализ объявлений о вакантных рабочих местах в сельском хозяйстве также показал, что в большинстве из них указывается размер заработной платы (или ее диапазон)². Однако информация о социальном пакете и тарифном окладе по контракту у нанимателя в данных вакансиях не содержится. Молодые работники, как правило, ориентируются на предлагаемый наиболее высокий размер оплаты труда (согласуя свои профессионально-квалификационные характеристики с требованиями вакантного рабочего места). В этой связи видится, что информация о соцпакете будет выступать дополнительным мотивационным стимулом привлечения работника в отрасль.

Социологические опросы³ выявили также ряд нематериальных мотивационных факторов, важных для молодых специалистов после окончания учреждений высшего образования (УВО) аграрного профиля, которые приступили к работе по распределению в сельскохозяйственных организациях, среди них:

адаптация в трудовом коллективе (49,1 % опрошенных);

помощь опытных работников, наставников (48,5 %);

адаптация к новым условиям и режиму трудовой деятельности (37,7 %).

Одновременно с этим молодых специалистов беспокоит размер оплаты и материального стимулирования труда; условия, организация и режим труда и отдыха; возможности получения предусмотренных законодательством гарантий, льгот и компенсаций. Важное значение для молодых работников имеют также формы морального поощрения, включая вручение грамот, благодарностей и государственных наград.

Социальная инфраструктура играет важное место в привлечении молодых кадров в сельскую местность. Наряду с качеством и благоустроенностью жилья молодые работники интересуются наличием торговых объектов, предприятий общественного питания (столовая, кафе, буфет), объектов оказания бытовых услуг населению, детских дошкольных и образовательных учреждений, услуг здравоохранения и скорой медицинской помощи, а также физкультурно-оздоровительных и культурно-просветительских учреждений. Весьма важно для молодежи налаженное транспортное сообщение и устойчивая интернет-связь.

Изучение действующего экономического инструментария повышения эффективности занятости работников в сельском хозяйстве показало, что отраслевое Тарифное соглашение⁴ аккумулирует

¹ Затраты нанимателя на рабочую силу на одного работника по территории Республики Беларусь // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10218000006> (дата обращения 16.02.2026).

² Поиск вакансий // Служба занятости. URL: https://gsz.gov.by/registration/vacancy-search/?profession=®ion=&salary_min=&wage_rate_from=&wage_rate_to=&search_period=0&activity_area=17&paginate_by=10&sort_by=sort_published_at_desc (дата обращения: 16.02.2026).

³ Трапнянок Н. Г., Дубежинский Е. В., Вильдфлуш Е. И. Потенциальная стабильность и закрепляемость молодых специалистов в сельскохозяйственных организациях: информ.-аналит. бюл. Горки: БГСХА, 2025. 38 с.

⁴ Тарифное соглашение между Минсельхозпродом, Белорусским профессиональным союзом работников АПК и Союзом «БелАПС» на 2025–2027 годы: постановление М-ва сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, Бел. проф. Союза работников агропром. комплекса, Респуб. агропром. союза «БелАПС» от 24 дек. 2024 г. № 138/948/1/35 // Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. URL: <https://mshp.gov.by/ru/trud-ru/view/tarifnoe-soglashenie-mezhdu-minselkhozprod-belorusskim-professionalnym-sojuzom-rabotnikov-agropromyshlennogo-9860/> (дата обращения: 12.01.2026).

комплекс мер поддержки специалистов аграрной отрасли, включающий широкий спектр социальных льгот, услуг, выплат.

Также выпускникам учреждений образования, реализующих образовательные программы высшего, среднего специального и профессионально-технического образования, направленным на работу по распределению, представляется дополнительный налоговый вычет по подоходному налогу в течение срока обязательной работы по распределению и последующего периода продления контракта, но не более 7 лет (ст. 209 Налогового кодекса Республики Беларусь¹).

В целях закрепления квалифицированных работников сельскохозяйственного профиля на территориях радиоактивного загрязнения на период работы им предоставляется отсрочка от призыва на срочную военную службу, а также службы в резерве².

Принят ряд мер, направленных на *решение жилищных вопросов молодых специалистов и работников, занятых в сельской местности*. Так, при наличии ряда условий возможно предоставление им первоочередного права на арендное жилье с применением понижающих коэффициентов к плате за пользование им³. В дополнение к этому, в целях решения жилищных вопросов работников сельскохозяйственных организаций и многодетных семей, постоянно проживающих и работающих в населенных пунктах с численностью населения до 20 тыс. чел., предусмотрен кредит на срок до 40 лет с процентной ставкой 1 % годовых⁴. Вместе с тем для всех лиц, проживающих в населенных пунктах до 20 тыс. чел., также возможно предоставление кредита на строительство или приобретение жилья сроком на 20 лет с процентной ставкой 3 % годовых.

Законодательством урегулированы вопросы первоочередного права на предоставление арендного жилья коммунального жилищного фонда при условии его отсутствия у гражданина в населенном пункте по месту работы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 июня 2020 № 339; Жилищный кодекс Республики Беларусь, ст. 111, ст. 127⁵). При наличии финансово-экономических возможностей и потребности в притоке новых кадров наниматели также могут закреплять в коллективных договорах нормы о предоставлении молодым семьям ссуд на строительство или приобретение жилья. Практика свидетельствует, что сельскохозяйственные организации обеспечивают молодых специалистов жильем преимущественно следующих категорий: собственный дом (коттедж) с коммунальными удобствами и приусадебным участком; квартира со всеми удобствами на условиях найма или аренды; квартира со всеми удобствами на условиях льготного кредитования и в рассрочку; комната, блок, койко-место в общежитии; жилье по найму за счет полной или частичной его оплаты организацией. Такая мера социальной поддержки, как предоставление льготного кредита на приобретение домашнего имущества (любых

¹ Налоговый кодекс Республики Беларусь // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk0900071> (дата обращения: 17.03.2026).

² О предоставлении отсрочки от призыва на срочную военную службу, службу в резерве отдельным категориям граждан: Указ Президента Респ. Беларусь № 401 от 19 июля 2001 г. // Нормативка.by: информ.-правовая система. URL: <https://normativka.by/lib/document/500057048/rev/2022110400> (дата обращения: 18.03.2026); Об увольнении в запас и призыве на срочную военную службу, службу в резерве: Указ Президента Респ. Беларусь от 12 авг. 2025 г. № 302 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32500302> (дата обращения: 12.03.2026).

³ О субсидировании юридических лиц при возведении или приобретении жилых помещений: Указ Президента Респ. Беларусь от 29 авг. 2024 г. № 344 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32400344> (дата обращения: 18.03.2026); О жилищных отношениях: Указ Президента Респ. Беларусь № 121 от 7 апр. 2020 г. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32000121> (дата обращения: 18.03.2026); Об особенностях предоставления и использования арендного жилья: Указ Президента Респ. Беларусь от 27 янв. 2025. № 38 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32500038> (дата обращения: 18.03.2026).

⁴ О некоторых мерах по строительству жилых домов (квартир) в сельской местности: Указ Президента Респ. Беларусь от 30 авг. 2005 г. № 405 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=P30500405> (дата обращения: 18.03.2026).

⁵ О гражданах, имеющих первоочередное право на предоставление арендного жилья: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 июня 2020 г. № 339 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22000339> (дата обращения: 18.03.2026); Жилищный кодекс Республики Беларусь // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk1200428> (дата обращения: 18.03.2026).

Бюджетные организации

Надбавки молодым специалистам из числа выпускников, направленных на рабочее место по распределению
 Выплаты за работу в сельской местности
 Ежемесячная надбавка за стаж работы в отрасли

Коммерческие организации

Ежемесячные доплаты к заработной плате в течение 5 лет работы молодым специалистам организаций агропромышленного комплекса
 Дифференцированные меры поддержки, определяемые самостоятельно нанимателями в коллективных договорах

Бюджетные и коммерческие организации

Дополнительные выплаты работникам организаций в районах радиоактивного загрязнения, заключившим контракт сроком на 5 лет, а также при заключении второго последующего контракта на 5 лет после 5 лет работы в условиях первого пятилетнего контракта
 Надбавки от окладов за счет выделения дополнительных средств в бюджетных организациях
 Стимулирующие выплаты в коммерческих организациях, устанавливаемых исходя из условий, объема и качества выполняемых ими работ в соответствии с коллективными договорами и иными ЛПА

Рис. 1. Действующий механизм дополнительной материальной поддержки молодых специалистов в сельской местности

Fig. 1. The current mechanism for additional financial support for young specialists in rural areas

непродовольственных товаров белорусского производства) при условии отработки установленно-го срока работы по распределению, также предусмотрена в законодательстве¹.

Кроме того, действующий механизм дополнительной материальной поддержки молодых специалистов в сельской местности включает перечень выплат за специфику работы в сельской местности, которые дифференцированы для бюджетных и коммерческих организаций (рис. 1).

Результаты социологических опросов, проведенных в 2019–2025 гг., о потенциальной стабильности и закрепляемости молодых специалистов в сельскохозяйственных организациях свидетельствуют, что большинство молодых специалистов по-прежнему ориентированы на отработку положенного срока государственного распределения, и показаны на рис. 2 (составлен автором по данным «Потенциальная стабильность и закрепляемость молодых специалистов в сельскохозяйственных организациях»²). Однако наметилась и положительная тенденция роста числа молодых специалистов, которые планируют увеличить срок работы с 5 до 10 лет. Фактором, обуславливающим последнее, выступает, как показала практика, желание работников решить жилищный вопрос за это время (например, выплатить льготный кредит) или же получить стимулирующие выплаты, которые, как правило, зависят от стажа работы в отрасли.

Проведенный в 2024 г. социологический опрос руководителей сельскохозяйственных организаций показал, что для привлечения и закрепления специалистов они предлагали следующие мотивационные и стимулирующие меры³ (в % от числа опрошенных):

достойный уровень заработной платы (58,0);

предоставление, помимо предусмотренных, дополнительных бонусов, поощрений и льгот (27,8);

¹ О предоставлении льготных кредитов отдельным категориям граждан: Указ Президента Респ. Беларусь от 27 нояб. 2000 г. № 631 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=P30000631> (дата обращения: 14.03.2026).

² Трапняк Н. Г., Дубежинский Е. В., Вильдфлуш Е. И. Потенциальная стабильность и закрепляемость молодых специалистов в сельскохозяйственных организациях: информ.-аналит. бюл. Горки: БГСХА, 2025. 38 с.

³ Дубежинский Е. В., Трапняк Н. Г., Вильдфлуш Е. И. Профессиональные компетенции выпускников аграрных УВО и возможности работодателей для их привлечения и закрепления: информ.-аналит. бюл. Горки: БГСХА, 2024. 36 с.

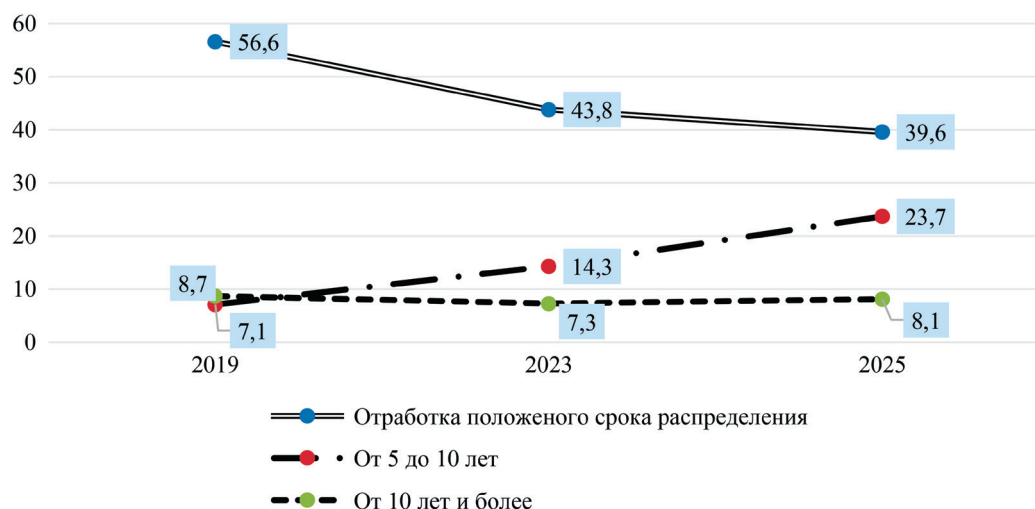


Рис. 2. Структура закрепляемости молодых специалистов за 2019–2025 гг. по сроку, %

Fig. 2. Retention structure of young specialists for 2019–2025, by term, %

оптимальный режим труда, компенсационные выплаты за сверхурочно отработанное время (40,6);

рабочая неделя с двумя выходными днями (39,2);

наличие современного оборудования и техники (27,8);

применение инновационных производственных технологий (9,8);

доставка служебным автотранспортом к месту работы (35,4);

предоставление возможностей для повышения квалификации, профессионального саморазвития и мастерства (37,2);

наличие условий для карьерного роста (39,6).

Помимо этого, руководители выделили такие социальные факторы, как благоприятный морально-психологический климат в коллективе (30,0 % опрошенных), а также наличие работоспособного, дисциплинированного и сплоченного коллектива (34,2).

В целях совершенствования действующего механизма поддержки молодых специалистов (рабочих), распределенных в сельскую местность, предлагается закрепить правоустанавливающие гарантии их трудовой деятельности в сельскохозяйственной организации в контракте, который регулирует социально-трудовые отношения между нанимателем и работником. В него предлагается включить следующие положения:

закрепить *правовой статус молодого специалиста* в контракте. Рекомендуется прописать в нем следующее: выпускники, работающие по распределению, являются в течение срока обязательной работы по распределению молодыми специалистами или молодыми рабочими (служащими) (п. 6 ст. 72 Кодекса Республики Беларусь об образовании¹). Это позволит усилить ответственность нанимателя за предоставление социальных гарантий, предусмотренных законодательством молодому специалисту. На основании ст. 7 Трудового кодекса Республики Беларусь² наниматель вправе устанавливать трудовые и иные гарантии для работников по сравнению с законодательством;

в контракт с молодым специалистом в обязательном порядке внести *пункт о том, что ему установлен нормированный рабочий день* (при пятидневной рабочей неделе устанавливаются два выходных дня в неделю, а при шестидневной – один выходной). Для молодых людей важно не только рабочее, но и свободное время. Нужно обеспечить соблюдение норм оптималь-

¹ Кодекс Республики Беларусь об образовании // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk1100243> (дата обращения: 14.03.2026).

² Трудовой кодекс Республики Беларусь // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk9900296> (дата обращения: 14.03.2026).

ной напряженности (в частности, восьмичасовой рабочий день), которые, наряду с выполнением производственного задания, должны быть нацелены на реализацию программ сбережения здоровья и формирование благоприятного социально-психологического климата в трудовом коллективе, увязку их с профессионально-квалификационными характеристиками работника;

в контракте и коллективном договоре *предусмотреть единовременную выплату* молодому специалисту после приема его на работу в сельскохозяйственную организацию на хозяйственное обзаведение (подъемные) в размере шестимесячного тарифного оклада с условием отработки в сельскохозяйственной организации не менее 2 лет;

в целях решения жилищной проблемы закрепить в контракте и коллективном договоре *обязательства организации* (при содействии учредителя(ей) и/или собственника(ов)) *предоставлять молодому специалисту по договору беспроцентный целевой займ на покупку, строительство или реконструкцию жилого помещения с необходимым инженерным обустройством* (перечнем коммунальных услуг в соответствии с государственными социальными стандартами) в течение трех месяцев после включения его в штат сельскохозяйственной организации.

Для усиления важности инструментария в кадровой политике сельскохозяйственной организации следует соблюдать *принцип взаимовыгодности* при формировании и обеспечении социального пакета, адресность компенсаций (запросы конкретной категории сотрудников), а также учитывать трудовое поведение работника (рис. 3). Безусловно, баланс интересов персонала и нанимателей при формировании соцпакета выступает одним из основополагающих условий построения системы мотивации труда. Расходы на соцпакет и соцподдержку необходимо рассматривать не как затраты нанимателя, а как инвестиции в развитие и привлечение кадров.

Наниматель не может бесконечно увеличивать заработную плату, однако социальный пакет можно расширять и наполнять новым содержанием, стимулируя при этом повышение производительности и оптимизируя затраты на управление персоналом [19]. Чем шире диапазон дифференциации экономических мотиваторов, тем лучше система мотивации будет отражать индивидуальные способности работников, отвечать их интересам и стимулировать рост качества и производительности труда [22, 23]. Ее ценность состоит не в уравнительном подходе, а в дифференциации критериев. Чем более дифференцирована система мотивации, тем полнее она отражает персонализированные качества и результаты работников.

Наиболее резонным видится создание гибкого формата обеспечения соцпакета. В таком случае работники самостоятельно в пределах установленной суммы выбирают из списка бонусы или льготы, которые для них важны в текущем периоде (квартал, полугодие, год).

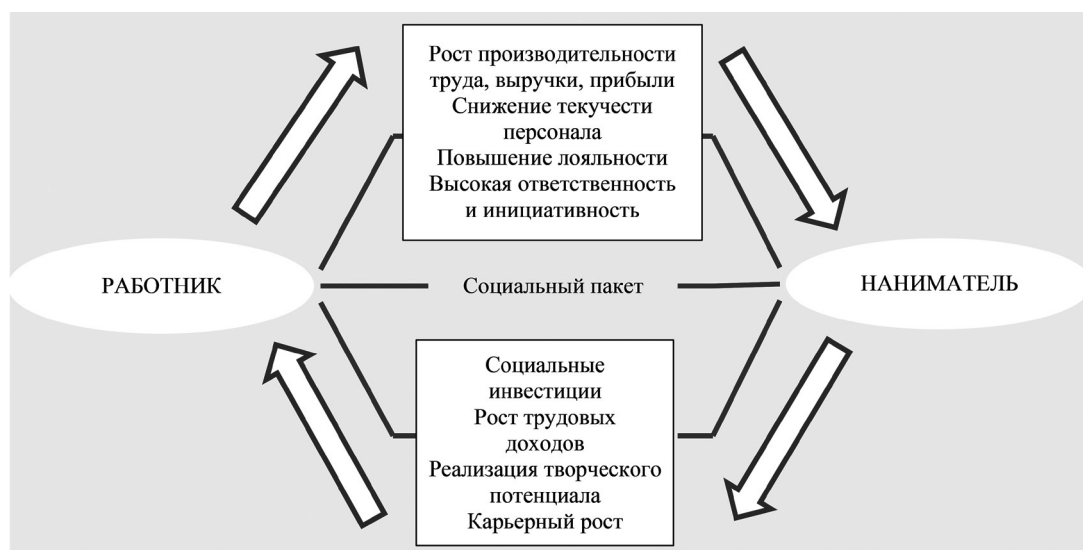


Рис. 3. Реализация принципа взаимовыгодности при формировании и обеспечении социального пакета

Fig. 3. Implementation of the mutual benefit principle in the formation and provision of a benefit package

Исследования показали, что экономический инструментарий нанимателя для повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве следует разделять на две крупные составляющие части: обязательная и добровольная (рис. 4).

Обязательный социальный пакет включает гарантии, которые наниматель должен выполнить согласно нормам законодательства о труде. Добровольная мотивационная часть полностью зависит от дополнительных финансовых возможностей нанимателя и может при благоприятных условиях включать широчайший спектр инструментов, в числе которых: бесплатное питание или предоставление скидки на него, оплата добровольного медицинского и пенсионного страхования, услуг спорткомплексов и фитнес-центров, предоставление служебного автомобиля, оздоровительных и санаторных путевок и др. В случае если мотивационная добровольная часть разнообразна, это может свидетельствовать об устойчивом финансовом положении и экономической эффективности предприятия.

На основе изучения практики управления персоналом в ряде компаний и организаций АПК нами обоснованы следующие условия разработки экономического инструментария повышения эффективности занятости в виде социального пакета, системы льгот и компенсаций, их установления и обеспечения:

- согласованность с целевыми ориентирами организации, ее финансово-экономическим положением;

- проведение предварительной сегментации персонала с целью обеспечения вариативности и целесообразности введения новых опций;

- учет статуса должности и продолжительности стажа работы;

- определение значимости льгот для всех сотрудников и дополнительных для отдельных категорий работников;

- дифференциация наполнения в зависимости от статуса работника и его места в управленческой иерархии, так как наличие фиксированного социального пакета экономически неоправданно и не все льготы из перечня могут быть востребованы сотрудниками;

- адресность предоставления льгот и компенсаций, а также персонализация соцпакетов;

- вовлечение персонала в софинансирование;

- возможность выбора сотрудником из имеющегося перечня (корзины, гибкого набора социальных бонусов). В отношении последнего следует отметить, что такое право выбора позволяет нанимателю оптимизировать расходы и перераспределить финансовые средства в соответствии с приоритетными целями организации.

Кроме того, целесообразен переход от унифицированной системы льгот и бонусов к адресной, что позволяет сокращать общий объем расходов и использовать соцпакет в стимулирующих целях. Гибкость в построении соцпакета позволяет формировать наряду с законодательно установленными индивидуальные схемы социальных гарантий, которые направлены на удовлетворение потребностей разных категорий работников.

Однако наниматель вправе выдвигать такие условия, при которых блага будут предоставлены. Для этого система вознаграждений должна тесно коррелировать с показателями эффективности работы как предприятия в целом, так и его структурных подразделений и самого работника. Это предопределяет систему мониторинга эффективности соцпакета – его внедрение должно сопровождаться четким механизмом информирования работников о новых правилах и условиях вознаграждения, высоком уровне ответственности и дисциплины.

В целом основополагающими в способах формирования комплексного multifunctional экономического инструментария повышения эффективности занятости, его элементов выступают приоритеты кадровой политики [24]. Так, критерий экономической эффективности кадровой политики ориентирован на рост производительности труда, оптимизацию и окупаемость затрат на персонал. Критерий социальной эффективности кадровой политики направлен на формирование корпоративной культуры и ориентирован на высокую степень социальной удовлетворенности работников условиями труда.

В конечном итоге достижение этих критериев формирует бренд нанимателя как конкурентного работодателя на локальном рынке труда и его высокие позиции в рейтингах (топ-50 лучших

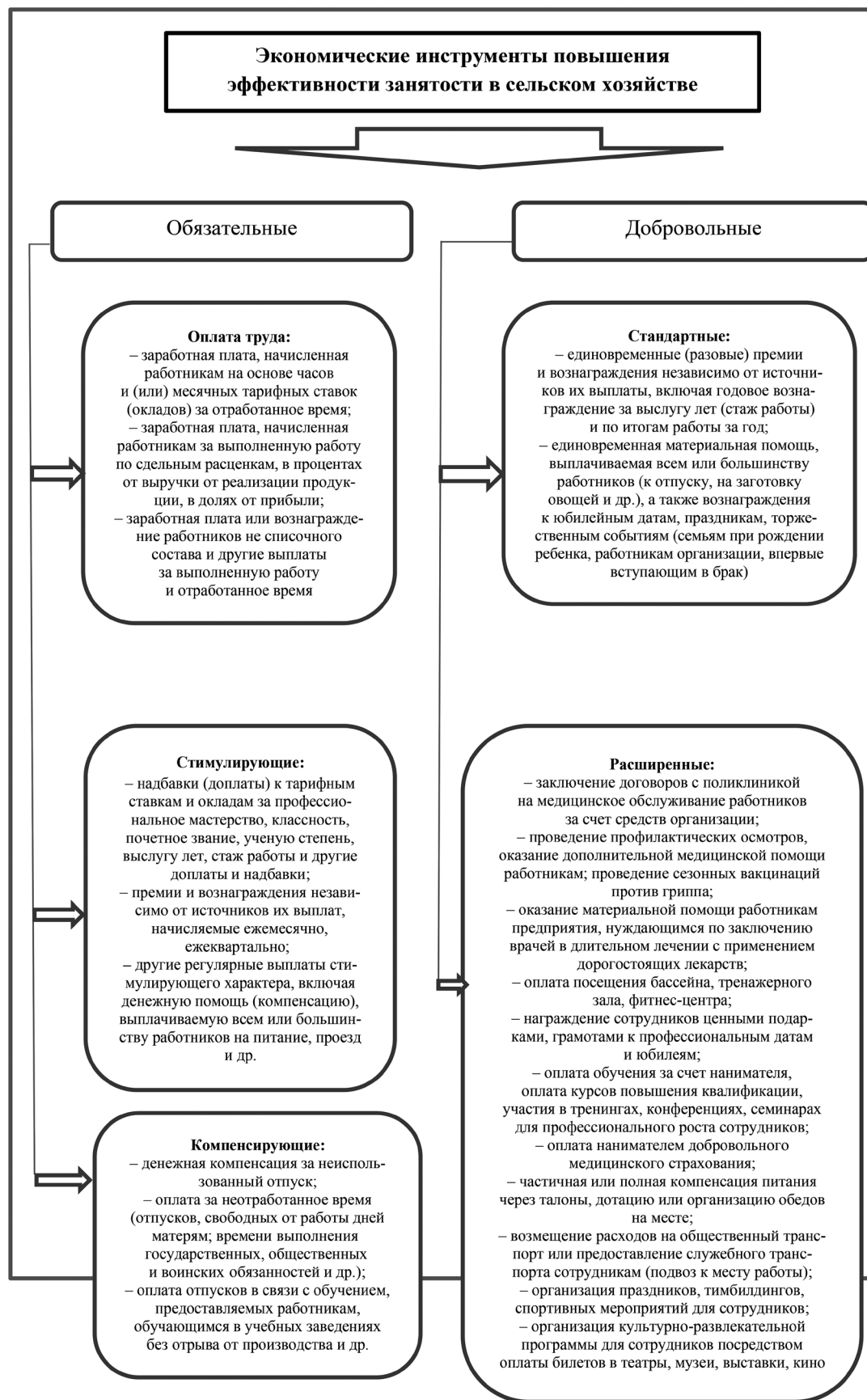


Рис. 4. Экономические инструменты повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве

Fig. 4. Economic tools for improving employment efficiency in agriculture

сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь по итогам года, топ популярных организаций в категории «Сельскохозяйственная продукция в Беларуси», топ-10 аграрных предприятий по валовому надою молока и т. п.) и в конкурсах профессионального агромастерства – соревнованиях трактористов-машинистов сельскохозяйственного производства, смотрах-конкурсах производственных достижений, бизнес-идей и социальных инициатив для АПК, инновационных проектов и пр.

Выводы. Необходимость постоянного обновления молодых кадров в условиях низких показателей закрепляемости, а также отток кадров из сельской местности и сельского хозяйства предопределили выработку экономического инструментария повышения эффективности занятости в сельском хозяйстве.

Конкуренция за квалифицированные кадры стимулирует разработку уникальных и эксклюзивных инструментов мотивации, которые включали бы не только материальные аспекты, но и нематериальные. Социально ответственный наниматель стремится создать максимально привлекательные условия для работы и занятости. Наряду с этим ему важно иметь представление о мотивационных механизмах компаний-конкурентов, о системе услуг, компенсаций и льгот, применяемых у них. В этой связи актуализируются модификация структуры и принципа построения социального пакета.

Для привлечения молодых специалистов в аграрную отрасль и их закрепления выработан и реализуется комплекс мер материальной поддержки и стимулирования по ряду ключевых направлений, в числе которых: оплата труда, обеспечение жильем, материальная помощь при обустройстве на новом месте и ряд других. Также органы регионального управления на постоянной основе ведут работу по адаптации молодых специалистов в организациях АПК, осуществляют мониторинг и контроль за условиями труда и быта, реализацией льгот и социальных гарантий, предусмотренных законодательством.

Практика показывает, что большинство бонусов и социальных льгот реализуется через коллективные договоры, заключаемые между работниками (трудовым коллективом) и нанимателем в лице администрации при активном участии профсоюзов. Состав и размеры этих компонентов, как правило, определяются экономическими возможностями аграрных предприятий, социально-экономическими потребностями их работников, позициями нанимателей и представителей трудового коллектива.

Однако здесь актуальна выработка такого социального пакета, который будет выступать *конкурирующим фактором среди разнообразных предложений о работе (в том числе отраслевых)*. Он включает дополнительные блага, которые наниматель предоставляет сотрудникам по своей инициативе и за счет средств организации (добровольно). Также данные условия должны быть прописаны в ЛПА (содержать права работников на элементы соцпакета, порядок его предоставления, систему учета и отчетности), а работники – осведомлены о правилах его получения. Это позволит избежать социальной напряженности и кадровых рисков в связи с его внедрением. В целом наличие социального пакета, прозрачного и понятного для работника, свидетельствует о формировании лояльности (через привлечение и удержание) персонала посредством удовлетворения его разнообразных нужд. Он выступает инструментом корпоративной социальной политики в современной бизнес-культуре и фактором повышения эффективности занятости в отрасли.

Список использованных источников

1. Лазич, Ю. В. Гибкий социальный пакет – требование современного рынка труда или опция для «богатых» работодателей? / Ю. В. Лазич, И. Н. Попова // BENEFICIUM. – 2021. – № 2 (39). – С. 48–54. [https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2021.2\(39\).48-54](https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2021.2(39).48-54)
2. Якимова, З. В. Моделирование ценностного предложения работодателя в контексте типа организационной культуры / З. В. Якимова, Н. А. Царева, А. Е. Жук // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2019. – Т. 8, № 1 (26). – С. 410–414. <https://doi.org/10.26140/anie-2019-0801-0098>
3. Цимбалюк, С. А. Социальный пакет: природа и место в системе компенсаций / С. А. Цимбалюк // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право. – 2013. – Т. 13, вып. 2. – С. 164–169.
4. Ниналалова, Ф. И. Социальный пакет как конкурентное преимущество предприятия: отечественный и зарубежный опыт / Ф. И. Ниналалова, З. М. Кикова // Вопросы структуризации экономики. – 2014. – № 1. – С. 175–179.
5. Approach to the differentiated motivation of employees in agriculture / M. Hitka, L. Ližbetinová, J. Ďurian, A. G. Raišienė // Agricultural Economics. – 2025. – Vol. 71, № 1. – P. 46–57. <https://doi.org/10.17221/118/2024-AGRICECON>

6. Забирова, Л. М. Компенсационная политика предприятий и связанные с ней риски / Л. М. Забирова, Л. И. Дамина, А. И. Сырейщиков // Вестник экономики, права и социологии. – 2017. – № 3. – С. 22–26.
7. Гусейнова, М. М. Социальный пакет как инструмент мотивации персонала / М. М. Гусейнова // УЭПС: управление, экономика, политика, социология. – 2021. – № 1. – С. 79–83. <https://doi.org/10.24412/2412-2025-2021-1-79-83>
8. Пашкевич, О. А. Концептуальные направления эффективного управления занятостью трудовых ресурсов в сельском хозяйстве / О. А. Пашкевич // Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2021. – Т. 59, № 2. – С. 160–177. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-160-177>
9. How perceived internal corporate social responsibility improves employee well-being: The roles of person-organization fit and self-view / A. D. Tang, T. T. Nguyen, T. D.-H. Thai [et al.] // Scandinavian Journal of Management. – 2025. – Vol. 41, № 3. – Art. 101428. <https://doi.org/10.1016/j.scaman.2025.101428>
10. Zimmert, F. Regular employees in agriculture: how to describe and improve their working conditions / F. Zimmert, R. Saleh // Journal of Rural Studies. – 2026. – Vol. 123. – Art. 104036. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2026.104036>
11. Beyond jobs and wages: the hidden cost of automation on corporate social security contributions / L. Wang, C. Liu, D. Liu, Y. Zhang // International Review of Financial Analysis. – 2025. – Vol. 106. – Art. 104516. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2025.104516>
12. Kim, Y. The ripple effects of leadership's motivating language: cultivating employee support for corporate social advocacy and organizational trust / Y. Kim, S. Meganck // Public Relations Review. – 2025. – Vol. 51, № 4. – Art. 102615. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2025.102615>
13. Охотина, Т. А. Формирование расширенного социального пакета как один из основных механизмов реализации корпоративной социальной защиты на предприятии / Т. А. Охотина // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 3, ч. 2. – С. 248–255. <https://doi.org/10.17513/vaael.2123>
14. Berdegué, J. A. Employment impacts of agrifood system innovations and policies: a review of the evidence / J. A. Berdegué, C. Trivelli, R. Vos // Global Food Security. – 2025. – Vol. 44. – Art. 100832. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100832>
15. Камкина, О. А. Затратный подход к рассмотрению экономической сущности компенсационного пакета персонала организации / О. А. Камкина // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. – 2019. – Т. 4, № 1. – С. 83–89. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-1-83-89>
16. Кучмаева, О. В. Социальная ответственность бизнеса: возможности количественного измерения вклада социального пакета в доходы работников / О. В. Кучмаева // Уровень жизни населения регионов России. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 39–47. https://doi.org/10.52180/1999-9836_2024_20_1_4_39_47
17. Pranandari, A. Signaling competence of agricultural businesses through social media presence to attract gen Z / A. Pranandari, W. Paramita // Digital Business. – 2025. – Vol. 5, № 1. – Art. 100117. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2025.100117>
18. Bhandari, A. Firm social network, information opacity and firm value / A. Bhandari, M. N. H. Bhuyan, M. Subedi // International Journal of Managerial Finance. – 2026. – Vol. 22, № 1. – P. 25–66. <https://doi.org/10.1108/IJMF-02-2024-0133>
19. Грищенко, Н. А. Кафетерий льгот как инструмент усиления привлекательности социального пакета / Н. А. Грищенко // Российский научный журнал «Телескоп: журнал социологических и маркетинговых исследований». – 2021. – № 4. – С. 97–102. https://doi.org/10.51692/1994-3776_2021_4_97
20. Пашкевич, О. А. Системный анализ и обобщение передового опыта эффективного планирования и организации труда в новых социально-трудовых отношениях / О. А. Пашкевич, М. Н. Антоненко, В. О. Лёвкина // Научные принципы регулирования и развития АПК: предложения и механизмы реализации, 2024 / Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси; редкол.: В. Г. Гусаков [и др.]. – Мн., 2024. – С. 114–121.
21. Прихач, А. Ю. Мотивационное значение социального пакета / А. Ю. Прихач // Экономика и управление. – 2023. – Т. 29, № 12. – С. 1512–1522. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-12-1512-1522>
22. Гусаков, В. Г. Сельское хозяйство в надежде на конструктивные решения / В. Г. Гусаков // Аграрная экономика. – 2025. – № 12 (367). – С. 4–9.
23. Гусаков, В. Г. Факторы и методы эффективного хозяйствования / В. Г. Гусаков; Нац. акад. наук Беларуси. – Мн.: Бел. наука, 2020. – 56 с.
24. Пашкевич, О. А. Модель эффективной кадровой политики в организациях АПК, метод формирования организационно-экономической модели устойчивого развития сельского социума / О. А. Пашкевич, М. Н. Антоненко, В. О. Лёвкина // Формирование эффективных организационно-экономических отношений в АПК: вопросы теории и методологии / Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси; под ред. В. Г. Гусакова. – Мн., 2022. – С. 116–126.

References

1. Lazich Yu. V., Popova I. N. Flexible social package – a requirement for a modern labor market or an option for “rich” employers? *BENEFICIUM*, 2021, no. 2 (39), pp. 48–54 (in Russian). [https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2021.2\(39\).48-54](https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2021.2(39).48-54)
2. Yakimova Z. V., Tsareva N. A., Zhuk A. E. Modeling the value proposition of the employer in the context the type of organizational culture. *Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravlenie = Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*, 2019, vol. 8, no. 26, pp. 410–414 (in Russian). <https://doi.org/10.26140/anie-2019-0801-0098>
3. Tsybalyuk S. A. Social package: the nature and place in compensation. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Ekonomika. Upravlenie. Pravo = Izvestiya of Saratov University. Economics. Management. Law*, 2013, vol. 13, iss. 2, pp. 164–169 (in Russian).
4. Ninalalova F. I., Kikova Z. M. Social package as competitive advantages: domestic and foreign experience. *Voprosy strukturizatsii ekonomiki* [Issues of Structuring the Economy], 2014, no. 1, pp. 175–179 (in Russian).

5. Hitka M., Ližbetinová L., Ďurian J., Raišienė A. G. Approach to the differentiated motivation of employees in agriculture. *Agricultural Economics*, 2025, vol. 71, no. 1, pp. 46–57. <https://doi.org/10.17221/118/2024-AGRICECON>
6. Zabirowa L. M., Daminova L. I., Sireishikov A. I. Compensation policy of enterprises and associated risks. *Vestnik ekonomiki, prava i sotsiologii = The Review of Economy, the Law and Sociology*, 2017, no. 3, pp. 22–26 (in Russian).
7. Guseinova M. M. Social package as a tool for personnel motivation. *UEPS: upravlenie, ekonomika, politika, sotsiologiya* [UEPS: Management, Economics, Politics, Sociology], 2021, no. 1, pp. 79–83 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2412-2025-2021-1-79-83>
8. Pashkevich V. A. Conceptual directions of effective management of labour resources employment in agriculture. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no. 2, pp. 160–177 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-160-177>
9. Tang A. D., Nguyen T. T., Thai T. D.-H., Vo-Thanh T., Wu S.-H. How perceived internal corporate social responsibility improves employee well-being: the roles of person–organization fit and self-view. *Scandinavian Journal of Management*, 2025, vol. 41, no. 3, art. 101428. <https://doi.org/10.1016/j.scaman.2025.101428>
10. Zimmert F., Saleh R. Regular employees in agriculture: how to describe and improve their working conditions. *Journal of Rural Studies*, 2026, vol. 123, art. 104036. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2026.104036>
11. Wang L., Liu C., Liu D., Zhang Y. Beyond jobs and wages: the hidden cost of automation on corporate social security contributions. *International Review of Financial Analysis*, 2025, vol. 106, art. 104516. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2025.104516>
12. Kim Y., Meganck S. The ripple effects of leadership's motivating language: cultivating employee support for corporate social advocacy and organizational trust. *Public Relations Review*, 2025, vol. 51, no. 4, art. 102615. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2025.102615>
13. Okhotina T. A. Formation of an expanded social package as one of the main mechanisms for the implementation of corporate social protection at the enterprise. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law], 2022, no. 3, pt. 2, pp. 248–255 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/vaael.2123>
14. Berdegue J. A., Trivelli C., Vos R. Employment impacts of agrifood system innovations and policies: a review of the evidence. *Global Food Security*, 2025, vol. 44, art. 100832. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100832>
15. Kamkina O. A. A cost approach to the economic essence of the compensation package of organization personnel. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskie, sotsiologicheskie i ekonomicheskie nauki = Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic Sciences*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 83–89 (in Russian). <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-1-83-89>
16. Kuchmaeva O. V. Social responsibility of business: possibilities for quantitative measurement of the contribution of the social package to employee income. *Uroven' zhizni naseleniya regionov Rossii = Living Standards of the Population in the Regions of Russia*, 2024, vol. 20, no. 1, pp. 39–47 (in Russian). https://doi.org/10.52180/1999-9836_2024_20_1_4_39_47
17. Pranandari A., Paramita W. Signaling competence of agricultural businesses through social media presence to attract gen Z. *Digital Business*, 2025, vol. 5, no. 1, art. 100117. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2025.100117>
18. Bhandari A., Bhuyan M. N. H., Subedi M. Firm social network, information opacity and firm value. *International Journal of Managerial Finance*, 2026, vol. 22, no. 1, pp. 25–66. <https://doi.org/10.1108/IJMF-02-2024-0133>
19. Grishenko N. A. Benefits cafeteria as a tool to enhance attractiveness of the social package. *Rossiiskii nauchnyi zhurnal «Teleskop: zhurnal sotsiologicheskikh i marketingovykh issledovaniy» = Russian scientific journal «Telescope: journal of sociological and marketing research»*, 2021, no. 4, pp. 97–102 (in Russian). https://doi.org/10.51692/1994-3776_2021_4_97
20. Pashkevich O. A., Antonenko M. N., Levkina V. O. Systems analysis and generalization of advanced experience of effective planning and organization of labor in new social and labor relations. *Nauchnyye printsipy regulirovaniya i razvitiya APK: predlozheniya i mekhanizmy realizatsii, 2024* [Scientific principles of development regulation of Agroindustrial Complex: offers and realization mechanisms, 2024]. Minsk, 2024, pp. 114–121 (in Russian).
21. Prikhach A. Yu. Motivational value of the social package. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*, 2023, vol. 29, no. 12, pp. 1512–1522 (in Russian). <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-12-1512-1522>
22. Gusakov V. G. Agriculture in hopes of constructive solutions. *Agrarnaya ekonomika = Agrarian Economics*, 2025, no. 12 (367), pp. 4–9 (in Russian).
23. Gusakov V. G. *Factors and methods of effective management*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2020. 56 p. (in Russian).
24. Pashkevich O. A., Antonenko M. N., Lovkina V. O. Model of effective personnel policy in agro-industrial complex organizations, method of forming an organizational and economic model of sustainable development of rural society. *Formation of effective organizational and economic relations in the agro-industrial complex: issues of theory and methodology*. Minsk, 2022, pp. 116–126 (in Russian).

Информация об авторе

Пашкевич Ольга Александровна – кандидат экономических наук, доцент, заведующий сектором трудовых и социальных отношений, Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси (ул. Казинца, 103, 220108, Минск, Республика Беларусь). Researcher ID: AAE-9119-2021. <http://orcid.org/0000-0001-5125-4359>. E-mail: volha.pashkevich@yahoo.se

Information about the author

Volha A. Pashkevich – Ph. D. (Economics), Associate Professor, Head of Labor and Social Relations Sector, Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus (103, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). Researcher ID: AAE-9119-2021. <http://orcid.org/0000-0001-5125-4359>. E-mail: volha.pashkevich@yahoo.se

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

УДК 633.15:632.7:632.951(476)
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-197-212>

Поступила в редакцию 24.03.2026
Received 24.03.2026

С. В. Бойко, М. Г. Немкевич

Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси,
Прилуки, Республика Беларусь

ДОМИНИРУЮЩИЕ ВИДЫ ВРЕДИТЕЛЕЙ КУКУРУЗЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КУЛЬТУРЫ В БЕЛАРУСИ

Аннотация. Представлены результаты комплексных исследований видового состава и вредоносности фитофагов кукурузы, а также оценки эффективности защитных мероприятий в агроценозах Беларуси в 2023–2025 гг. Установлено, что в почвенной энтомофауне доминируют представители семейства Elateridae (9 видов), среди которых наибольшее значение имеют роды *Agriotes*, *Athous* и *Selatosomus*. Численность проволочников превышала экономический порог вредоносности (16,0–24,3 ос/м²), при этом поврежденность растений без обработки достигала 17,2–30,4 %. Предпосевная обработка семян инсектицидными протравителями снижала повреждаемость растений на 82,5–88,7 % и обеспечивала сохранение до 23,7 % урожая зерна. Выявлено, что вредоносность стеблевого кукурузного мотылька (*Ostrinia nubilalis*) в значительной степени определяется погодными условиями, при этом поврежденность растений в отдельные годы достигала 76,0 %. Наибольшую биологическую эффективность (95,5–100,0 %) продемонстрировали комбинированные инсектициды на основе лямбда-цигалотрина в сочетании с хлорантранилипролом в норме расхода 0,3 л/га, обеспечивая сохранение урожая зерна до 12,3–14,9 %. Отмечено появление и развитие других фитофагов, включая хлопковую совку (*Helicoverpa armigera*), злаковых тлей (Aphididae) и карантинного западного кукурузного жука (*Diabrotica virgifera virgifera*). Установлено, что своевременное применение инсектицидов и феромонный мониторинг позволяют эффективно регулировать их численность. Биологическая эффективность препаратов против хлопковой совки достигала 87,0 %, тлей – 83,2–96,0 %, при этом существенную роль в регуляции их численности играют энтомофаги. Показано, что западный кукурузный жук характеризуется высокой способностью к быстрому распространению, а эффективность инсектицидной защиты против него составила 80,0–99,9 %. Применение комбинированных инсектицидов в сочетании с мониторингом вредителей является ключевым элементом интегрированной защиты кукурузы, обеспечивая высокую биологическую и хозяйственную эффективность в различных агроклиматических условиях.

Ключевые слова: кукуруза, вредители, *Agriotes* spp., *Ostrinia nubilalis*, *Helicoverpa armigera*, тли, *Diabrotica virgifera virgifera*, инсектициды, интегрированная защита растений, агроэкосистема

Для цитирования: Бойко, С. В. Доминирующие виды вредителей кукурузы и эффективность химической защиты в агроценозах Беларуси / С. В. Бойко, М. Г. Немкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 3. – С. 197–212. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-197-212>

Svetlana V. Boiko, Marina G. Nemkevich

Institute of Plant Protection, National Academy of Sciences of Belarus, Priluki, Republic of Belarus

DOMINANT SPECIES OF MAIZE PESTS AND THE EFFICACY OF CHEMICAL CROP PROTECTION IN BELARUS

Abstract. This study presents the results of comprehensive research on the species composition and pest damage caused by maize phytophages, as well as the evaluation of insecticidal measures in Belarusian agroecosystems during 2023–2025. The soil entomofauna was dominated by representatives of the family Elateridae (9 species), with the genera *Agriotes*, *Athous*, and *Selatosomus* having the greatest significance. Wireworm densities exceeded the economic threshold (16.0–24.3 individuals/m²), and plant damage in untreated plots reached 17.2–30.4 %. Seed treatment with insecticidal seed dressings reduced plant damage by 82.5–88.7 % and preserved up to 23.7 % of grain yield. The pest pressure of the European corn borer (*Ostrinia nubilalis*)

was largely determined by weather conditions, with plant damage in certain years reaching 76.0 %. The highest biological efficacy (95.5–100.0 %) was demonstrated by insecticides combining lambda-cyhalothrin and chlorantraniliprole applied at a rate of 0.3 l/ha, preserving 12.3–14.9 % of grain yield. Other pests, including the cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*), cereal aphids (Aphididae), and the quarantine western corn rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera*), were also observed. Timely insecticide application combined with pheromone monitoring effectively regulated pest populations. Biological efficacy of the treatments reached 87.0 % against cotton bollworm and 83.2–96.0 % against aphids, with natural enemies playing a significant role in population regulation. It has been shown that the western corn rootworm has high dispersal potential, and the efficacy of insecticidal control against it was 80.0–99.9 %. The use of combined insecticides in conjunction with pest monitoring is a key component of integrated maize protection, ensuring high biological and economic efficacy under diverse agroclimatic conditions.

Keywords: maize, pests, *Agriotes* spp., *Ostrinia nubilalis*, *Helicoverpa armigera*, aphids, *Diabrotica virgifera virgifera*, insecticides, integrated pest management, agroecosystem

For citation: Boiko S. V., Nemkevich M. G. Dominant species of maize pests and the efficacy of chemical crop protection in Belarus. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 197–212 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-197-212>

Введение. Кукуруза (*Zea mays* L.) является одной из ключевых сельскохозяйственных культур мирового значения, обеспечивающей продовольственную безопасность и устойчивость аграрного сектора. Ежегодно значительные площади посевов кукурузы подвергаются негативному воздействию диких животных, что оказывает существенное влияние на состояние агроценозов. Истощенные в зимний период и лишенные кормов кабаны повреждают семена кукурузы, вызывая необходимость пересева. Зайцы активно объедают молодые растения в фазе прорастания, уничтожая сразу несколько всходов на одном участке. В посевах кукурузы на зерно начиная со стадии молочной спелости фиксируются повреждения, вызванные лосями, кабанами, бобрами и барсуками, которые могут приводить к значительным потерям урожая.

Однако, несмотря на локально выраженное влияние позвоночных животных, основную и наиболее стабильную угрозу для агроценозов кукурузы представляет комплекс вредителей, включающий как аборигенные, так и инвазивные виды: почвообитающих насекомых (личинки шелкунов – проволочники), чешуекрылых и сосущих фитофагов, а также западного кукурузного жука (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte). По данным современных международных исследований, потери урожая кукурузы в зависимости от вида фитофага и условий вегетационного сезона могут достигать 30,0–60,0 %, а в условиях массовых вспышек – быть значительно выше, что обуславливает необходимость совершенствования системы защиты культуры [1, 2].

Особое внимание уделяется почвообитающим вредителям, прежде всего шелкунам (Coleoptera: Elateridae), которые отличаются скрытым образом жизни и длительным циклом развития [3–8]. Современные обзоры подчеркивают, что их контроль требует комплексного подхода, включающего управление агротехникой и применение инсектицидов. При этом большое значение приобретает разработка методов ранней диагностики фитофагов, в том числе с помощью гиперспектральной съемки, позволяющей выявлять стресс растений на ранних стадиях [9].

Среди наиболее вредоносных фитофагов особое значение имеют стеблевые вредители, в частности *Ostrinia nubilalis* Hübner, а также инвазивные виды, такие как *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith и *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte. Современные исследования показывают, что данные виды характеризуются высокой адаптивностью, способностью к быстрому распространению и формированию устойчивых популяций, что усложняет их контроль [10]. Согласно данным исследований стеблевой кукурузный мотылек способен вызывать значительные потери урожая за счет повреждения стеблей и початков, нарушения транспорта питательных веществ и повышения риска вторичных инфекций [11, 12]. Установлено, что при высокой численности популяции поврежденность растений гусеницами может превышать 50,0–70,0 %, особенно в условиях благоприятного гидротермического режима. В последние годы особое внимание уделяется изучению фенологии и динамики популяций *O. nubilalis* в условиях изменяющегося климата. Показано, что повышение температуры воздуха способствует ускорению развития вредителя, увеличению числа генераций и расширению ареала, что требует адаптации систем защиты растений к новым условиям [13]. Кроме того, выявлена тесная зависимость эффективности инсектицидов от фазы развития вредителя и сроков обработки, что подчеркивает необходимость точного мониторинга популяций [14].

Современные мировые подходы к защите кукурузы от стеблевого кукурузного мотылька основаны на принципах интегрированной защиты растений (IPM). Они включают использование устойчивых гибридов, биологических методов (энтомофаги, *Bacillus thuringiensis*, *Trichogramma* spp.), феромонного мониторинга и рационального применения инсектицидов [15–22]. Показано, что комбинированные инсектициды, содержащие пиретроиды и диамины (например, хлорантранилипрол, тетралипрол), обеспечивают высокую биологическую эффективность (до 95,0–100 %), обладают длительным защитным эффектом при минимальном воздействии на полезную энтомофауну [2, 23]. В полевых исследованиях установлено, что применение таких препаратов позволяет существенно снижать численность вредителей и повышать урожайность кукурузы [10]. Однако избыточное применение инсектицидов может оказывать негативное влияние на популяции энтомофагов и нарушать биоценотическое равновесие агроэкосистем [16]. В частности, установлено снижение чувствительности ряда популяций фитофагов к традиционным инсектицидам, включая пиретроиды и регуляторы роста насекомых, что свидетельствует о развитии резистентности [24].

Наряду со стеблевым кукурузным мотыльком существенную угрозу представляют и другие фитофаги, такие как хлопковая совка (*Helicoverpa armigera*) и западный кукурузный жук (*Diabrotica virgifera virgifera*), что требует комплексного подхода к защите посевов [24, 25]. Современные исследования подтверждают, что наибольшая эффективность защитных мероприятий достигается при сочетании агротехнических, биологических и химических методов, направленных на регулирование численности вредителей на уровне ниже экономического порога вредоносности.

Дополнительно отмечается влияние климатических изменений на фитосанитарное состояние агроценозов. Повышение температур и изменение режима осадков способствуют расширению ареалов вредителей и увеличению их вредоносности, что требует адаптации систем защиты растений к новым условиям [26].

Таким образом, современные мировые достижения в области защиты кукурузы от вредителей направлены на развитие интегрированных, экологически безопасных и технологически продвинутых систем, сочетающих мониторинг, биологические методы с рациональным применением инсектицидов. Сохраняется необходимость региональных исследований, учитывающих видовой состав вредителей, их динамику и адаптацию к условиям конкретных агроэкосистем. Это определяет актуальность исследований, направленных на совершенствование системы защиты кукурузы в конкретных агроклиматических условиях.

Методика проведения исследований. В 2023–2025 гг. исследования проводили в различных агроклиматических зонах Республики Беларусь с целью оценки эффективности инсектицидов против основных вредителей кукурузы. Посев культуры на опытном поле РУП «Институт защиты растений» осуществляли сеялкой точного высева Futura Maxi (Mascag, Франция). Семена кукурузы от личинок шелконов (проволочников) в период 2023–2025 гг. обрабатывали на протравочной машине Неге 11 следующими препаратами для предпосевной обработки семян: Имидашанс-С, КС (имидаклоприд, 600 г/л, 4,0–5,0 л/т); Сидоприд, ТКС (имидаклоприд, 600 г/л, 5,0 л/т); Койот, КС (имидаклоприд, 600 г/л, 4,0–5,0 л/т); Харита, КС (тиаметоксам, 600 г/л, 3,0 л/т); Командор, ВРК (имидаклоприд, 200 г/л, 7,0 л/т); Конрад, КС (имидаклоприд, 600 г/л, 4,0–5,0 л/т); Имидор Про, КС (имидаклоприд, 200 г/л, 7,0 л/т).

Дополнительно в 2023–2024 гг. при посеве кукурузы от вредителей вносили инсектицид Шанс Профи, ВДГ (фипронил, 800 г/кг, 0,125–0,175 кг/га). Перед посевом методом рандомизированного отбора отбирали 8 почвенных проб ручным буром конструкции Г. К. Пятницкого диаметром 11,3 см (площадь 0,01 м²) с последующим определением численности вредителей (ос/м²). Учет вредителей проводили методом ручного разбора почвы на полиэтиленовой пленке с последующей идентификацией личинок по видам и возрастам в лабораторных условиях с использованием стереомикроскопа Альтами СМО745-Т. В стадии 5–6 листьев оценивали поврежденность растений личинками шелконов. Биологическую эффективность препаратов определяли по снижению поврежденности растений по сравнению с контролем (без обработки) в соответствии с методическими указаниями по регистрационным испытаниям инсектицидов с использованием формулы

Аббота¹. Хозяйственную эффективность оценивали по урожайности зерна кукурузы и величине сохраненного урожая.

В 2024–2025 гг. исследования проводили в производственных посевах кукурузы в условиях Гомельской области с целью оценки эффективности инсектицидов от стеблевого кукурузного мотылька. Фенологические фазы развития растений учитывали по шкале ВВСН². Начало и массовый лет имаго фитофага определяли с использованием феромонных ловушек (ВНИИКР, 2024 г.) и се-миохемиков (2025 г.) производства «Щелково Агрохим». Учет яйцекладок выполняли на 25 растениях в каждой повторности опыта (4 повторности), размещенных по диагонали участка (по 5 растений в 5 пробах). Оценку биологической эффективности инсектицидов проводили перед уборкой урожая по снижению поврежденности растений гусеницами фитофага. В опыте использовали: Каратэ Зеон, МКС (лямбда-цигалотрин, 50 г/л, 0,2 л/га); Цепеллин Эдванс, КЭ (лямбда-цигалотрин, 50 г/л, 0,15–0,2 л/га); Пиринекс Супер, КЭ (хлорпирифос, 400 г/л + бифентрин, 20 г/л, 0,75–1,0 л/га); Гоплит, КС (лямбда-цигалотрин, 115 г/л + ацетамиприд, 95 г/л + тиаметоксам, 65 г/л, 0,1–0,2 л/га); Амплиго, МКС (лямбда-цигалотрин, 50 г/л + хлорантранилипрол, 100 г/л, 0,1–0,3 л/га); Ластрол, КС (хлорантранилипрол, 100 г/л + лямбда-цигалотрин, 50 г/л, 0,1–0,3 л/га); Кораген, КС (хлорантранилипрол, 200 г/л, 0,15–0,2 л/га); Радиант, КС (спинеторам, 120 г/л, 0,4–0,5 л/га); Декстер, КС (лямбда-цигалотрин, 106 г/л + ацетамиприд, 115 г/л, 0,2 л/га); Стиллет, МД (индоксакарб, 100 г/л + абамектин, 40 г/л, 0,2–0,3 л/га); Промэкс, КЭ (индоксакарб, 125 г/л + лямбда-цигалотрин, 50 г/л, 0,2–0,3 л/га); Норил, КЭ (циперметрин, 50 г/л + хлорпирифос, 500 г/л, 0,2 л/га); Сектор, КЭ (хлорпирифос, 500 г/л + циперметрин, 50 г/л, 0,2 л/га). Хозяйственную эффективность оценивали по урожайности зерна и величине сохраненного урожая относительно контроля.

Учет имаго и гусениц хлопковой совки выполняли аналогично с учетом биологических особенностей вида. Лет имаго фиксировали с использованием феромонных ловушек, размещенных в верхнем ярусе растений, с интервалом учетов 3–5 дней. Учет яйцекладок и гусениц проводили на 25 растениях в каждой повторности по диагонали участка. В 2025 г. оценивали инсектицид Гоплит, КС в нормах расхода 0,1 и 0,2 л/га.

В 2023–2025 гг. заселенность растений тлями определяли путем подсчета колоний на листьях трех ярусов. Учеты проводили на 15 листьях в пяти случайно выбранных точках каждой повторности. В 2025 г. от сосущих вредителей определяли эффективность инсектицидов: Норил, КЭ; Сектор, КЭ; Амплиго, МКС; Ластрол, КС; Декстер, КС; Гоплит, КС.

Обработку посевов осуществляли аккумуляторным опрыскивателем DeWORKS FA 12 с обеспечением равномерного распределения рабочего раствора и соблюдением норм расхода.

В Брестской области в 2023–2025 гг. наземное опрыскивание посевов кукурузы против западного кукурузного жука проводили самоходным опрыскивателем Berthoud Boxer. Учет численности имаго осуществляли с использованием феромонных и желтых клеевых ловушек. В каждом варианте опыта устанавливали по 5 феромонных ловушек с интервалом 50 м. Дополнительно применяли 3 желтые клеевые ловушки на повторность, размещенные по диагонали участка на расстоянии 5 м друг от друга на высоте 1 м. Ловушки устанавливали за 3–5 суток до обработки с последующей заменой в сроки учетов. Определяли среднесуточную численность фитофага на одну ловушку за 7 суток. В опыте использовали инсектициды: Генезис, МКС (хлорантранилипрол, 200 г/л, 0,15–0,2 л/га); Эфория, КС (лямбда-цигалотрин, 106 г/л + тиаметоксам, 141 г/л, 0,2 л/га); Органза, КС (ацетамиприд, 100 г/л + лямбда-цигалотрин, 100 г/л, 0,2 л/га); Ластрол, КС (0,2 л/га); Солам, КС (лямбда-цигалотрин, 106 г/л + тиаметоксам, 141 г/л, 0,2 л/га); Вайего, КС (тетранилипрол, 200 г/л, 0,2 л/га). Статистическую обработку результатов выполняли по методике Б. А. Доспехова с использованием MS Excel³. Достоверность различий оценивали по средним значениям с учетом повторностей опытов.

¹ Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов, родентицидов и феромонов в сельском хозяйстве / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию, Ин-т защиты растений; под ред. А. А. Запрудского, С. В. Бойко. Мн.: Журн. «Бел. сел. хоз-во», 2024. 620 с.

² Супранович Р. В., Сорока С. В., Сорока Л. И. Определитель фаз развития однодольных и двудольных растений по шкале ВВСН. Мн.: Колорград, 2016. 102 с.

³ Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): учебник. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Результаты исследований и их обсуждение. В ходе энтомологического мониторинга агроценоза кукурузы в 2023–2025 гг. проведено изучение видового состава, таксономической структуры и комплекса почвообитающих вредителей из семейства Щелкуны (Coleoptera: Elateridae). В исследуемый период выявлено 9 видов вредных насекомых, относящихся к 1 семейству (Elateridae). Общий объем выборки составил 320 особей.

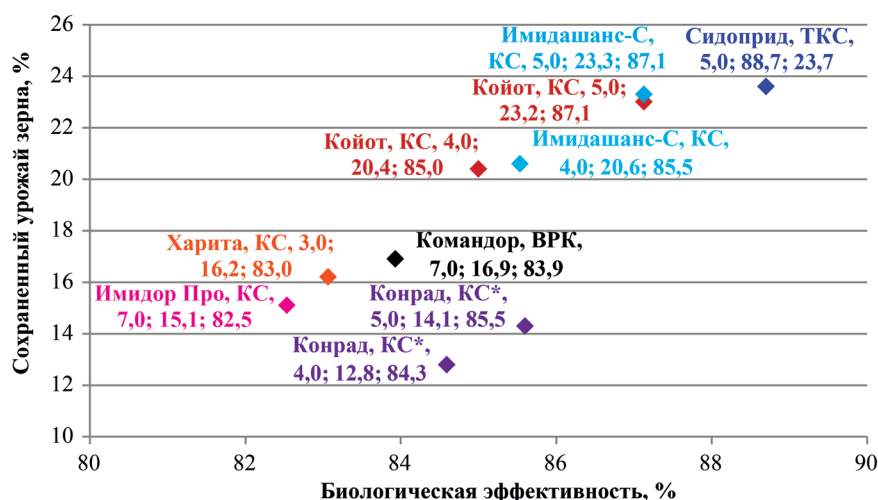
В агроценозах кукурузы идентифицированы следующие виды: *Agrypnus murinus* L., 1758; *Adrastus pallens* F.; *Agriotes lineatus* L.; *Agriotes sputator* L.; *Agriotes obscurus* L.; *Athous haemorrhoidalis* F.; *Hemicrepidius niger* L.; *Cidnopus aeruginosus* Oliv.; *Prosternon tessellatum* L. Анализ структуры доминирования показал, что наибольшую долю в энтомокомплексе занимают представители рода *Agriotes*. Их суммарная численность составила около 42,5 % от общего объема выборки, что позволяет отнести их к группе доминирующих видов. Среди них наиболее распространенными были *Agriotes lineatus* (17,8 %) и *Agriotes sputator* (14,7 %), тогда как доля *Agriotes obscurus* составила 10,0 %. К группе субдоминантов отнесены виды *Athous haemorrhoidalis* (13,1 %), *Hemicrepidius niger* (11,6 %) и *Cidnopus aeruginosus* (9,7 %), суммарная доля которых составила 34,4 %. Эти виды характеризуются устойчивым присутствием в агроценозе, однако уступают доминантам по численности. Редкими (рецентными) видами являлись *Agrypnus murinus* (7,2 %), *Adrastus pallens* (6,3 %) и *Prosternon tessellatum* (9,6 %), совокупная доля которых составила 23,1 %. Их численность носила эпизодический характер и в меньшей степени влияла на общий уровень вредоносности.

Таким образом, структура энтомокомплекса щелкунов в агроценозе кукурузы характеризуется преобладанием видов рода *Agriotes*, формированием группы субдоминантов и наличием комплекса редких видов. Полученные данные имеют важное значение для разработки дифференцированных мер защиты растений с учетом видового состава и степени доминирования вредителей.

Погодные условия вегетационного периода 2023–2025 гг. (Минский р-н) существенно влияли на рост кукурузы и активность вредителей. В 2023 г. холодная погода в начале мая (I декада – +7,9 °C, на 3,7 °C ниже нормы) при неравномерном, но обильном выпадении осадков замедлила появление всходов, тогда как теплая и сухая III декада мая (+16,2 °C) и благоприятные условия в начале июня способствовали активному росту растений и повреждению их личинками щелкунов в стадии 5–6 листьев. В 2024 г. теплая и сухая II декада мая (дневная температура до +24,9 °C) и повышенные температуры в III декаде (+19,3 °C) усилили вредоносность почвообитающих фитофагов, а умеренные осадки в начале июня (21,4 мм) обеспечили оптимальный рост кукурузы. В 2025 г. холодная и влажная III декада мая (+11,3 °C, 99,6 мм) сдерживала рост растений и снижала активность почвообитающих вредителей, однако благоприятные температуры и осадки в I–II декадах июня (+17,4 °C, 57,6 мм) создавали условия для питания личинок щелкунов и усиления поврежденности посевов.

В 2023–2025 гг. численность проволочников на опытных делянках перед посевом кукурузы превышала экономический порог вредоносности (ЭПВ 12,0 ос/м²), составляя 24,3; 18,0 и 16,0 ос/м² в соответствующие годы. В 2023 г. преобладали личинки 1-го года жизни (45,5 %) при доминировании рода *Agriotes* (72,7 %), в 2024-м увеличилась доля личинок старших возрастов (личинки 3-го года жизни – 39,1 %), при этом видовой состав был представлен родами *Athous* (42,1 %) и *Selatosomus* (57,9 %). В 2025 г. доля личинок 3-го и 4-го года жизни составила 37,5 и 27,2 % соответственно, а таксономический состав включал роды *Agriotes* (55,8 %) и *Athous* (44,2 %). Поврежденность растений в контрольном варианте без предпосевной обработки семян постепенно снижалась – с 30,4 % в 2023 г. до 17,2 % в 2025-м, что отражает тенденцию к уменьшению вредоносности при сохранении превышения ЭПВ. Несмотря на это, во все годы исследований численность вредителя превышала экономический порог вредоносности, что обосновывало необходимость применения защитных мероприятий, включая предпосевную обработку семян инсектицидными препаратами.

На рисунке представлена зависимость сохраненного урожая зерна кукурузы (%) от уровня биологической эффективности (%) инсектицидных протравителей, примененных для предпосевной обработки семян (средние данные полевых опытов за 2023–2025 гг.). В целом прослеживается прямая положительная корреляция: с увеличением биологической эффективности препа-



Зависимость величины сохраненного урожая кукурузы от биологической эффективности инсектицидов при предпосевной обработке семян (по данным полевых опытов, средние данные 2023–2025 гг.); * – данные 2025 г.

Relationship between the preserved maize grain yield and the biological efficacy of insecticides used in pre-sowing seed treatment (based on field trial data, mean values for 2023–2025); * – 2025 data.

ратов возрастает доля сохраненного урожая зерна. Наиболее высокие показатели были получены при применении препаратов с биологической эффективностью более 85,0 %. Максимальные значения сохраненного урожая зерна (23,3–23,7 %) отмечены при использовании препаратов на основе имидаклоприда (600 г/л) – Имидашанс-С, КС (5,0 л/т) и Сидоприд, ТКС (5,0 л/т), которые также характеризовались наивысшей биологической эффективностью (87,1–88,7 %). Высокие результаты отмечены и при применении препарата Койот, КС (5,0 л/т), обеспечившего сохранение урожая на уровне 23,2 % при биологической эффективности 87,1 %.

Препараты с биологической эффективностью 85,0–85,5 % – Имидашанс-С, КС (4,0 л/т) и Койот, КС (4,0 л/т) – обеспечивали сохраненный урожай в пределах 20,4–20,6 % (см. рисунок). Менее выраженный эффект отмечен у препаратов Харита, КС (3,0 л/т) и Командор, ВРК (7,0 л/т), характеризующихся биологической эффективностью 83,0–83,9 % и хозяйственной эффективностью 16,2–16,9 %. Минимальные показатели (12,8–15,1 %) зафиксированы у вариантов Конрад, КС (4,0–5,0 л/т) и Имидор Про, КС (7,0 л/т) при биологической эффективности 82,5–85,5 %.

В 2023–2024 гг. внесение инсектицида Шанс Профи, ВДГ (фипронил, 800 г/кг) в норме 0,125–0,175 кг/га при посеве кукурузы обеспечивало снижение поврежденности растений проводочниками на 86,8–96,3 %, что значительно превышало показатели контроля. В 2023 г. сохраненный урожай зерна составил 17,4–20,9 ц/га (15,3–18,0 %), в 2024 г. – 18,8–22,2 ц/га (18,2–21,5 %), что сопоставимо с эффективностью эталонного препарата Регент 20Г, Г (фипронил, 20 г/кг, 5,0–7,0 кг/га), при котором сохраненный урожай достигал 21,0–24,3 ц/га (20,4–23,6 %).

Анализ многолетних наших данных (2006–2025 гг.) показал, что эффективность инсектицидных протравителей против проводочников варьировала в широких пределах – от 74,0 до 94,6 % в зависимости от действующего вещества и состава препарата [27]. Среди монокомпонентных препаратов наиболее высокая биологическая эффективность отмечена у средств на основе фипронила (в среднем до 91,6 %) и имидаклоприда в отдельных препаративных формах (до 88,0 %), тогда как препараты на основе ацетамиприда и бифентрина обеспечивали более умеренный уровень защиты (около 77,0–78,0 %). Препараты на основе неоникотиноидов (имидаклоприд, клотианидин, тиаметоксам) обеспечивали снижение поврежденности растений личинками щелкунов в диапазоне 82,0–85,6 %, что свидетельствует об их высокой пригодности для защиты кукурузы на ранних этапах развития. Наибольшая результативность установлена у двухкомпонентных препаратов, где биологическая эффективность достигала 89,6–94,6 %, что обусловлено синергизмом действующих веществ. Инсектицидные протравители с фунгицидными компонентами обеспечивали также стабильный уровень защиты (82,1–83,6 %), совмещая инсектицидное и фунгицидное действие.

Таким образом, для защиты растений кукурузы от личинок щелкунов ассортимент препаратов для предпосевной обработки семян в «Государственном реестре средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь» (далее – Государственный реестр средств защиты растений) вполне достаточен.

Среди комплекса вредных организмов, повреждающих посевы кукурузы, особое значение имеет стеблевой кукурузный мотылек (*Ostrinia nubilalis* Hbn.), который относится к числу доминантных чешуекрылых вредителей данной культуры [28–30]. Его вредоносность обусловлена высокой численностью, широким ареалом распространения и способностью повреждать растения на различных этапах органогенеза. Гусеницы вредителя проникают в стебли и початки, нарушая проводящую систему растений, что приводит к снижению продуктивности и ухудшению качества зерна. В связи с этим эффективность инсектицидной защиты кукурузы во многом определяется степенью контроля численности именно данного вида.

Погодные условия вегетационных периодов 2024–2025 гг. (метеостанция г. Гомель) существенно влияли на фенологию и вредоносность *O. nubilalis*. Выход гусениц из диапаузы наблюдался в конце мая – начале июня при температурах на 1,7–3,3 °C выше нормы и влажности воздуха в I декаде июня 2025 г. 58,8 мм (280 % нормы). Массовое окукливание происходило в июне, лет имаго и начало яйцекладки – с конца июня до начала июля. В 2024 г. жаркая и сухая погода ускоряла вылет имаго, но снижала выживаемость яиц, тогда как в 2025-м умеренные температуры и повышенная влажность обеспечивали высокую выживаемость потомства. Массовая яйцекладка и отрождение гусениц приходились на первую половину июля, определяя интенсивность питания в июле – августе.

Мониторинг стеблевого кукурузного мотылька проводили в 2024–2025 гг. с использованием феромонных ловушек. В 2024 г. применяли феромоны самок (ВНИИКР), а в 2025-м впервые использовали семиохемические диспенсеры, что позволило уточнить сроки начала и массового лета имаго. Данные феромономониторинга показали, что массовый лет вредителя приходился на II–III декады июля, с наибольшей численностью в Гомельской области (до 13,0 ос/ловушку). Анализ двухгодичных наблюдений показал, что фенология развития стеблевого кукурузного мотылька и уровень его вредоносности тесно связаны с сочетанием температуры и влажности воздуха. Высокие температуры при недостатке осадков снижали выживаемость яиц и развитие гусениц, тогда как умеренные температуры и достаточная влажность способствовали массовому выходу гусениц и повышению их вредоносности. В 2024 г. в стадии девяти листьев кукурузы (ДК 19) учитывалось 3,3 яйцекладки/100 растений; к стадии ранней молочной спелости (ДК 73) 20,0 % растений были заселены гусеницами (3-й возраст – 70 %, 4-й – 30 %), численность составила 0,2 ос/растение, а поврежденность растений достигла 29,0 %. В 2025 г. численность мотылька была выше: 7,0 яйцекладки/100 растений на момент обработки, к стадии начала молочной спелости гусеницами было заселено 42,4 % растений (3-й возраст – 68 %, 4-й возраст – 32 %), численность – 0,4 ос/растение, поврежденность культуры фитофагом – 76,0 %. Вредоносность проявлялась преимущественно через механические повреждения: слом стеблей – 63,2 %, внедрение в стебель – 31,6 %, повреждение початков – 5,2 %, что приводило к значительным потерям урожая. Результаты подчеркивают необходимость комплексной защиты с учетом биологии фитофага и фазового состояния растений.

Анализ представленных данных в табл. 1 свидетельствует о высокой эффективности применения инсектицидов для защиты посевов кукурузы от стеблевого кукурузного мотылька в 2024–2025 гг. В 2024 г. наибольшую биологическую эффективность (95,5–100 %) продемонстрировали инсектициды комбинированного действия на основе лямбда-цигалотрина и хлорантранилипрола (Амплиго, МКС; Ластрол, КС), а также препараты на основе спинеторама и хлорантранилипрола. Их применение обеспечивало минимальный уровень поврежденности растений (0–1,3 %) и формирование наибольшей урожайности зерна (85,4–86,1 ц/га). Сохраненный урожай при этом достигал 9,4–10,0 ц/га (12,3–13,2 %). Препараты на основе пиретроидов и фосфорорганических соединений обеспечивали эффективность 75,9–89,7 %, при этом отмечались повышенная повреждаемость растений и снижение сохранности урожая зерна.

В 2025 г., характеризовавшемся более высокой плотностью яйцекладок вредителя, эффективность инсектицидов проявилась более отчетливо. Максимальная биологическая эффективность

Таблица 1. Биологическая и хозяйственная эффективность инсектицидов в посевах кукурузы (полевые опыты)

Table 1. Biological and economic efficacy of insecticides in maize crops (field trials)

Год	Препарат	Норма расхода, л/га	Повреждено растений, %	Биологическая эффективность, %	Урожайность зерна, ц/га	Сохраненный урожай	
						ц/га	%
Петриковский район Гомельской области, гибрид Полтава							
2024	Контрольный вариант (без обработки)	—	29,0	—	76,1	—	—
	Каратэ Зеон, МКС	0,2	5,0	82,8	79,5	3,4	4,5
	Цепеллин Эдванс, КЭ	0,15	7,0	75,9	78,8	2,7	3,5
		0,2	6,0	79,3	79,1	3,0	3,9
	Пиринекс Супер, КЭ	0,75	5,0	82,8	80,5	4,4	5,8
		1,0	3,0	89,7	80,9	4,8	6,3
	Гоплит, КС	0,1	6,0	79,3	79,2	3,1	4,1
		0,2	4,5	84,5	80,1	4,0	5,3
	Амплиго, МКС	0,1	1,3	95,5	83,7	7,6	10,0
		0,3	0	100,0	85,4	9,4	12,3
	Ластрол, КС	0,1	1,0	96,6	84,2	8,2	10,7
		0,3	0	100,0	86,1	10,0	13,2
	Кораген, КС	0,15	1,7	94,1	85,2	9,1	12,0
		0,2	1,1	96,2	85,4	9,3	12,2
	Радиант, КС	0,4	1,2	95,9	85,6	9,5	12,5
		0,5	0	100,0	85,8	9,7	12,7
					НСП ₀₅ 2,1	—	—
Буда-Кошелевский район Гомельской области, гибрид Мадлен							
2025	Контрольный вариант (без обработки)	—	76,0	—	185,0	—	—
	Декстер, КС	0,15	4,0	94,7	205,9	20,9	11,3
		0,2	0	100,0	211,4	26,4	14,3
	Гоплит, КС	0,2	5,0	93,4	208,1	23,1	12,5
	Амплиго, КС	0,1	4,0	94,7	206,9	21,9	11,8
		0,3	0	100,0	212,5	27,5	14,9
	Ластрол, КС	0,1	12,0	84,2	207,4	22,4	12,1
		0,3	0	100,0	212,0	27,0	14,6
	Стиллет, МД	0,2	20,0	73,7	197,9	12,9	7,0
		0,3	15,0	80,3	199,4	14,4	7,8
	Промэкс, КЭ (в процессе регистрации)	0,2	24,0	68,4	190,6	9,6	5,2
		0,3	13,0	82,9	201,8	16,8	9,1
	Норил, КЭ	0,2	25,0	67,1	193,9	8,9	4,8
	Сектор, КЭ	0,2	17,0	77,6	201,7	16,7	9,0
				НСП ₀₅ 5,0	НСП ₀₅ 4,46	—	—

(100 %) и полное предотвращение повреждений растений отмечены при применении препаратов Амплиго, МКС (0,3 л/га), Ластрол, КС (0,3 л/га) и Декстер, КС (0,2 л/га). Указанные варианты обеспечили наибольшую биологическую урожайность зерна (211,4–212,5 ц/га) и максимальный сохраненный урожай (26,4–27,5 ц/га, или 14,3–14,9 %). Биологическая эффективность на уровне 77,6 и 93,4 % отмечена у препаратов Гоплит, КС и Сектор, КЭ. Наименьшая эффективность (68,4 и 82,9 %) установлена у препаратов на основе индоксакарба и его комбинаций, что сопровождалось повышенной поврежденностью растений (13,0–24,0 %) и снижением хозяйственной эффективности. Сравнительный анализ показал, что в условиях усиления фитосанитарной нагрузки возрастает значение высокоэффективных комбинированных препаратов, обеспечивающих стабильный защитный эффект. Наиболее результативными в оба года исследований оказались инсектициды, содержащие лямбда-цигалотрин в сочетании с хлорантранилипролом, что обусловило достижение максимальных показателей биологической (до 100 %) и хозяйственной эффективности (до 14,9 %).

Статистическая обработка экспериментальных данных включала вычисление средних значений, стандартного отклонения и наименьшей существенной разницы (HCP₀₅), что обеспечивало

оценку статистической достоверности различий между вариантами по биологической и хозяйственной эффективности. В 2024 г. средняя биологическая эффективность комбинированных препаратов составила $(97,0 \pm 0,5) \%$, что достоверно превышало эффективность препаратов на основе лямбда-цигалотрина в одиночном применении $((79,3 \pm 1,0) \%; p < 0,05)$. Средний сохраненный урожай зерна кукурузы при комбинированных препаратах достигал $(12,2 \pm 0,6) \%$, тогда как у препаратов с одиночными компонентами он составил $(4,2 \pm 0,35) \%$. В 2025 г. средняя биологическая эффективность комбинированных препаратов достигала $(100 \pm 0 \%)$, а средний сохраненный урожай зерна – $(14,6 \pm 0,5) \%$, что достоверно превышало показатели других препаратов (средняя эффективность 75,0–86,0 %, сохраненный урожай зерна 5,0–9,5 %; $p < 0,05$). Данные показатели подтверждают прямую корреляцию между снижением поврежденности растений и увеличением урожайности зерна культуры.

Хлопковая совка (Lepidoptera: Noctuidae: *Helicoverpa armigera* Hbn.) – широко распространенный многоядный фитофаг, значительная вредоносность которого обусловлена высокой мобильностью, полифагией, быстрой репродуктивностью и переходом в диапаузу, что позволяет насекомому быстро приспосабливаться к новым культурам и территориям [11, 24].

В 2022 г. феромономониторинг в агроценозах кукурузы показал отсутствие хлопковой совки на площади 980 га в Брестской области, однако гусеницы и имаго фитофага выявлены на цветущей сорной и декоративной растительности в Гомельской и Минской областях, что подчеркивает необходимость дальнейшего мониторинга для своевременного проведения защитных обработок. В 2023 г. при использовании светодиодной клеевой ловушки «Дельта» в Брестской области 10 июля было отловлено 1,0 имаго/сут, в Гомельской области 12 июля – 2,0 имаго/сут. В условиях 2025 г. (Гомельская обл.) массовый лет имаго хлопковой совки на феромонные ловушки в агроценозах кукурузы отмечен в конце III декады июня – I декаде июля. Начало отрождения гусениц зафиксировано во II декаде июля, массовое – с III декады июля. Экономический порог вредоносности в Беларуси разрабатывается; ориентировочно принят российский показатель – 1,0–2,0 гусеницы/10 растений. До применения инсектицидов численность гусениц варьировала от 1,7 до 1,8 ос/10 растений. В контрольном варианте на стадии начала молочной спелости (ДК 73) 25,5 % растений были заселены гусеницами 2-го и 3-го возраста (1,4 ос/растение), поврежденность растений составила 36,0 %, при этом фитофаг повреждал початки кукурузы. Применение трехкомпонентного инсектицида Гоплит, КС в стадии начала цветения кукурузы (ДК 61) при пороговой плотности фитофага в норме расхода 0,1 л/га снижало численность гусениц на 3-и сутки на 65,0 %, на 7-е – на 73,9 %, на 14-е сутки биологическая эффективность была 78,5 %. При норме расхода препарата 0,2 л/га снижение численности гусениц составило 85,0–87,0 %, на 14-е сутки – 85,7 %. В результате обработки инсектицидом с нормой расхода 0,1 л/га получена биологическая урожайность кукурузы 190,0 ц/га с сохранением 5,0 ц/га зерна (2,7 %), что статистически не отличалось от контроля. При норме расхода 0,2 л/га сохраненный урожай зерна достиг 13,0 ц/га (7,0 %) и был достоверно выше варианта без обработки (табл. 2).

Таблица 2. Биологическая и хозяйственная эффективность инсектицида Гоплит, КС в снижении численности гусениц хлопковой совки в посевах кукурузы (полевой опыт, Гомельский р-н, Гомельская обл., гибрид ДКС 3050, 2025 г.)

Table 2. Biological and economic efficacy of the insecticide Goplit, SC in reducing the number of cotton bollworm larvae in maize crops (field trial, Gomel District, Gomel Region, hybrid DKS 3050, 2025)

Вариант опыта	Норма расхода препарата, л/га	Биологическая эффективность, %			Биологическая урожайность зерна, ц/га	Сохраненный урожай зерна	
		3-и сутки	7-е сутки	14-е сутки		ц/га	%
Контрольный вариант (без обработки)	—	—	—	—	185,0	—	—
Гоплит, КС	0,1	65,0	73,9	78,5	190,0	5,0	2,7
	0,2	85,0	87,0	85,7	198,1	13,0	7,0
					НСП ₀₅ 6,43	—	—

Примечание. Дата обработки – 24.07.2025 г.; ЭПВ – 1,0–2,0 гусеницы/10 растений.

Note. Treatment date: July 24, 2025; ET: 1.0–2.0 caterpillars/10 plants.

Данные результаты свидетельствуют о высокой инсектицидной эффективности препарата Гоплит, КС от хлопковой совки и положительном влиянии на сохранение урожая кукурузы.

При установке дельтовидных ловушек с феромоном карантинного объекта кукурузной лиственной совки (*Spodoptera frugiperda*) на территории Республики Беларусь фитофаг не обнаружен, тогда как в ловушки активно привлекался вид *Sideridis* spp. (3,0–5,0 ос/ловушку), что следует учитывать при интерпретации результатов феромонного мониторинга.

В посевах кукурузы в 2023–2025 гг. (Гомельская обл.) были обнаружены следующие виды тлей: большая злаковая (*Sitobion avenae* Fabr.), черемуховая (*Rhopalosiphum padi* L.), свекловичная (бобовая) (*Aphis fabae* Scopoli), сорговая (кукурузная) (*R. maidis* Fitch) и бересклетовая (*Aphis evonymi* F.). Наибольшее распространение имели колонии черемуховой и свекловичной тлей, которые повреждали растения в период цветения, завязывания и начала налива зерна, тогда как *S. avenae* покидает посевы до выбрасывания нитей из початков. Фитофаги образуют плотные колонии (от 5,0 до более 500,0 особи) на верхних и нижних листьях, метелках, листовых влагалищах и зеленых обертках початков, что особенно опасно в годы с жаркой и сухой погодой. Повреждение метелок и початков сопровождается высасыванием растительных соков и накоплением медвяной росы, препятствующей нормальному опылению, а тли могут быть переносчиками вирусных заболеваний (GNO).

Защита растений осложняется тем, что колонии сосредоточены на верхушках растений, поэтому эффективная инсектицидная обработка требует опрыскивателей с высоким клиренсом. Численность и вредоносность тлей регулируется комплексом энтомофагов: кокцинеллидами (Coccinellidae), златоглазками (Chrysopidae) и журчалками (Syrphidae). При высокой численности естественных врагов химические обработки могут быть отложены. В 2025 г. в начале формирования метелки (ДК 51) численность тлей снизилась до 11,3 % под влиянием энтомофагов. На растениях кукурузы фиксировалось питание имаго и личинок кокцинеллид (*Coccinella septempunctata*, *Hippodamia tredecimpunctata*) – 0,09–0,41 ос/стебель, личинок златоглазок и сирфид – 0,21–0,30 ос/стебель. Процент паразитированных тлей наездниками (Aphidiidae) достигал 52,0.

В 2023–2024 гг. регистрировалась низкая численность тлей в агроценозах культуры в Гомельской области, тогда как в 2025 г. в Буда-Кошелевском районе активное развитие сосущих вредителей наблюдалось до стадии 9 листьев (ДК 19). Когда заселенность достигла 26,9 % и превысила пороговое значение (ЭПВ 20,0 %), в колониях насчитывалось более 300,0 особи. Показана высокая биологическая эффективность применяемых инсектицидов в снижении заселенности растений кукурузы колониями тлей. Препараты Норил, КЭ (0,2 л/га) и Амплиго, МКС (0,1–0,3 л/га) обеспечивали значительное снижение заселенности растений фитофагами: на 3-и сутки после обработки доля заселенных растений снижалась до 1,8–3,4 %, на 7-е и 14-е сутки – до 0,8–2,3 %, что соответствовало 88,8–95,7 % снижения численности фитофага. Инсектициды Сектор, КЭ (0,2 л/га), Ластрол, КС (0,1–0,3 л/га), Декстер, КС (0,15–0,2 л/га) и Гоплит, КС (0,1–0,2 л/га) показали сопоставимую эффективность с эталонными средствами: снижение заселенности на 3-и сутки составило 1,7–3,8 %, на 7-е – 1,3–3,4 %, на 14-е – 0,9–1,9 %, что соответствовало 83,2–96,0 % сокращения численности тлей (табл. 3).

Таким образом, все испытываемые инсектициды обеспечивали стабильное снижение заселенности растений тлями ниже ЭПВ, демонстрируя высокую биологическую эффективность и целесообразность их применения для защиты кукурузы в период выбрасывания метелки – цветения. С учетом совместного проведения обработок против тлей и стеблевого кукурузного мотылька сохраненный урожай зерна отражает суммарное влияние комплекса вредителей и приведен в табл. 1.

Западный кукурузный жук (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte, Chrysomelidae) представляет серьезную угрозу для посевов кукурузы и является карантинным объектом на территории Республики Беларусь [31, 32]. Впервые насекомое было зафиксировано в 2009 г. в Брестской области (ОАО «Комаровка») на площади 45 га. На сегодняшний день *Diabrotica virgifera* является одним из ключевых вредителей кукурузы наряду со стеблевым кукурузным мотыльком и щелкунами. Совместно со специалистами карантинной службы фитосанитарные наблюдения проведены более чем на 60 тыс. га посевов кукурузы с использованием 1 126–2 216 феромонных ловушек в разные годы (2022–2024 гг.). Зафиксированы новые очаги инвазии в Брестской, Гомельской, Гродненской и Минской областях с численностью имаго от 2,0 до 106,0 ос/ловушку за 7 суток.

Таблица 3. Биологическая эффективность инсектицидов в снижении заселенности растений кукурузы колониями тлей (полевой опыт, Буда-Кошелевский район, Гомельская обл., гибрид Мадлен, 2025 г.)

Table 3. Biological efficacy of insecticides in reducing aphid colony infestation of maize plants (field trial, Buda-Koshelyovo District, Gomel Region, hybrid Madlen, 2025)

Вариант, норма расхода препарата, л/га		Заселено растений, %			Биологическая эффективность, %			
		до обработки	после обработки по дням учетов					
			3-и сутки	7-е сутки	14-е сутки	3-и сутки	7-е сутки	14-е сутки
Контрольный вариант (вариант без обработки)		26,9	34,2	32,6	11,6	—	—	—
Норил, КЭ*, 0,2			3,2	2,3	0,8	90,6	92,9	93,1
Сектор, КЭ, 0,2			3,6	2,5	0,8	89,5	92,3	93,1
Амплиго, МКС*	0,1		3,4	2,0	1,3	90,1	93,9	88,8
	0,3		1,8	1,4	0,9	94,7	95,7	92,2
Ластрол, КС*	0,1		3,3	2,3	1,3	90,4	92,9	88,8
	0,3		1,7	1,5	1,0	95,0	95,4	91,4
Декстер, КС	0,15		2,4	2,0	1,7	93,0	93,9	85,0
	0,2		2,0	1,5	1,1	94,2	95,4	90,3
Гоплит, КС*	0,1		3,8	3,4	1,9	88,9	89,6	83,2
	0,2		1,7	1,3	0,9	95,0	96,0	92,0

Примечание. Дата обработки – 14.07.2025 г.; ЭПВ – 20,0 % заселенных растений; * – в процессе регистрации.
 Note. Treatment date: July 14, 2025; ET: 20.0 % of infested plants; * – registration pending.

Распространение жуков связано с транспортом, ветром, несоблюдением севооборота и зараженной почвой. Скорость распространения в Республике Беларусь оценивается в 17 км/год. Комплексная защита включает: ежегодный феромономониторинг имаго для выявления новых очагов и недопущения распространения; фитосанитарные мероприятия – уборку кукурузы в поздние сроки с последующей глубокой вспашкой; размещение посевов следующего сезона на $\geq 1,5$ км от заселенных участков; соблюдение севооборота; карантинные, охранные и буферные зоны; применение инсектицидов различных химических классов, зарегистрированных в Государственном реестре средств защиты растений, с учетом биологии вредителя и порогов численности¹. Пиретроидные и неоникотиноидные препараты рекомендуется использовать преимущественно в первичных очагах.

Внедрение технологии защиты в 2022–2024 гг. на площади 25 тыс. га позволило сохранить урожай зерна на уровне 11,8–15,8 ц/га (15,0–17,7 %) и зеленой массы – 83,9–88,7 ц/га, обеспечив экономическую эффективность за счет рационального применения средств защиты и снижения объема обработок.

В 2023–2025 гг. погодные условия существенно влияли на фенологию и массовый лет *D. virgifera virgifera*. В 2023 г. жаркая и сухая погода в июле (+21,0...23,8 °C) создала водный стресс у кукурузы и способствовала развитию вредителя, массовый лет отмечен в августе. В 2024 г. начало лета имаго совпало с повышением температуры и выпадением осадков во II декаде июля, массовый лет – в III декаде месяца (+20,7 °C, осадки 70 мм). В августе температура оставалась высокой, что способствовало росту кукурузы и активности жуков. В 2025 г. ранний выход личинок зафиксирован в апреле – мае (+15,2...16,2 °C), массовый лет имаго – в августе из-за относительно прохладного июля (+20,6 °C).

В среднем по республике (южные регионы) феромонные ловушки типа PAL показали наибольший отлов имаго западного кукурузного жука – до 65,7 ос/ловушку в сутки в 2024 г. и 48,5 ос/ловушку в сутки в 2025-м, обеспечивая достоверный мониторинг численности вредителя. Желтые клеевые ловушки с феромоном фиксировали 31,7–44,3 ос/ловушку в сутки, а без феромона – всего 1,2–1,7 ос/ловушку в сутки.

¹ Методические указания по выявлению, идентификации и ликвидации западного кукурузного жука (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte) / С. В. Сорока, Л. И. Трепашко, А. В. Пискун, Т. В. Ерчик; Ин-т защиты растений, Гл. гос. инспекция по семеноводству, карантину и защите растений. Мн.: Коллоград, 2019. 28 с.

Проведенные производственные опыты в хозяйствах Брестской области в 2023–2025 гг. показали высокую заселенность посевов кукурузы вредителем и позволили оценить биологическую эффективность различных инсектицидов. В 2023 г. на гибриде МАС 28А исходная численность вредителя составляла 67,3 ос/феромонную ловушку за 7 суток. Применение инсектицида Органза, КС обеспечило снижение численности вредителя на 88,1–91,4 % в течение 21 суток. Инсектицид Генезис, МКС на основе хлорантранилипрола продемонстрировал следующую эффективность: при норме расхода 0,15 л/га снижение численности составило 80,0–82,6 %, тогда как при увеличении нормы до 0,2 л/га эффективность возросла до 84,2–87,2 % (табл. 4). Таким образом, отмечается зависимость эффективности препарата от нормы расхода.

Таблица 4. Биологическая эффективность инсектицидов от западного кукурузного жука в посевах кукурузы (производственные опыты, хозяйства Брестской области)

Table 4. Biological efficacy of insecticides against the western corn rootworm in maize crops (production trials, farms of Brest Region)

Вариант, норма расхода препарата, л/га		Численность жуков, ос/феромонную ловушку за 7 суток						
		до обработки	после обработки по дням учетов			биологическая эффективность, %		
			3-и сутки	14-е сутки	21-е сутки	3-и сутки	14-е сутки	21-е сутки
Гибрид МАС 28А, 2023 г., дата обработки – 22.08.2023 г.								
Органза, КС, 0,2		67,3	8,0	7,8	5,8	88,1	88,4	91,4
Генезис, МКС	0,15		13,7	13,3	11,7	80,0	80,2	82,6
	0,2		10,6	10,3	8,6	84,2	84,7	87,2
Гибрид ТК 195, 2024 г., дата обработки – 30.07.2024 г.								
Органза, КС, 0,2		202,7	32,1	14,3	1,0	84,1	92,9	99,5
Ластрол, КС, 0,2			38,0	18,9	2,0	81,3	90,7	99,0
Эфория, КС, 0,2			29,7	12,1	1,0	85,3	94,0	99,5
Солам, КС, 0,2			30,9	13,9	1,0	84,8	93,1	99,5
Гибрид МАС 28А, 2025 г., дата обработки – 14.08.2025 г.								
Эфория, КС, 0,2		290,0	0,6	0,4	0,3	99,8	99,9	99,9
Вайего, КС, 0,2			5,0	8,0	14,0	98,3	97,2	95,2
Органза, КС, 0,2			3,0	5,0	11,0	99,0	98,3	96,2

В 2024 г. (гибрид ТК 195) зафиксирована значительная исходная численность вредителя (202,7 ос/ловушку). Все исследуемые инсектициды показали высокую биологическую эффективность. Уже на 14-е сутки после обработки снижение численности вредителя достигало 99,0–99,5 % независимо от применяемого препарата. Наиболее быстрый эффект наблюдался у препаратов, содержащих комбинации действующих веществ (лямбда-цигалотрин + тиаметоксам), что подтверждается выраженным снижением численности вредителя на ранних сроках учета. В 2025 г. (гибрид МАС 28А) при экстремально высокой численности вредителя (290,0 ос/ловушку) наибольшую эффективность показал инсектицид Эфория, КС, обеспечивший снижение численности имаго вредителя на 99,8–99,9 % уже на 3–14-е сутки. Препарат Вайего, КС (тетранилипрол) также продемонстрировал высокую эффективность (95,2–98,3 %), однако уступал по скорости и степени действия препаратам на основе пиретроидов и неоникотиноидов. Инсектицид Органза, КС обеспечивал снижение численности имаго на уровне 96,2–99,0 %.

Выводы. 1. В агроценозах кукурузы Республики Беларусь в 2023–2025 гг. установлен многообразный состав видов вредителей, включающий почвообитающих фитофагов (Coleoptera: Elateridae), чешуекрылых вредителей (Lepidoptera), тлей (Aphididae) и инвазивный вид – западного кукурузного жука (*Diabrotica virgifera virgifera*). В структуре почвенного энтомокомплекса доминируют виды рода *Agriotes* (до 42,5 %), среди чешуекрылых – стеблевой кукурузный мотылек, среди тлей – сорговая и свекловичная (бобовая), что определяет высокий уровень вредоносности посевов.

2. Численность личинок щелкунов во все годы исследований превышала экономический порог вредоносности (12,0 ос/м²), достигая 16,0–24,3 ос/м², что обосновывает необходимость обязательного применения инсектицидных протравителей семян. Установлено, что наибольшей био-

логической эффективностью от проволочников обладают двухкомпонентные инсектицидные протравители (до 94,6 %), а также препараты на основе фипронила (до 96,3 %), обеспечивающие сохранение урожая зерна кукурузы на уровне 15,3–21,5 %. Выявлена прямая зависимость между биологической эффективностью инсектицидов и сохраненным урожаем: при эффективности выше 85,0 % сохранение урожая зерна достигает 20,4–23,7 %, тогда как при нормативной эффективности данный показатель снижается до 12,8–16,9 %.

3. Фенология и вредоносность стеблевого кукурузного мотылька (*Ostrinia nubilalis*) в значительной степени определяются погодными условиями вегетационного периода. При благоприятном гидротермическом режиме поврежденность растений достигает 76,0 %, что приводит к существенным потерям урожая. Установлено, что применение комбинированных инсектицидов (лямбда-цигалотрин + хлорантранилипрол, а также спинеторам) обеспечивает максимальную биологическую эффективность от стеблевого кукурузного мотылька – 95,5–100 % – и способствует увеличению урожайности на 12,3–14,9 %.

4. При защите кукурузы от хлопковой совки (*Helicoverpa armigera*) инсектицид Гоплит, КС показал высокую эффективность (до 87,0 %) при норме расхода 0,2 л/га, обеспечивая достоверное увеличение урожайности до 7,0 %.

5. Для защиты растений от тлей все изученные инсектициды обеспечивали снижение заселенности растений ниже экономического порога вредоносности с эффективностью 83,2–96,0 %, при этом существенную роль в регуляции численности фитофагов играют энтомофаги.

6. Западный кукурузный жук (*Diabrotica virgifera virgifera*) характеризуется высокой вредоносностью и тенденцией к расширению ареала. Биологическая эффективность инсектицидов против имаго составляла 80,0–99,9 % и зависела от состава действующих веществ и нормы расхода препарата.

7. Установлена высокая корреляция между биологической и хозяйственной эффективностью инсектицидов: снижение поврежденности растений сопровождается достоверным увеличением урожайности ($p < 0,05$).

Благодарности. Авторы выражают благодарность за поддержку и возможность выполнения исследований в рамках Государственной программы научных исследований (ГПНИ) «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 гг., подпрограмма «Плодородие почв и защита растений», задание 1.24.1 «Совершенствование мониторинга вредителей кукурузы в период вегетации и при хранении зерна».

Acknowledgements. The authors express their gratitude for the support and opportunity to conduct this research within the State Research Program (SRP) “Agricultural Technologies and Food Security” for 2021–2025, subprogram “Soil Fertility and Plant Protection”, task 1.24.1 “Improving monitoring of maize pests during the growing season and during grain storage”.

Список использованных источников

1. Ahmed, S. Integrated management of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize / S. Ahmed // American Journal of Entomology. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 109–119. <https://doi.org/10.11648/j.aje.20230703.15>
2. Selective and persistent toxicity of seven insecticides to five egg parasitoids of *Spodoptera frugiperda* / H.-R. Li, C.-Y. Li, P. Dai [et al.] // CABI Agriculture and Bioscience. – 2024. – Vol. 5. – Art. 8. <https://doi.org/10.1186/s43170-023-00205-y>
3. Бойко, С. Особенности защиты яровых зерновых культур и кукурузы на ранних этапах развития от личинок шелкоунов. Часть 1 / С. Бойко, М. Немкевич, А. Чичина // Белорусское сельское хозяйство. – 2023. – № 3 (251). – С. 85–91.
4. Бойко, С. Особенности защиты яровых зерновых культур и кукурузы на ранних этапах развития от личинок шелкоунов. Часть 2 / С. Бойко, М. Немкевич, А. Чичина // Белорусское сельское хозяйство. – 2023. – № 4 (252). – С. 94–98.
5. Ильяк, О. В. Мониторинг синтетическими феромонами жуков сем. Elateridae для прогноза численности и вредоносности проволочников в посевах зерновых культур и кукурузы: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.11 / Ильяк Ольга Владиславовна; НАН Беларуси, Ин-т защиты растений. – Прилуки, Мин. р-н, 2013. – 120, [39] л.
6. Немкевич, М. Г. Обработка семян кукурузы – эффективный прием защиты от проволочников / М. Г. Немкевич, С. В. Бойко // Защита и карантин растений. – 2025. – № 1. – С. 17–22.
7. Пуренок, М. В. Биологическое обоснование контроля численности и вредоносности проволочников в агроценозах: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.11 / Пуренок Максим Витальевич; НАН Беларуси, Ин-т защиты растений. – Прилуки, Мин. р-н, 2005. – 190 л.
8. Click beetles (Coleoptera: Elateridae) and their seasonal swarming as established by pheromone traps in different plant habitats in Bulgaria: 4. Tobacco / M. Subchev, T. Toshova, E. Mladenov [et al.] // Acta Zoologica Bulgarica. – 2010. – Vol. 62, № 2. – P. 187–192.
9. Nikoukar, A. Integrated pest management of wireworms (Coleoptera: Elateridae) and the rhizosphere in agroecosystems / A. Nikoukar, A. Rashed // Insects. – 2022. – Vol. 13, № 9. – Art. 769. <https://doi.org/10.3390/insects13090769>

10. Marella, S. M. Field evaluation of insecticides against the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in maize / S. M. Marella, K. C. Sharma, R. K. M. Baskaran // International Journal of Advanced Biochemistry Research. – 2024. – Vol. 8, № 9. – P. 641–648. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i9i.2240>
11. Бойко, С. Чешуекрылые вредители в агроценозах кукурузы / С. Бойко, К. Корытцо, М. Немкевич // Белорусское сельское хозяйство. – 2025. – № 7 (279). – С. 97–105.
12. Лысенко, Н. Н. Вредные насекомые кукурузы и меры защиты от них в Орловской области / Н. Н. Лысенко // Вестник аграрной науки. – 2018. – № 3 (72). – С. 48–59. <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2018.3.48>
13. Barnes, E. A. Combining climate models and observations to predict the time remaining until regional warming thresholds are reached / E. A. Barnes, N. S. Diffenbaugh, S. Seneviratne // Environmental Research Letters. – 2024. – Vol. 20, № 1. – Art. 014008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad91ca>
14. Инсектицидная защита кукурузы от доминантных вредителей в разных агроклиматических зонах Беларуси / М. Г. Немкевич, С. В. Бойко, А. В. Бартош, А. С. Чичина // Защита растений от вредных организмов: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., 19–23 июня 2023 г. / Кубан. гос. аграр. ун-т, Федер. науч. центр защиты растений; редкол.: А. И. Трубилин (гл. ред.) [и др.]. – Краснодар, 2023. – С. 286–289.
15. Оберемок, В. В. Современные инсектициды: их преимущества, недостатки и предпосылки к созданию ДНК-инсектицидов (обзорная статья) / В. В. Оберемок, А. С. Зайцев // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: Биология, химия. – 2014. – Т. 27, № 1. – С. 112–126.
16. Camerini, G. Impact of chemical insecticide application on beneficial insects in maize / G. Camerini, S. Maini, L. Limonta // Insects. – 2024. – Vol. 15, № 4. – Art. 224. <https://doi.org/10.3390/insects15040224>
17. Camerini, G. *Ostrinia nubilalis* in northern Italy: egg parasitoids and control trials on three sweet pepper landraces in open field cultivations / G. Camerini, M. Masanta, S. Maini // Bulletin of Insectology. – 2023. – Vol. 76, № 2. – P. 305–313.
18. Trichogramma ostrinae as a sustainable biological control agent against *Ostrinia furnacalis*: an eight-year field and laboratory study in China / X. Dai, H. Chen, Y. Liu [et al.] // Journal of Pest Science. – 2026. – Vol. 99, № 2. – Art. 40. <https://doi.org/10.1007/s10340-025-02008-8>
19. On farm evaluation of inundative biological control of *Ostrinia nubilalis* by Trichogramma brassicae in three European maize producing regions / J. Razinger, V. P. Vasileiadis, M. Giraud [et al.] // Pest Management Science. – 2016. – Vol. 72, № 2. – P. 246–254. <https://doi.org/10.1002/ps.4054>
20. Smith, J. L. Practical resistance of *Ostrinia nubilalis* to Cry1F *Bacillus thuringiensis* maize discovered in Nova Scotia, Canada / J. L. Smith, Y. Farhan, A. W. Schaafsma // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. – Art. 18247. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54263-2>
21. Careful choice of insecticides in integrated pest management strategies against *Ostrinia nubilalis* in maize conserves *Orius* spp. in the field / V. P. Vasileiadis, A. Veres, L. Furlan, M. Sattin // Crop Protection. – 2017. – Vol. 97. – P. 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.003>
22. Zhang, X. Role of biopesticides in integrated pest management for maize / X. Zhang, G. Wang // Molecular Entomology. – 2024. – Vol. 15, № 5. – P. 179–190. <https://doi.org/10.5376/me.2024.15.0022>
23. Advances in control strategies against *Spodoptera frugiperda*. A review / F. A. Paredes-Sánchez, G. Rivera, V. Bocanegra-García [et al.] // Molecules. – 2021. – Vol. 26, № 18. – Art. 5587. <https://doi.org/10.3390/molecules26185587>
24. Susceptibility to eight common chemical insecticides in *Helicoverpa zea* populations from the southern United States / B. Patla, T. Silva, S. Lin [et al.] // Crop Protection. – 2026. – Vol. 202. – Art. 107517. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107517>
25. Kropf, A. L. Development of a bioassay method for larval western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae) / A. L. Kropf, E. Goes, A. J. Gassmann // Journal of Economic Entomology. – 2025. – Vol. 118, № 6. – P. 2959–2970. <https://doi.org/10.1093/jee/toaf202>
26. Fall armyworm management in a changing climate: an overview of climate-responsive integrated pest management (IPM) strategies for long-term control / K. Zanzana, E. A. Dannon, A. A. Sinzogan, J. M. Toffa // Egyptian Journal of Biological Pest Control. – 2024. – Vol. 34, № 1. – Art. 54. <https://doi.org/10.1186/s41938-024-00814-3>
27. Бойко, С. В. Регулирование наиболее опасных вредителей кукурузы при помощи эффективных инсектицидов / С. В. Бойко, М. Г. Немкевич // Защита растений: сб. науч. ст. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию, Ин-т защиты растений. – Мн., 2025. – Вып. 49. – С. 118–129.
28. Колесников, В. Б. Динамика численности гусениц *Ostrinia nubilalis* в Центральном Черноземье / В. Б. Колесников, С. С. Евстратов // Защита и карантин растений. – 2023. – № 2. – С. 17–19. https://doi.org/10.47528/1026-8634_2023_2_17
29. Шабатуков, А. Х. Экономическая эффективность применения инсектицидов нового поколения на посевах кукурузы в степной зоне Кабардино-Балкарии / А. Х. Шабатуков, З. Л. Шипшева // Экономика сельского хозяйства России. – 2024. – № 10. – С. 27–32. <https://doi.org/10.32651/2410-27>
30. Maize defence mechanisms against the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* Hübner / F. Franeta, S. Mikić, Ž. Milovac [et al.] // International Journal of Pest Management. – 2018. – Vol. 65, № 1. – P. 23–32. <https://doi.org/10.1080/09670874.2018.1454629>
31. Запрудский, А. Западный кукурузный жук. Внимание: карантинный объект! / А. Запрудский, М. Немкевич, С. Бойко // Белорусское сельское хозяйство. – 2025. – № 8 (280). – С. 120–130.
32. Немкевич, М. Г. Контроль популяции западного кукурузного жука в Республике Беларусь / М. Г. Немкевич, С. В. Бойко // Связь науки и производства – главное направление деятельности молодых ученых: междунар. науч.-практ. онлайн-конф. молодых ученых и специалистов, посвящ. 300-летию РАН (Орел, 15 апр. 2024 г.) / Федер. науч. центр зернобобовых и крупяных культур, Курс. федер. аграр. науч. центр, Всерос. науч.-исслед. ин-т селекции плодовых культур; редкол.: С. В. Кирюхин [и др.]. – Орел, 2024. – С. 25–28.

References

1. Ahmed S. Integrated management of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize. *American Journal of Entomology*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 109–119. <https://doi.org/10.11648/j.aje.20230703.15>
2. Li H.-R., Li C.-Y., Dai P., Zang L.-S., Desneux N., Xu W. Selective and persistent toxicity of seven insecticides to five egg parasitoids of *Spodoptera frugiperda*. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2024, vol. 5, art. 8. <https://doi.org/10.1186/s43170-023-00205-y>
3. Boiko S., Nemkevich M., Chichina A. Features of protection of spring grain crops and corn at early stages of development from click beetle larvae. Part 1. *Belorusskoe sel'skoe khozyaistvo* [Belarusian Agriculture], 2023, no. 3 (251), pp. 85–91 (in Russian).
4. Boiko S., Nemkevich M., Chichina A. Features of protection of spring grain crops and corn at early stages of development from click beetle larvae. Part 1. *Belorusskoe sel'skoe khozyaistvo* [Belarusian Agriculture], 2023, no. 4 (252), pp. 94–98 (in Russian).
5. Il'yuk O. V. *Monitoring of beetles of the family Elateridae with synthetic pheromones for forecasting the abundance and harmfulness of wireworms in grain crops and corn*. Priluki, Minsk region, 2013. 120. [39] p. (in Russian).
6. Nemkevich M. G., Boiko S. V. Seed treatment of corn – an effective method of protection against wireworms. *Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine*, 2025, no. 1, pp. 17–22 (in Russian).
7. Purenok M. V. *Bioecological substantiation of control over the number and harmfulness of wireworms in agroecosystems*. Priluki, Minsk region, 2005. 190 p. (in Russian).
8. Subchev M., Toshova T., Mladenov E., Furlan L., Tóth M. Click beetles (Coleoptera: Elateridae) and their seasonal swarming as established by pheromone traps in different plant habitats in Bulgaria: 4. Tobacco. *Acta Zoologica Bulgarica*, 2010, vol. 62, no. 2, pp. 187–192.
9. Nikoukar A., Rashed A. Integrated pest management of wireworms (Coleoptera: Elateridae) and the rhizosphere in agroecosystems. *Insects*, 2022, vol. 13, no. 9, art. 769. <https://doi.org/10.3390/insects13090769>
10. Marella S. M., Sharma K. C., Baskaran R. K. M. Field evaluation of insecticides against the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in maize. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 2024, vol. 8, no. 9, pp. 641–648. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i9i.2240>
11. Boiko S., Koryttso K., Nemkevich M. Lepidoptera pests in corn agroecosystems. *Belorusskoe sel'skoe khozyaistvo* [Belarusian Agriculture], 2025, no. 7 (279), pp. 97–105 (in Russian).
12. Lysenko N. N. Insect pests of corn and protection measures against them in the Orel region. *Vestnik agrarnoi nauki = Bulletin of Agrarian Science*, 2018, no. 3 (72), pp. 48–59 (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2018.3.48>
13. Barnes E. A., Diffenbaugh N. S., Seneviratne S. Combining climate models and observations to predict the time remaining until regional warming thresholds are reached. *Environmental Research Letters*, 2024, vol. 20, no. 1, art. 014008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad91ca>
14. Nemkevich M. G., Boyko S. V., Bartosh A. V., Chichina A. S. Insecticidal protection of corn from dominant pests in different agro-climatic zones of Belarus. *Zashchita rastenii ot vrednykh organizmov: materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 19–23 iyunya 2023 g.* [Crop protection against hazardous organisms: proceedings XI International research-and-production conference, June 19–23, 2023]. Krasnodar, 2023, pp. 286–289 (in Russian).
15. Oberemok V. V., Zaitsev A. S. The modern insecticides: their advantages, disadvantages and preconditions for the creation of DNA insecticides (review). *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Seriya: Biologiya, khimiya* [Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Biology, Chemistry], 2014, vol. 27 (66), no. 1, pp. 112–126 (in Russian).
16. Camerini G., Maini S., Limonta L. Impact of chemical insecticide application on beneficial insects in maize. *Insects*, 2024, vol. 15, no. 4, art. 224. <https://doi.org/10.3390/insects15040224>
17. Camerini G., Masanta M., Maini S. *Ostrinia nubilalis* in northern Italy: egg parasitoids and control trials on three sweet pepper landraces in open field cultivations. *Bulletin of Insectology*, 2023, vol. 76, no. 2, pp. 305–313.
18. Dai X., Chen H., Liu Y., Wang R., Su L., Wang Y., Zhao S., Wang C., Zheng L., Zhai Y. Trichogramma ostriniae as a sustainable biological control agent against *Ostrinia furnacalis*: an eight-year field and laboratory study in China. *Journal of Pest Science*, 2026, vol. 99, no. 2, art. 40. <https://doi.org/10.1007/s10340-025-02008-8>
19. Razinger J., Vasileiadis V. P., Giraud M., Van Dijk W., Modic Š., Sattin M., Urek G. On farm evaluation of inundative biological control of *Ostrinia nubilalis* by Trichogramma brassicae in three European maize producing regions. *Pest Management Science*, 2016, vol. 72, no. 2, pp. 246–254. <https://doi.org/10.1002/ps.4054>
20. Smith J. L., Farhan Y., Schaafsma A. W. Practical resistance of *Ostrinia nubilalis* to Cry1F *Bacillus thuringiensis* maize discovered in Nova Scotia, Canada. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, art. 18247. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54263-2>
21. Vasileiadis V. P., Veres A., Furlan L., Sattin M. Careful choice of insecticides in integrated pest management strategies against *Ostrinia nubilalis* in maize conserves *Orius* spp. in the field. *Crop Protection*, 2017, vol. 97, pp. 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.003>
22. Zhang X., Wang G. Role of biopesticides in integrated pest management for maize. *Molecular Entomology*, 2024, vol. 15, no. 5, pp. 179–190. <https://doi.org/10.5376/me.2024.15.0022>
23. Paredes-Sánchez F. A., Rivera G., Bocanegra-García V., Martínez-Padrón H. Y., Berrones-Morales M., Niño-García N., Herrera-Mayorga V. Advances in control strategies against *Spodoptera frugiperda*. A review. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 18, art. 5587. <https://doi.org/10.3390/molecules26185587>

24. Patla B., Silva T., Lin S., Head G. P., Reay-Jones F. P. F., Ni X., Bernaola L., Brown S., Cook D., Villegas J., Davis J. A., Huang F. Susceptibility to eight common chemical insecticides in *Helicoverpa zea* populations from the southern United States. *Crop Protection*, 2026, vol. 202, art.107517. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107517>
25. Kropf A. L., Goes E., Gassmann A. J. Development of a bioassay method for larval western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Economic Entomology*, 2025, vol. 118, no. 6, pp. 2959–2970. <https://doi.org/10.1093/jee/toaf202>
26. Zanzana K., Dannon E. A., Sinzogan A. A., Toffa J. M. Fall armyworm management in a changing climate: an overview of climate-responsive integrated pest management (IPM) strategies for long-term control. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2024, vol. 34, no. 1, art. 54. <https://doi.org/10.1186/s41938-024-00814-3>
27. Boyko S. V., Nemkevich M. G. Regulation of the most dangerous corn pests with effective insecticides. *Zashchita rastenii: sbornik nauchnykh statei* [Plant protection: collection of scientific articles]. Minsk, 2025, iss. 49, pp. 118–129 (in Russian).
28. Kolesnikov V. B., Evstratov S. S. Dynamics of population of *Ostrinia nubilalis* caterpillars in the Central Chernozem region. *Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine*, 2023, no. 2, pp. 17–19 (in Russian). https://doi.org/10.47528/1026-8634_2023_2_17
29. Shabatukov A. Kh., Shipsheva Z. L. Economic efficiency of the use of new generation insecticides on corn crops in the steppe zone of Kabardino-Balkaria. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii = Economics of Agriculture of Russia*, 2024, no. 10, pp. 27–32 (in Russian). <https://doi.org/10.32651/2410-27>
30. Franeta F., Mikić S., Milovac Ž., Mitrović B., Indić D., Vuković S. Maize defence mechanisms against the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* Hübner. *International Journal of Pest Management*, 2018, vol. 65, no. 1, pp. 23–32. <https://doi.org/10.1080/09670874.2018.1454629>
31. Zaprudskii A., Nemkevich M., Boiko S. Western corn rootworm. Attention: quarantine object! *Belorusskoe sel'skoe khozyaystvo* [Belarusian Agriculture], 2025, no. 8 (280), pp. 120–130 (in Russian).
32. Nemkevich M. G., Boiko S. V. Population control of the western corn rootworm in the Republic of Belarus. *Svyaz' nauki i proizvodstva – glavnoe napravlenie deyatelnosti molodykh uchenykh: mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya onlain-konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashchennaya 300-letiyu RAN (Orel, 15 aprelya 2024 g.)* [The connection between science and production is the main area of activity of young scientists: international scientific and practical online conference of young scientists and specialists, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences (Oryol, April 15, 2024)]. Orel, 2024, pp. 25–28 (in Russian).

Информация об авторах

Бойко Светлана Викторовна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий лабораторией энтомологии, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси (ул. Мира, 2, 223011, Прилуки, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-8152-4540>. E-mail: boikoizr@mail.ru

Немкевич Марина Генриховна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории энтомологии, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси (ул. Мира, 2, 223011, Прилуки, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: nemkevichizr2023@gmail.ru

Information about the authors

Svetlana V. Boiko – Ph. D. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Laboratory of Entomology, Institute of Plant Protection, National Academy of Sciences of Belarus (2, Mira Str., 223011, Priluki, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-8152-4540>. E-mail: boikoizr@mail.ru

Marina G. Nemkevich – Ph. D. (Agriculture), Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Entomology, Institute of Plant Protection, National Academy of Sciences of Belarus (2, Mira Str., 223011, Priluki, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: nemkevichizr2023@gmail.ru

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

УДК 635.25:631.526.32-048.24(476)

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-213-220>

Поступила в редакцию 03.04.2024

Received 03.04.2024

Т. В. Сачивко¹, В. Н. Босак², Т. В. Семашко¹¹Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений, Минск, Республика Беларусь²Институт льна, Национальная академия наук Беларуси, Устье, Республика Беларусь

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СЕЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ЛУКА МНОГОЯРУСНОГО

Аннотация. Лук многоярусный (*Allium proliferum* Schrad.) относится к перспективным многолетним пряно-ароматическим, овощным и лекарственным культурам и может с успехом возделываться в почвенно-климатических условиях Республики Беларусь. Цель исследования заключалась в усовершенствовании методики оценки селекционного материала лука многоярусного по комплексу основных хозяйственно полезных, морфологических, морфометрических и фенологических признаков. Объектами исследования являлись зарубежные и новые районированные сорта лука многоярусного селекции Белорусской государственной сельскохозяйственной академии (Узгорак и Пачастунак), включенные в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений Республики Беларусь. Основные направления в селекции лука многоярусного: повышение продуктивности, получение форм, приспособленных к промышленной технологии возделывания, интенсивно отрастающих после срезки, зимостойких, устойчивых к вредителям и болезням, с высоким содержанием биологически активных веществ, выведение сортов с различными сроками наступления хозяйственной годности, адаптивных к выращиванию в различных почвенно-климатических условиях. В результате совместных исследований Белорусской государственной сельскохозяйственной академии и Государственной инспекции по испытанию и охране сортов растений была усовершенствована методика проведения испытаний сортов лука многоярусного на отличимость, однородность и стабильность (ООС). Это позволяет оптимизировать селекционный процесс данной культуры и проводить более доскональную оценку по идентификации сортов при проведении государственного сортоиспытания и при определении сортовой чистоты в промышленных посадках. Национальная методика проведения испытаний сортов лука многоярусного на ООС предоставляет возможность селекционерам обратить внимание на соответствующие характерные и отличительные признаки лука многоярусного, что будет способствовать эффективному ведению дальнейшей селекционной работы по созданию форм и сортов с различными хозяйственно полезными свойствами, а также для идентификации различных сортов.

Ключевые слова: лук многоярусный, хозяйственно полезные признаки, морфологические, морфометрические и фенологические признаки, селекционный процесс, методика испытания сортов на отличимость, однородность и стабильность

Для цитирования: Сачивко, Т. В. Усовершенствование методики оценки селекционного материала лука многоярусного / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак, Т. В. Семашко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 3. – С. 213–220. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-213-220>

Tatsiana U. Sachyuka¹, Viktor M. Bosak², Tatsiana V. Semashko¹¹State Inspection for Testing and Protection of Plant Varieties, Minsk, Republic of Belarus²Institute of Flax, National Academy of Sciences of Belarus, Ustye, Republic of Belarus

IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSING BREEDING MATERIAL OF MULTI-TIERED ONIONS

Abstract. Multi-tiered onion (*Allium proliferum* Schrad.) belongs to promising perennial spice-aromatic, vegetable and medicinal crops and can be successfully cultivated in the soil and climatic conditions of the Republic of Belarus. The purpose of the study was to improve the methodology for assessing the breeding material of multi-tiered onions according to a set of basic economically useful, morphological, morphometric and phenological traits. The objects of the study were foreign varieties and newly registered varieties of the Belarusian State Agricultural Academy (multi-tiered onion varieties Uzgorak and Pachastunak) included in the State Register of Varieties of Agricultural Plants of the Republic of Belarus. The main directions in the breeding of multi-tiered onions are: increasing productivity; developing forms adapted to industrial cultivation technology, with vigorous regrowth after cutting, winter-hardy, resistant to pests and diseases, with a high content of useful substances valuable for the general chemical and biochemical composition; and breeding varieties with different periods of reaching commercial maturity, adapted to cultivation in different soil and climatic conditions. As a result of joint research by the Belarusian State Agricultural Academy and the State Inspection for Testing and Protection of Plant Varieties, the methodology for conducting DUS tests (distinctness, uniformity and stability) of multi-tiered onion varieties has been improved, which makes it possible to optimize the selection process of this crop and to carry out a more thorough assessment of variety identification during

state variety testing and when determining varietal purity in industrial plantings. The national methodology for conducting DUS tests of multi-tiered onion varieties provides breeders with an opportunity to pay attention to the relevant characteristics and distinctive features of multi-tiered onions, which will contribute to the effective conduct of further breeding work to create forms and varieties with various economically valuable properties, and to identify various varieties.

Keywords: multi-tiered onions, economically valuable traits, morphological, morphometric and phenological features, breeding process, DUS testing methodology (distinctness, uniformity and stability)

For citation: Sachyuka T. U., Bosak V. M., Semashko T. V. Improvement of the methodology for assessing breeding material of multi-tiered onion. *Vestsi Natsyonal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 213–220 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-213-220>

Введение. Лук многоярусный (*Allium proliferum* Schrad.), который относится к семейству Луковые (*Allioideae* Herb.), является ценной многолетней пряно-ароматической, овощной и лекарственной культурой, широко используемой в кулинарии и пищевой промышленности, а также в медицине [1–8]. Это перспективная зимостойкая культура, отрастающая рано весной. В пищу употребляют листья, луковички и воздушные луковички – бульбочки [2, 5, 9–11].

Родина лука многоярусного – Китай и Средняя Азия. В Европу он был завезен путешественниками в Средние века. В настоящее время лук многоярусный широко распространен в Северной Америке, странах Западной Европы, Китае, Японии и Корее, а также в России.

Молодые зеленые листья лука многоярусного используются в свежем виде весной и в начале лета, а также для салатов и в качестве приправы к супам и гарнирам; луковички и воздушные луковички – для маринования. Лук многоярусный применяется также в народной медицине и фитотерапии для лечения насморка, при авитаминозе, респираторных, сердечно-сосудистых и желудочно-кишечных заболеваниях. В товарной продукции лука многоярусного содержится высокая концентрация биологически активных веществ, аминокислот, витаминов, макро- и микроэлементов [12–19].

Размножается лук многоярусный вегетативно – воздушными луковичками-бульбочками и прикорневыми луковичками. В качестве материала для размножения используют надземные луковички первого, второго и третьего ярусов, полученные с 3–4-летних плантаций. Оптимальный срок высадки – последняя декада августа или первая половина сентября, что обеспечивает успешную зимовку. При таком подходе ранней весной перья начинают быстро отрастать. Для весенней посадки воздушные и прикорневые луковички сохраняют при температуре 0...–1 °С. Перед началом посадки луковички сортируют по размеру. Лук на зеленое перо высаживают рядовым способом. Рекомендуемая схема размещения: междурядья – 30–50 см, расстояние в ряду – 30 см [5, 9, 11, 20].

Убирают лук многоярусный весной, когда листья достигают высоты 30–40 см (в месячном возрасте). В первый год перо срезают один раз; более частая срезка не рекомендуется, так как это ведет к снижению урожая лукович. В последующие годы уборку проводят несколько раз за вегетационный период. Культура представляет большую ценность как материал для осенне-зимней выгонки зелени в защищенном грунте. В отличие от репчатого лука, лук многоярусный не имеет периода покоя, поэтому он постоянно и активно выгоняет зеленое перо, хорошо чувствует себя в теплице при температуре от 10 до 15 °С (для сравнения: репчатому луку требуется около 25 °С).

Оценка морфологических, морфометрических и фенологических признаков – важнейший этап селекции пряно-ароматических и эфирно-масличных культур, в том числе и лука многоярусного. Эти данные служат важным критерием идентификации сортов в ходе государственного сортоиспытания и при определении сортовой чистоты в промышленных посадках [10, 21–27].

Цель исследования – усовершенствовать методику оценки селекционного материала лука многоярусного по комплексу хозяйственно полезных, морфологических, морфометрических и фенологических признаков.

Методы исследования. Исследования по усовершенствованию оценки селекционного материала лука многоярусного проводили в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии (БГСХА) в 2016–2023 гг. При учете основных хозяйственно полезных, морфологических, морфометрических и фенологических признаков использовали различные сорта лука многоярусного, в том числе новые авторские сорта селекции БГСХА (Узгорак, Пачастунак) [2, 5, 9, 11, 25, 26].

Результаты и их обсуждение. Направления селекции у многолетних луков, в том числе лука многоярусного, определяются их биологическими особенностями. Для северных регионов актуально

выведение скороспелых, зимостойких сортов. Для всех зон большое значение имеет выведение хорошо облиственных и поздно стрелкующихся сортов. При селекции следует привлекать также образцы с более крупными листьями и с менее острым вкусом¹ [27].

Из коллекции образцов, привлеченных из различных эколого-географических зон, следует выделять формы, наиболее перспективные для внедрения в сельскохозяйственное производство и использования в приусадебных хозяйствах.

Основным методом селекционной работы с луком многоярусным, с учетом его преимущественно вегетативного способа размножения, является клоновый отбор. Наряду с показателями урожайности, скороспелости и зимостойкости, при оценке анализируются также качественные признаки: содержание макро- и микроэлементов, витамина С, полифенольных соединений, каротина и других биологически активных веществ. В селекции лука многоярусного могут быть задействованы как местные популяции, так и сорта различного географического происхождения. Все наблюдения листового аппарата проводят в фазу уборочной спелости.

В результате комплексной оценки селекционного материала описаны идентификационные признаки и усовершенствована методика по испытанию сортов лука многоярусного на ООС².

С учетом биологических особенностей выделены основные фазы развития лука многоярусного:

- отрастание листьев (начало – у 10 % растений);
- уборочная спелость листьев;
- появление стрелки (единичное и массовое);
- формирование первого яруса воздушных луковок (у 10 % растений);
- формирование второго яруса воздушных луковок (у 10 % растений);
- созревание воздушных луковок (приобретение характерного для сорта оттенка; возможно прорастание на кусте из-за отсутствия периода покоя);
- усыхания листьев первой генерации (у 10 % растений);
- отрастание молодых листьев второй генерации (начало – у 10 % растений) (рис. 1).

Испытываемые и похожие сорта разбиваются на группы для облегчения оценки. Для группировки используют такие признаки, которые не варьируют или варьируют незначительно в пределах сорта:

- 1) лист: положение (прямостоячий, полупрямостоячий, горизонтальный);
- 2) лист: длина (короткий, средней длины, длинный);
- 3) стрелка: количество ярусов воздушных луковок (один, два, три) (рис. 2).

Для оценки изучаемых образцов лука многоярусного, создания новых сортов, а также подтверждения их однородности в качестве морфологических признаков должны учитываться следующие:

- 1) лист: диаметр (малый, среднего диаметра, большой);
- 2) лист: восковой налет (слабый, средний, сильный);
- 3) лист: интенсивность зеленой окраски листовой пластинки (светлая, темная) (рис. 3);
- 4) ложный стебель: антоциановая окраска (отсутствует, имеется) (рис. 4);
- 5) стрелка: длина (короткая, средней длины, длинная);
- 6) стрелка: восковой налет (средний, сильный) (рис. 5);
- 7) стрелка: размер воздушных луковок (очень мелкие – менее 1,0 см, мелкие – 1,0–1,5 см, среднего размера – 1,6–2,0 см, крупные – более 2,0 см) (рис. 6);
- 8) воздушные луковички: время созревания (раннее, среднее, позднее) (рис. 7);
- 9) воздушные луковички: окраска (светло-зеленая, фиолетовая, коричневая) (рис. 8);
- 10) воздушные луковички: форма (округлая, овальная) (рис. 9).

Заключение. Оценка хозяйственно полезных, морфологических, морфометрических и фенологических признаков – ключевой этап селекции лука многоярусного (*Allium proliferum* Schrad.).

¹ Методические указания по селекции луковых культур / Всерос. НИИ селекции и семеноводства овощ. культур. М., 1997. 125 с.

² Методика проведения испытаний на отличимость, однородность и стабильность: лук многоярусный (*Allium proliferum* Schrad.): BY TG/1053/1/2. Мн., 2023. 9 с. ; Методика проведения испытаний на отличимость, однородность и стабильность: лук многоярусный (*Allium proliferum* Schrad.): BY TG/1053/1/1. Мн., 2013. 6 с.

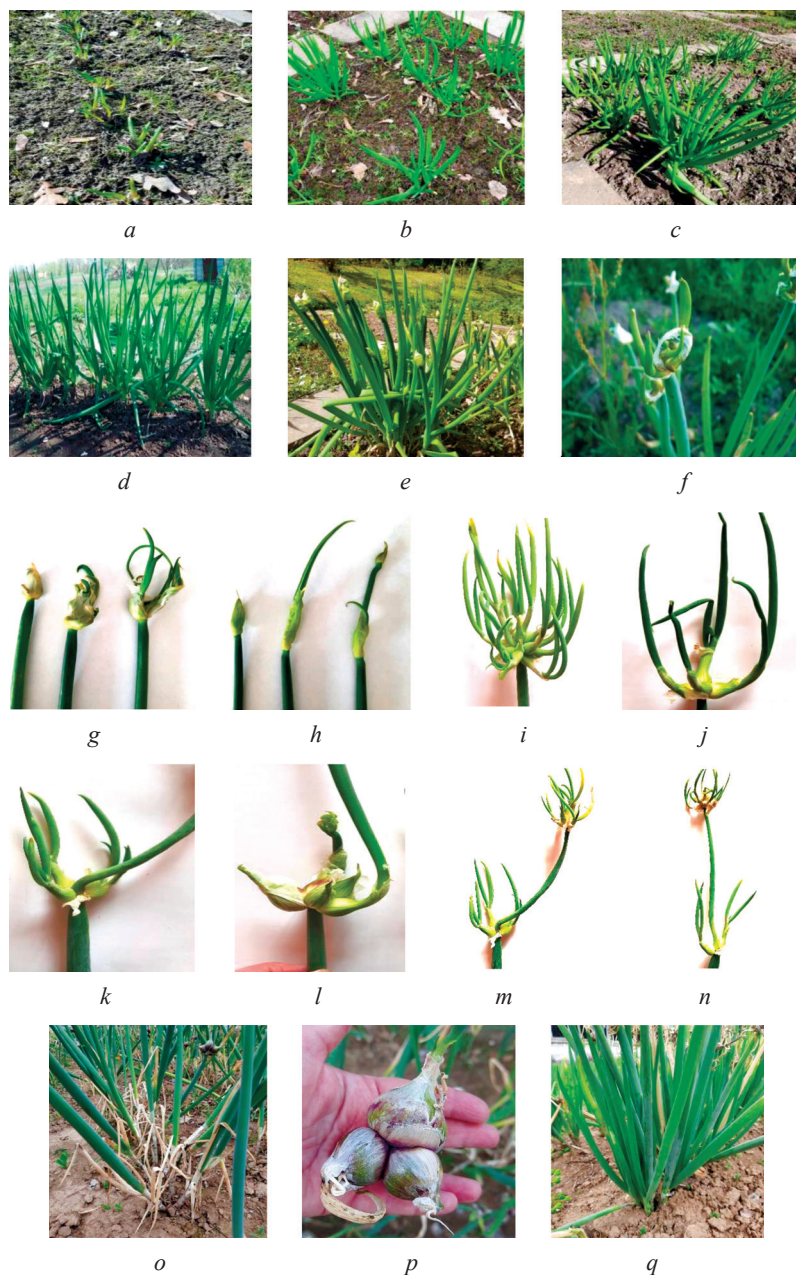


Рис. 1. Фазы развития лука многоярусного: *a* – отрастание растений (конец марта – начало апреля); *b*, *c* – активный рост листьев (середина апреля, конец апреля); *d* – уборочная спелость листьев (начало мая); *e*, *f* – формирование первого яруса (середина мая); *g* – начало формирования первого яруса у низкорослой формы (середина мая); *h* – начало формирования первого яруса у высокорослой формы (начало июня); *i* – развитие воздушных луковиц первого яруса низкорослой формы (конец мая); *j* – развитие воздушных луковиц первого яруса высокорослой формы (середина июня); *k* – развитие стрелки второго яруса у низкорослой формы из соцветия (конец мая); *l* – развитие стрелки второго яруса у высокорослой формы из луковицы первого яруса (середина июня); *m* – формирование второго яруса у низкорослой формы (конец мая); *n* – формирование второго яруса у высокорослой формы (середина июня); *o* – усыхание листьев первой генерации (первая декада июня); *p* – созревание воздушных луковиц (июль); *q* – отрастание молодых листьев второй генерации (июль)

Fig. 1. Phases of development of the multi-tiered onions: *a* – plant regrowth (late March – early April); *b*, *c* – active leaf growth (mid-April, late April); *d* – harvest maturity of leaves (early May); *e*, *f* – formation of the first tier (mid-May); *g* – beginning of the formation of the first tier in the short form (mid-May); *h* – beginning of the formation of the first tier in the tall form (early June); *i* – development of the air bulbs of the first tier of the short form (end of May); *j* – development of the air bulbs of the first tier of the tall form (mid-June); *k* – development of the second-tier shoots in the short form from the inflorescence (end of May); *l* – development of the second-tier shoots in the tall form from the bulbs of the first tier (mid-June); *m* – formation of the second tier in the short form (end of May); *n* – formation of the second tier in the tall form (mid-June); *o* – withering of first generation leaves (first decade of June); *p* – ripening of air bulbs (July); *q* – growth of young leaves of the second generation (July)

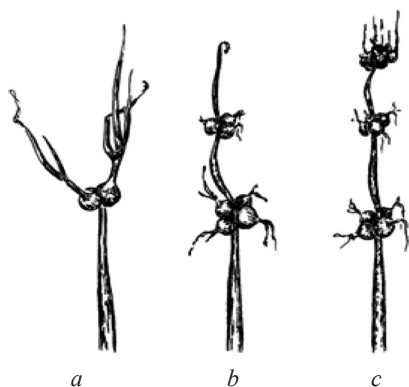


Рис. 2. Количество ярусов воздушных луковиц: *a* – один; *b* – два; *c* – три

Fig. 2. Number of tiers of air bulbs:
a – one; *b* – two; *c* – three

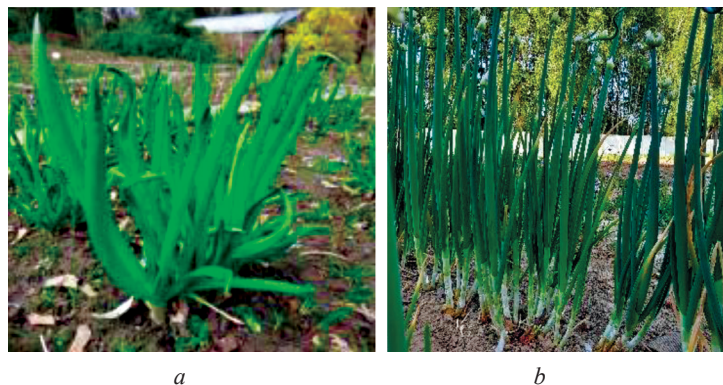


Рис. 3. Интенсивность зеленой окраски листовой пластинки:
a – светлая; *b* – темная

Fig. 3. The intensity of the green color of the leaf blade:
a – light; *b* – dark



Рис. 4. Наличие антоциана на ложном стебле:
a – отсутствует; *b* – имеется

Fig. 4. Presence of anthocyanin on the false stem:
a – absent; *b* – present



Рис. 5. Наличие воскового налета на стрелке:
a – средний; *b* – сильный

Fig. 5. Presence of a waxy coating on the shoots:
a – medium; *b* – strong

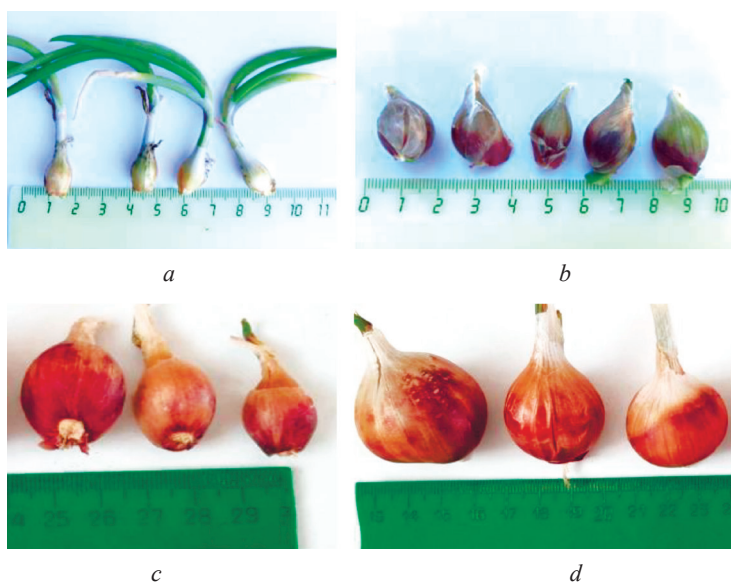


Рис. 6. Размер воздушных луковиц: *a* – очень мелкие; *b* – мелкие; *c* – среднего размера; *d* – крупные

Fig. 6. Size of air bulbs: *a* – very small; *b* – small; *c* – medium-sized; *d* – large



Рис. 7. Созревание воздушных луковиц: *a* – позднее (начало прорастания); *b* – раннее (полное прорастание)

Fig. 7. Ripening of air bulbs: *a* – late (germination starts); *b* – early (full germination)

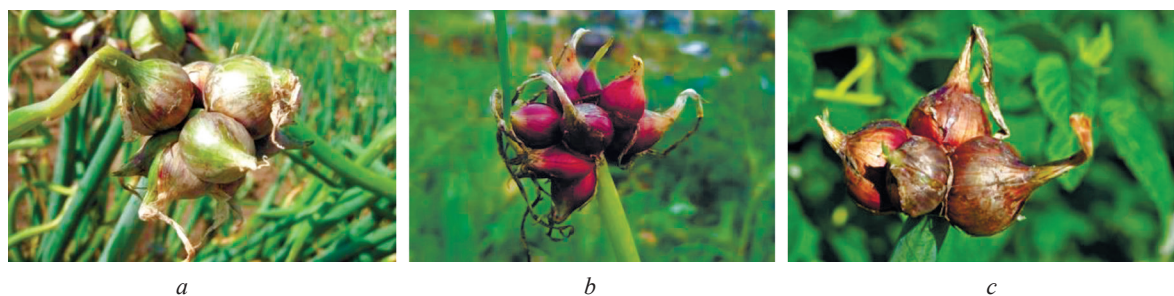


Рис. 8. Окраска воздушных луковиц: *a* – светло-зеленая; *b* – фиолетовая; *c* – коричневая

Fig. 8. Colouring of air bulbs: *a* – light green; *b* – purple; *c* – brown



Рис. 9. Форма воздушных луковиц: *a* – округлая; *b* – овальная

Fig. 9. Shape of air bulbs: *a* – round; *b* – oval

На основе этого комплекса показателей усовершенствована методика испытаний на отличимость, однородность и стабильность. Это позволяет оптимизировать селекционный процесс данной культуры, повысить точность идентификации сортов в ходе государственного испытания и контроля чистоты промышленных посадок.

Список использованных источников

1. Водянова, О. С. Луки: репчатый, шалот, порей, многолетние, дикорастущие съедобные и декоративные, чеснок: морфо-биологические характеристики, селекция, семеноводство, технологии возделывания, защита от вредителей и болезней / О. С. Водянова. – Алматы: [Баспалар Үйі], 2007. – 367 с.
2. Генетические ресурсы растений. Пряно-ароматические и эфирно-масличные культуры: рекомендации / Т. В. Сачивко, Н. А. Дуктова, О. В. Порхунцова [и др.]. – Горки: БГСХА, 2021. – 22 с.
3. Кокорева, В. А. Лук многоярусный – частичка в глобальном биоразнообразии / В. А. Кокорева // Овощи России. – 2017. – № 1. – С. 34–38. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-1-34-38>
4. Пивоваров, В. Ф. Луковые культуры / В. Ф. Пивоваров, И. И. Ершов, А. Ф. Агафонов. – М.: [б. и.], 2001. – 500 с.
5. Сачивко, Т. В. Оценка новых сортов лука многоярусного по хозяйственно полезным признакам / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак // Овощи России. – 2024. – № 1. – С. 36–40. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-1-36-40>
6. Середин, Т. М. Лук многоярусный / Т. М. Середин, Л. И. Герасимова // Приусадебное хозяйство. – 2017. – № 10. – С. 62–64.

7. Шишкина, Е. В. Расширение сортимента лука многоярусного в условиях Сибирского региона / Е. В. Шишкина, С. В. Жаркова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 8-2 (71). – С. 21–24. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-8-2-21-24>
8. Юрьева, Н. А. Многообразие луков и их использование / Н. А. Юрьева, В. А. Кокорева. – М.: Изд-во МСХА, 1992. – 159 с.
9. Сачивко, Т. В. Новые сорта малораспространенных видов лука: характеристика и особенности возделывания / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак // Земледелие и защита растений. – 2015. – № 4 (101). – С. 20–21.
10. Сачивко, Т. В. Оценка хозяйственно полезных признаков многолетних луков / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / Гродн. гос. аграр. ун-т. – Гродно, 2016. – Т. 32: Агрономия. – С. 152–158.
11. Характеристика и особенности агротехники новых сортов пряно-ароматических культур: рекомендации / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак, А. П. Гордеева, М. В. Наумов. – Горки: БГСХА, 2019. – 19 с.
12. Антиоксидантная активность новых сортов пряно-ароматических и эфирно-масличных культур / Т. В. Сачивко, Н. А. Коваленко, Г. Н. Супиченко, В. Н. Босак // Вестці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2023. – Т. 61, № 4. – С. 282–290. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-4-282-290>
13. Биохимический состав новых сортов пряно-ароматических и эфирно-масличных культур / В. Н. Босак, Т. В. Сачивко, Н. В. Барбасов [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 1. – С. 64–68.
14. Кукушкина, Т. А. Содержание биологически активных веществ в зеленой массе многолетних луков (*Allium* L.) / Т. А. Кукушкина, Т. И. Фомина // Аграрный вестник Урала. – 2021. – № 4 (207). – С. 85–92. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-207-04-85-92>
15. Пендинен, Г. И. Разнообразие хромосомного состава образцов лука многоярусного *Allium × proliferum* (Moench) Schrad. ex Willd. из коллекции *in vitro* ВИР / Г. И. Пендинен, В. Е. Чернов // Биотехнология и селекция растений. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 6–14. <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2019-3-o2>
16. Сравнительная оценка показателей антиоксидантной активности некоторых видов многолетних луков / Н. А. Голубкина, Т. М. Середин, А. В. Молчанова, О. В. Кошелева // Овощи России. – 2018. – № 5. – С. 73–76. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-3-73-76>
17. Эссенциальные микронутриенты – компоненты антиоксидантной защиты в некоторых видах рода *Allium* / Т. И. Ширшова, И. В. Бешлей, Н. А. Голубкина [и др.] // Овощи России. – 2019. – № 1. – С. 68–79. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-1-68-79>
18. Evaluation and comparison of the content of total polyphenols and antioxidant activity of selected species of the genus *Allium* / M. Lenková, J. Bystrická, T. Tóth, M. Hrstková // Journal of Central European Agriculture. – 2016. – Vol. 17, № 4. – P. 1119–1133. <https://doi.org/10.5513/jcea01/17.4.1820>
19. Relationships between bioactive compound content and the antiplatelet and antioxidant activities of six *Allium* vegetable species / H. V. Beretta, F. Bannoud, M. Insani [et al.] // Food Technology and Biotechnology. – 2017. – Vol. 55, № 2. – P. 266–275. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.02.17.4722>
20. Шишкина, Е. В. Срок посадки как элемент агротехнологии лука многоярусного / Е. В. Шишкина, С. В. Маркова // Научно-исследовательские публикации. – 2023. – № 2. – С. 72–74.
21. Оценка душицы обыкновенной по хозяйственно полезным признакам / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак, А. А. Блохин [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 4. – С. 44–51.
22. Оценка новых сортов *Origanum vulgare* L. по хозяйственно-полезным признакам / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак, Г. С. Егорова [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 4 (72). – С. 151–159. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-04-15>
23. Сачивко, Т. В. Методика оценки хозяйственно полезных признаков герани крупнокорневищной / Т. В. Сачивко // Картофелеводство и овощеводство: сб. науч. тр. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству. – Мн., 2023. – Т. 1. – С. 302–309.
24. Сачивко, Т. В. Усовершенствование методики оценки хозяйственно полезных признаков пажитника голубого / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак // Проблемы развития АПК региона. – 2023. – № 3 (55). – С. 82–88. https://doi.org/10.52671/20790996_2023_3_82
25. Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений / М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, Гос. инспекция по испытанию и охране сортов растений. – Мн.: ИВИЦ Минфина, 2024. – 292 с.
26. Сачивко, Т. В. Новые сорта нетрадиционных видов лука / Т. В. Сачивко, В. Н. Босак // Наше сельское хозяйство. – 2017. – № 7 (159). – С. 64–66.
27. Иксанова, А. М. Селекция и интродукция многолетних луков в Московской области / А. М. Иксанова, А. Н. Хаврин, Е. В. Ключков // Вестник овощевода. – 2011. – № 2. – С. 44–48.

References

1. Vodyanova O. S. *Onions: bulb, shallot, leek, perennial, wild edible and ornamental, garlic: morpho-biological characteristics, selection, seed production, cultivation technologies, protection from pests and diseases*. Almaty, Baspalar Yii Publ., 2007. 367 p. (in Russian).
2. Sachyuka T. U., Duktova N. A., Porkhuntsova O. V., Bosak V. M., Tsykunova O. A., Naumov M. V., Blokhin A. A. *Plant genetic resources. Spicy-aromatic and essential-oil plants*. Gorki, Belarusian State Agricultural Academy, 2021. 22 p. (in Russian).
3. Kokoreva V. A. Tree onion a little part in global biodiversity. *Ovoshchi Rossii = Vegetable Crops of Russia*, 2017, no. 1, pp. 34–38 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-1-34-38>
4. Pivovarov V. F., Ershov I. I., Agafonov A. F. *Onion crops*. Moscow, 2001. 500 p. (in Russian).
5. Sachyuka T. V., Bosak V. N. Evaluation of new varieties of multi-tiered onion on economically useful ground. *Ovoshchi Rossii = Vegetable Crops of Russia*, 2024, no. 1, pp. 36–40 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-1-36-40>
6. Seredin T. M., Gerasimova L. I. Onion multi-tiered. *Prisadebnoe khozyaistvo* [Homestead Farming], 2017, no. 10, pp. 62–64 (in Russian).
7. Shishkina E. V., Zharkova S. V. Expanding the assortment of multi-tiered onions in the conditions of the Siberian region. *Mezhdunarodnyi zhurnal humanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2022, no. 8-2 (71), pp. 21–24 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-8-2-21-24>
8. Yur'eva N. A., Kokoreva V. A. *The variety of bows and their use*. Moscow, Publishing House of the Moscow Agricultural Academy, 1992. 159 p. (in Russian).

9. Sachyuka T. U., Bosak V. M. New rare types of onions: characteristics and features of cultivation. *Zemledelie i zashchita rastenii = Agriculture and Plant Protection*, 2015, no. 4 (101), pp. 20–21 (in Russian).
10. Sachyuka T. U., Bosak V. M. Evaluation of economically valuable signs of perennial onions. *Sel'skoe khozyaistvo – problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh trudov* [Agriculture – problems and prospects: collection of scientific papers]. Grodno, 2016, vol. 32, pp. 152–158 (in Russian).
11. Sachyuka T. U., Bosak V. M., Gordeeva A. P., Naumov M. V. *Characteristics and features of agricultural techniques of new varieties of spicy-aromatic crops*. Gorki, Belarusian State Agricultural Academy, 2019. 19 p. (in Russian).
12. Sachyuka T. U., Kovalenko N. A., Supichenko G. N., Bosak V. M. Antioxidant activity of new varieties spicy-aromatic and essential-oil plants. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2023, vol. 61, no. 4, pp. 282–290 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-4-282-290>
13. Bosak V. N., Sachivko T. V., Barbasov N. V., Egorov S. V., Egorova E. V. The biochemical composition of new varieties of spicy-aromatic and essential oil crops. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2024, no. 1, pp. 64–68 (in Russian).
14. Kukushkina T. A., Fomina T. I. The content of biologically active substances in the green biomass of perennial onions (*Allium* L.). *Agrarnyi vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*, 2021, no. 4 (207), pp. 85–92 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-207-04-85-92>
15. Pendinen G. I., Chernov V. E. Diversity of chromosomal composition in top onion *Allium × proliferum* (Moench) Schrad. ex Willd. accessions from the VIR *in vitro* collection. *Biotehnologiya i selektsiya rastenii = Plant Biotechnology and Breeding*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 6–14 (in Russian). <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2019-3-o2>
16. Golubkina N. A., Seredin T. M., Molchanova A. V., Kosheleva O. V. Comparative evaluation of antioxidant activity in several perennial onion. *Ovoshchi Rossii = Vegetable Crops of Russia*, 2018, no. 5, pp. 73–76 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-3-73-76>
17. Shirshova T. I., Beshley I. V., Golubkina N. A., Golubev F. V., Kljuykov E. V., Cheryomushkina V. A. Essential micronutrients – components of antioxidant protection in some species *Allium*. *Ovoshchi Rossii = Vegetable Crops of Russia*, 2019, no. 1, pp. 68–79 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-1-68-79>
18. Lenková M., Bystrická J., Tóth T., Hrstková M. Evaluation and comparison of the content of total polyphenols and antioxidant activity of selected species of the genus *Allium*. *Journal of Central European Agriculture*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 1119–1133. <https://doi.org/10.5513/jcea01/17.4.1820>
19. Beretta H. V., Bannoud F., Insani M., Berli F., Hirschegger P., Galmarini C. R., Cavagnaro P. F. Relationships between bioactive compound content and the antiplatelet and antioxidant activities of six *Allium* vegetable species. *Food Technology and Biotechnology*, 2017, vol. 55, no. 2, pp. 266–275. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.02.17.4722>
20. Shishkina E. V., Zharkova S. V. Planting time as an element of agricultural technology onion tiered. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii* [Research Publications], 2023, no. 2, pp. 72–74 (in Russian).
21. Sachivko T. V., Bosak V. N., Blokhin A. A., Beinia V. A., Semashko T. V., Golovach A. A. Evaluation of oregano according to economically valuable traits. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2023, no. 4, pp. 44–51 (in Russian).
22. Sachivko T. V., Bosak V. N., Egorova G. S., Ryadnov A. I., Lebedeva L. V. Evaluation of new varieties of *Origanum vulgare* L. on economically useful grounds. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*, 2023, no. 4 (72), pp. 151–159 (in Russian). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-04-15>
23. Sachyuka T. U. Methodology for assessing economically valuable traits of Bigroot Geranium. *Kartofelevodstvo i ovoshchevodstvo: sbornik nauchnykh trudov = Potato and vegetable growing: proceedings*. Minsk, 2023, vol. 1, pp. 302–309 (in Russian).
24. Sachivko T. V., Bosak V. N. Improvement of the assessment methodology economically useful signs of Blue fenugreek. *Problemy razvitiya APK regiona = Development Problems of Regional Agro-Industrial Complex*, 2023, no. 3 (55), pp. 82–88 (in Russian). https://doi.org/10.52671/20790996_2023_3_82
25. State Inspectorate for Testing and Protection of Plant Varieties. *State register of varieties of agricultural plants*. Minsk, IVTs Minfina Publ., 2024. 292 p. (in Russian).
26. Sachyuka T. U., Bosak V. M. New varieties of non-traditional types of onions. *Nashe sel'skoe khozyaistvo* [Our Agriculture], 2017, no. 7 (159), pp. 64–66 (in Russian).
27. Iksanova A. M., Khavrin A. N., Klyuikov E. V. Selection and introduction of perennial onions in the Moscow region. *Vestnik ovoshchevoda* [Bulletin of the Vegetable Grower], 2011, no. 2, pp. 44–48 (in Russian).

Информация об авторах

Сачивко Татьяна Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий специалист, Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений (ул. Казинца, 62, 220108, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9707-8215>. E-mail: sachyuka@rambler.ru

Босак Виктор Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт льна, Национальная академия наук Беларуси (ул. Центральная, 27, 211003, Устье, Витебская область, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-7197-2315>. E-mail: bosakviktar@gmail.com

Семашко Татьяна Васильевна – заместитель директора по патентной экспертизе и испытанию сортов на ООС, Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений (ул. Казинца, 62, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: belsort@sorttest.by

Information about the authors

Tatsiana U. Sachyuka – Ph. D. (Agriculture), Associate Professor, Leading Specialist, State Inspection for Testing and Protection of Plant Varieties (62, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9707-8215>. E-mail: sachyuka@rambler.ru

Viktar M. Bosak – Dr. Sc. (Agriculture), Professor, Head of the Laboratory, Institute of Flax, National Academy of Sciences of Belarus (27, Tsentralnaya Str., 211003, Ustye, Vitebsk Region, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-7197-2315>. E-mail: bosakviktar@gmail.com

Tatsiana V. Semashko – Deputy Director, State Inspection for Testing and Protection of Plant Varieties (62, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belsort@sorttest.by

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

UDC 633.11:631.531.027.2:581.1.046

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-221-231>

Поступила в редакцию 11.02.2025

Received 11.02.2025

Nayab Hina¹, Ayesha Mushtaq¹, Farida Behlil¹, Farrukh Bashir¹,
Sabeena Rizwan¹, Jahangir Khan²

¹Sardar Bahadur Khan Women's University, Quetta, Pakistan²Balochistan Agricultural Research and Development Centre, Quetta, Pakistan

IMPACT OF SILICA NANOPARTICLES ON WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) VARIETIES FROM BALOCHISTAN GROWN IN SALINE SOILS

Abstract. Finding effective methods to raise salt tolerance of agricultural crops is critical for food security in arid regions. Salinity negatively affects wheat growth, reducing yield and productivity. This study aims to evaluate the impact of silica nanoparticles (Si NPs) on the growth and development of two wheat varieties from Balochistan (Azri and Shalkot) cultivated in saline soil. Seeds of Azri and Shalkot wheat varieties were collected and sown at the Balochistan Agricultural Research and Development Centre (BARDC), Quetta, under normal and saline conditions. The experiment consisted of three treatments: T1 (control) with only Nitrogen, Phosphorus, and Potassium (NPK) fertilizer; T2 with Si NPs + NPK fertilizer; and T3, where seeds were primed in Si NPs before sowing. For priming, seeds in T3 were soaked separately in water and Si NPs for 24 hours before planting. Germination was monitored for 10 to 15 days, and various growth parameters were assessed at different growth stages, including plant maturity. The wheat variety Shalkot exhibited better growth than Azri under saline stress. Silicon supplementation substantially improved plant height, spike length, chlorophyll content, spike weight, productive stems per unit area, and dry mass weight. Among the treatments, Si NP supplementation (T2) enhanced all growth parameters, while the priming treatment (T3) yielded the best results. The application of silica nanoparticles effectively enhanced wheat growth even under salt stress. This study highlights the potential of Si NPs to mitigate salinity effects and improve wheat yield, making it a promising strategy for sustainable agriculture in salt-affected regions.

Keywords: silica, nanoparticles, salinity, wheat, Balochistan

For citation: Nayab Hina, Ayesha Mushtaq, Farida Behlil, Farrukh Bashir, Sabeena Rizwan, Jahangir Khan. Impact of silica nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties from Balochistan grown in saline soils. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 221–231. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-221-231>

Найяб Хина¹, Айеша Муштак¹, Фарид Бехлил¹, Фаррух Башир¹, Сабина Ризван¹, Джахангир Хан²

¹Женский университет имени Сардара Бахадура Хана, Кветта, Пакистан²Белуджистанский центр сельскохозяйственных исследований и развития, Кветта, Пакистан

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА СОРТА ПШЕНИЦЫ (*TRITICUM AESTIVUM* L.) ИЗ БЕЛУДЖИСТАНА, ВЫРАЩИВАЕМЫЕ НА ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВАХ

Аннотация. Проведена оценка влияния наночастиц диоксида кремния (Si NPs) на рост и развитие двух сортов пшеницы из Белуджистана (Azri и Shalkot), выращиваемых на засоленной почве. Эксперимент включал три варианта обработки для каждого сорта в нормальных условиях и в условиях засоления: T1 (контроль) – внесение стандартного азотно-фосфорно-калийного удобрения (NPK), T2 – внесение Si NPs совместно с NPK и T3 – предпосевная обработка семян (прайминг) в растворе Si NPs (семена отдельно замачивали в воде и в растворе Si NPs в течение 24 ч). Всхожесть семян обоих сортов отслеживали в течение 10–15 суток. Биометрические и урожайные параметры фиксировали на ключевых этапах онтогенеза, включая фазу полной спелости. Установлено, что сорт Shalkot обладает более высокой адаптивной способностью и демонстрирует лучшие показатели роста в условиях засоления по сравнению с сортом Azri. Экзогенное применение Si NPs существенно нивелировало негативное действие солевого стресса у обоих сортов. Зафиксировано достоверное увеличение высоты растений, длины и массы колоса, количества продуктивных стеблей на единицу площади, накопления сухого вещества, а также содержания хлорофилла в листьях. Сравнительный анализ вариантов обработки показал, что почвенное внесение наночастиц (T2) заметно улучшало все ростовые параметры, однако максимальная эффективность по всем исследуемым показателям была достигнута в варианте с предпосевным праймингом семян (T3). Применение наночастиц диоксида кремния эффективно улучшало рост пшеницы даже в условиях солевого стресса. Исследование демонстрирует потенциал Si NPs в снижении негативного воздействия засоления и повышении урожайности пшеницы, что делает этот подход перспективной стратегией устойчивого земледелия в регионах с засоленными почвами.

Ключевые слова: кремнезем, наночастицы, засоление, пшеница, Белуджистан

Для цитирования: Влияние наночастиц диоксида кремния на сорта пшеницы (*Triticum aestivum* L.) из Белуджистана, выращиваемые на засоленных почвах / Найяб Хина, Айеша Муштак, Фарида Бехлил [и др.]. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 221–231 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-221-231>

Introduction. Wheat is considered a staple food and is the most essential of the three most widely produced cereal crops (wheat, rice, and maize). Wheat is annually harvested above 600 million tons. It has historically been a basic agricultural commodity [1]. The increase in wheat production in Pakistan occurred largely due to the expansion of the cultivated area, which increased from 8.9 million hectares in 2014 [2] to 9.4 million hectares in 2020 [3]. Wheat is cultivated both as a winter crop and a spring crop. However, the spring crop is less extensively grown compared to the winter crop. This is possible because of differences in variety at different places. Wheat is cultivated in tropical and subtropical areas. Wheat contains high nutritional values, but agricultural production is affected by salt accumulation [4] and almost 40,000 hectares of land are degraded annually just because of salinity in Pakistan [5]. A survey revealed that almost 6.68 M hectares of Pakistani land is wasted due to salinity [6].

The provinces of Pakistan – Sindh, Punjab, Balochistan, and KPK – have saline land (294.3, 130.4, 15.2, and 0.2 hectares respectively) [7]. Balochistan is the largest province of Pakistan by area but unfortunately it is wheat-deficient. To fulfil its wheat requirements, it has to rely on other provinces. Environmental stresses negatively affect plant growth by causing various molecular, biochemical, physiological, morphological changes in plants [8]. Environmental stresses are the factors which limit crop production in Balochistan. Basic factors include drought and cold in winter, besides these, a major abiotic factor is salinity [9–12]. It decreases wheat production in Balochistan, as salinity reduces the yield of wheat annually. It is essential to overcome such stress by employing advanced agricultural methods. Silicon supplementation is one of the best methods to control salt stress. Wheat production can be enhanced by improving fertilizers with silicon supplementation in marginal lands.

Nanotechnology represents a revolution in agriculture. Silicon nanoparticles have gained attention in advanced research because of their easy synthesis and wide applications in industries like agriculture, catalysis, pigments, pharmacy and electronic etc. [13]. Stöber introduced the synthesis of nanoparticles of 0.5–2.0 micron sized [14]. The Stöber method is the most common and approachable method used by researchers. It is applied with modifications like ultra-sonication. The literature review specifies that the Stöber method (Sol-gel method) is the easiest and most economically effective method to synthesize monodispersed, nano-sized, spherical silica particles.

Silica nanoparticles (Si NPs) can be easily synthesized by using TEOS (Tetraethyl orthosilicate) as a precursor [15]. Si NPs can be employed to increase wheat productivity. Many investigations have revealed that utilizing a small quantity of silicon can enhance the salt tolerance of soil. According to a research study, the utilization of Si NPs on 25 lentil genotypes showed beneficial results when these were grown in saline soil. Seedling growth and germination were increased [16]. There is a pressing need to apply nanotechnology to improve yield and sustain agriculture [17].

It is beneficial to apply silicon for healthy crop growth under both biotic and abiotic stress [18]. Wheat can accumulate silicon. Silicon helps to retain water in plants as well as enhance resistance against diseases. It can help maintain Na^+ and K^+ ratio in plants. Various silicon sources have been employed, out of which sodium silicate has been established as a helpful source for good growth parameters in saline environments [12–20]. It is reported that calcium silicate is a source of silicon that increases spike grains, tiller, grain yield and biological yield [21]. Other sources of silicon, like potassium metasilicate, remarkably sustain water potential in plants under saline and drought stress [22]. Silica gel boost various growth parameters such as spike length, grain yield, biological yield, relative water content, and proline content [23]. Silicon supplementation notably improves the plants efficiency under water-deficit conditions. Application of foliar spray at the time of tillering is also effective [24].

Seed priming is one of the pre-germination techniques. This technique involves soaking seeds at osmotic potential. Priming results in better growth and yield. It decreases the mean germination time. Nowadays seed priming technique is widely used [25]. Using sodium silicate in priming was found to improve the germination and seedling growth [20]. Priming seeds with Si NPs enhanced seedling shoot growth, root dry weight, seed germination, and mean germination time in wheatgrass [26].

It is vital to use silica nanoparticles for better wheat production and silica availability. As it is revealed from research that it enhances salt tolerance and give better consequences. It can support saline and drought environments. The present study investigates the synthesis of silica nanoparticles and examines their effects on the growth of two wheat varieties under salt-stressed environments. The nanoparticles were applied using two methods: direct supplementation and seed priming. Field experiments were conducted at the BARDC, Quetta.

Materials and Methods. *Silica nanoparticles synthesis.* Nanosized silica particles were synthesized by the Stöber method (modified). TEOS was utilized as a precursor. 10 ml ethanol and 4 ml DI water were mixed. In this mixture TEOS (1.8 ml) was taken in a beaker and allowed to sonicate for 60 minutes (at 35 °C). In a separate beaker NH_4OH (1.4 ml) and DI water (1.4 ml) were mixed. NH_4OH was then added dropwise to the first mixture under constant stirring. Grey color appearance indicated the formation of SiO_2 nanoparticles. These particles were centrifuged at 4,000 rpm for 20 minutes. Finally, these nanoparticles were filtered and precipitated out. Increased sonication time resulted in reduction of size. Silica nanoparticles were prepared in Sardar Bahadur Khan Women's University, Quetta, Balochistan. Silica particles were subjected to FTIR, UV and SEM.

Treatments (T) & Varieties (V): Two wheat varieties (Azri and Shalkot) were selected from BARDC, Quetta. Healthy seeds of both varieties were rinsed for control and for treatment (Table). The synthesized Si NPs were used in addition to nitrogen phosphorus potassium (NPK) fertilizer (T2) in the fields to grow wheat in saline and non-saline conditions. In priming treatment (T3), seeds were soaked separately in water and Si NPs solution for 24 hours.

The two varieties of wheat were grown in normal soil as well as in saline soil (100 mM NaCl added in it) under all the above treatments.

Growth parameters of Wheat. Seeds of Azri and Shalkot were sown in BARDC, Quetta in the first week of October, 2022. 20 : 20 : 20 Nitrogen Phosphorus and Potassium (NPK) was used for fertilization. Germination was recorded for 10 to 15 days, observed continuously, and compared with the control. Physiological factors were also checked. Data was recorded for shoot length, spike length, spike weight, seed weight, chlorophyll content, leaf length, grains per spike, and weight of dry mass. Results of control were compared to other treatments. Data were analyzed using SPSS to calculate means and variance.

Results and Discussion. As a staple food, wheat crop is an essential cereal crop. Its demand is increasing yearly due to increase in population. So wheat yield needs to increase annually. Wheat yield is badly affected in areas, both in arid and semi-arid zones. Different factors are involved to affect its production. Salt stress is one of them. It results in a reduction in crop yield. Many areas of Balochistan and Sindh (Provinces of Pakistan) are salt-affected which in turn results in a reduction of wheat crop. To reduce salt-affected areas silica implementation is helpful which could enhance growth as well as yield of wheat in these provinces of Pakistan. Salt stress causes detrimental changes in morphology, physiology and metabolism. These changes lower plant growth. To mitigate the adverse effect of salt stress, silicon implementation is a good source [9].

The substantial role of silicon in wheat was determined in the current century. It is obvious that wheat varieties grow better by applying silicon. Its beneficial effects have been reported in wheat varieties. Wheat is a silicon accumulator [9–10]. Silicon application enhances leaf growth in wheat when compared to control in saline conditions [27, 28]. Implementation of silicon enhanced growth in wheat in saline conditions due to less intakes of sodium [29]. Silicon maintains saline tolerance in wheat and is classified as a valuable element for plant biology. It enhances potassium and decreases sodium concentration in wheat varieties grown under salt stress [30]. Application of silicon proved to enhance salinity tolerance and increase wheat production. Therefore, instead of bulk or macro silicon, the silica nanoparticles can be employed to increase availability of silicon more efficiently. So, better results can be achieved due to nanosized particles [11–12].

Treatments and Varieties of wheat

S. No.	Symbol	Treatment & Variety
1	V_1T_1	Control of Azri
2	V_1T_2	Seeds (Azri) + Si NPs
3	V_1T_3	Seeds (Azri) + Si NPs + priming
4	V_2T_1	Control of Shalkot
5	V_2T_2	Seeds (Shalkot) + Si NPs
6	V_2T_3	Seeds (Shalkot) + Si NPs + priming

The current study is designed to evaluate the efficacy of silicon in agriculture and to check its effect on wheat crop growth. In this study nanosized silica particles were selected as silicon source for wheat. These nanoparticles provide valuable results in experiments when utilized in field. In earlier research, beneficial role of silicon has been noticed. Wheat is a silicon accumulator. In the presence of silicon wheat grows better [9]. In current research important growth parameters were improved, and salt stress was considerably suppressed. It established good results even in salt stress area.

In our study the silica nanoparticles were prepared through the Stöber method with few alterations. Particles were also characterized by scanning electron microscopy (SEM), ultraviolet visible spectroscopy (UV) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). These particles were used to proceed for investigation of their effect on wheat growth in the present study. However, the results of synthesized silica nanoparticles were in agreement with prior studies in which the Stöber method with some alterations and associated with Ultrasonication generated nanosized particles in the range of 50–100 nm [9].

The current study is conducted to focus on synthesis of silica nanoparticles and their impact on wheat growth for this purpose two wheat varieties (Azri and Shalkot) were grown in normal and saline conditions in Balochistan. Silica particles were employed not only to control the salinity but also to improve the yield of wheat. In this study different growth parameters (leaf length, dry weight, fresh weight, number of grains, weight of grains and chlorophyll contents) of two wheat varieties were observed in saline and non-saline conditions. In present study, improved growth parameters were observed. Results revealed reduced salinity stress and increased tolerance. Results of silicon implementation in wheat are in accordance with earlier studies in which silicon source was calcium silicate [9].

The values of different growth parameters of replicates of two varieties in normal and saline conditions showed notable differences. Shalkot showed more resistance towards the saline environment. The final germination percentage was higher in Shalkot as compared to Azri. It was observed that growth parameters were altered in saline conditions. Plant growth was better in priming treatment as compared to direct silicon supplementation. The values of growth parameter are illustrated through bar graphs.

Growth parameters like plant height was normal in control while it was reduced in saline treatments (Figures 1, 2). When silica nanoparticles were employed in treatment VIT2 in both saline and non-saline soil all the growth parameters were improved. Application of silica nanoparticles, both via priming and direct exposure, significantly mitigated salt stress in the Azri wheat variety, resulting in an increase in plant height from 41.57 cm in the control group to 44.20 cm. In treatment where silica nanoparticles were used directly the plant height increased and better results were obtained. In past research plant height in rice was improved. Similarly, increased shoot length was noticed in timber species in China (Changbai larch) due to silicon application. Enhanced shoot length was also observed because of silicon effect on Basil in saline environment [9–15]. However, variation was observed in spike length (Figures 3, 4). Spike weight was observed to increase in priming treatments in both wheat varieties (Figures 5, 6). Tillers per half meter remarkably increased in priming treatments in both varieties (non-saline and saline treatments) as compared to control (Figures 7, 8). An increase in chlorophyll content was also observed in priming treatment of wheat in non-saline and saline conditions (Figures 9, 10), as this is in agreement with previous research in which chlorophyll content was increased in saline area when compared with the control [9–15]. Weight of dry mass and weight of seed grain of wheat in non-saline conditions were enhanced (Figures 11, 12). In saline soil, the values of dry mass were found better as compared to the control. These observations are similar to findings of silicon effect on Basil's weight. Therefore, it is proved that silica nanoparticles help wheat plants to survive under salt stress.

There was variation in weight of seed grain in saline condition of both varieties when compared with the control (Figures 13, 14). In past many workers found positive impacts of silicon sources on metabolism and physiology of different crops. Silicon sources increased plant height and dry mass of wheat even in saline. In a research in rice field dry matter enhanced due to silicon application. Similarly, in another research silicon implementation enhanced the yield and growth in cereals. It may be due to low uptake of sodium in the saline environment. Priming treatment with Si NPs also generated better results and seeds were found persistent in saline treatment, as priming causes breaking of dormancy of seeds faster. Better growth was observed in results when priming was done with Si NPs [9–30].

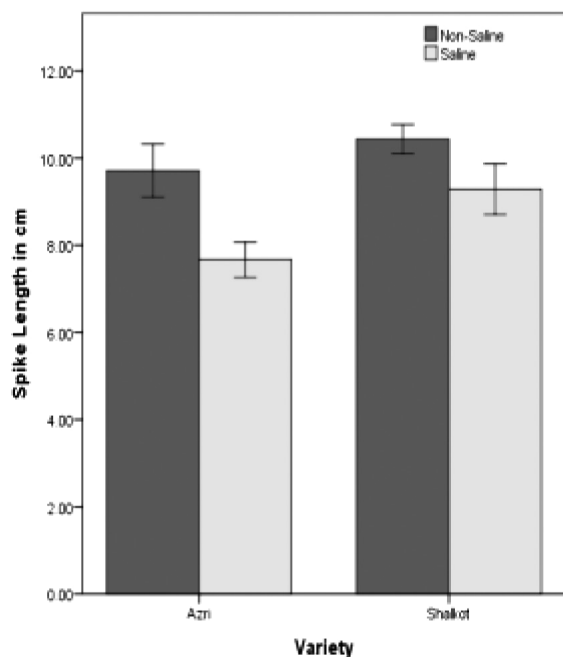


Figure 1. Spike length in two varieties

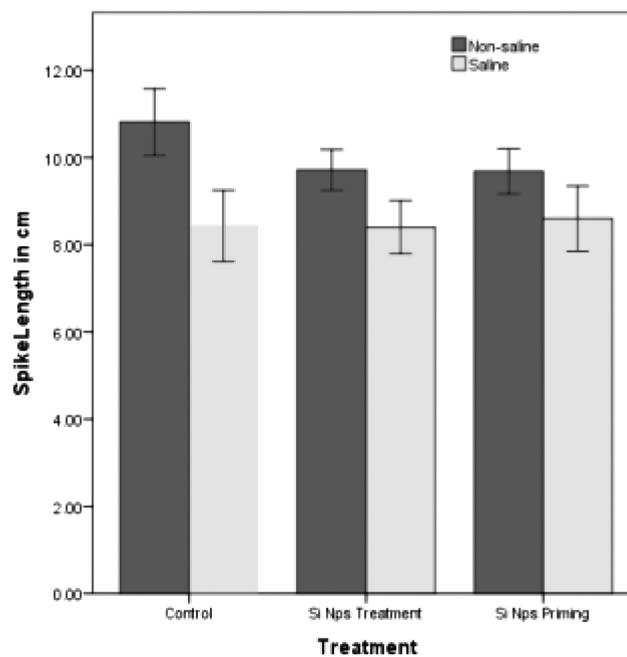


Figure 2. Spike length in different treatments

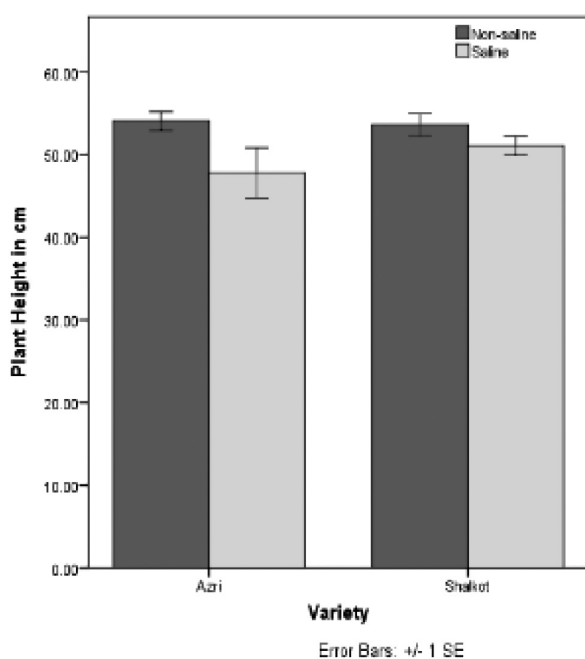


Figure 3. Plant height in two varieties

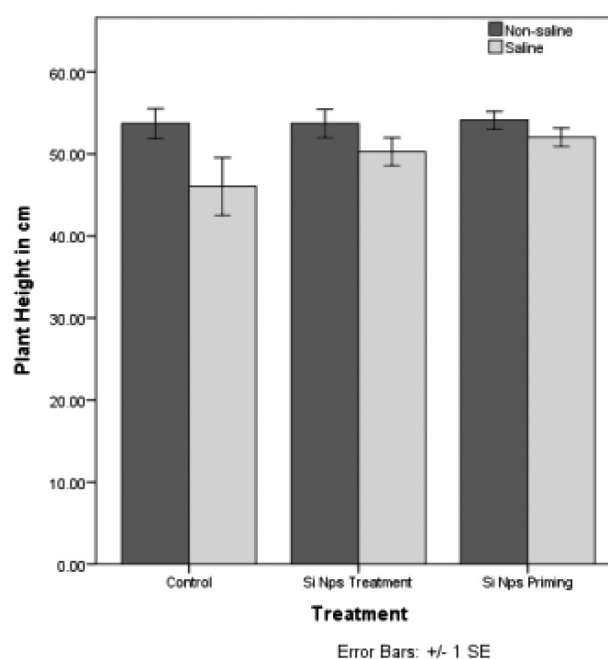


Figure 4. Plant height in different treatments

The salt-resistant variety Shalkot produced better results in presence of silica nanoparticles even in saline and non-saline conditions. When all parameters were checked, beneficial results of silica nanoparticles application were obtained even in saline stress when compared with the control. As depicted from bar graphs (Figures 1–14) growth parameter values for the control treatment (VIT1) were lower than for the treatments that included silica particles in saline and non-saline. However, treatments with silica nanoparticles priming in saline gave better results. Control values under non-saline conditions were better than control values under salt stress. In treatment T2, values of the different growth parameters were higher than in the control, even under salt stress. More substantial outcomes were attained in T2 treatments. In priming treatments (T3) much better outcomes were obtained in saline and non-saline conditions, as salt stress was reduced by priming seeds with nanoparticles at the sowing stage.

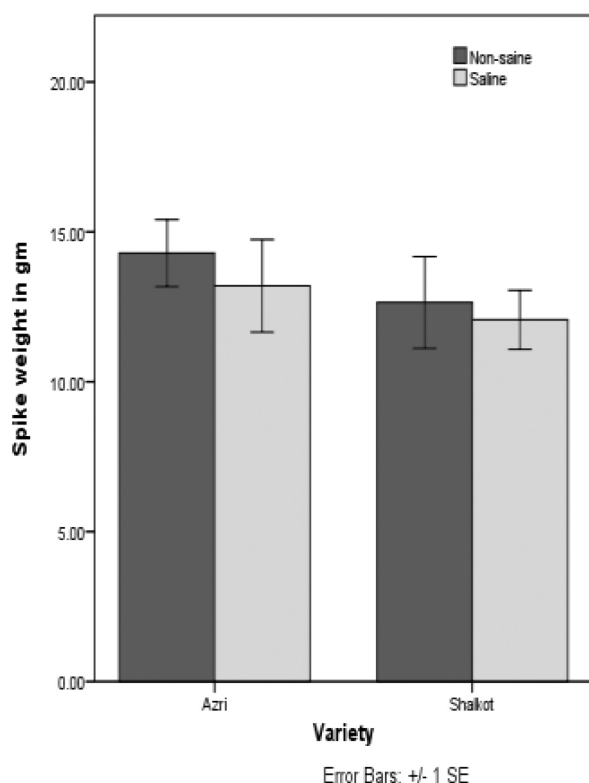


Figure 5. Spike weight in two wheat varieties

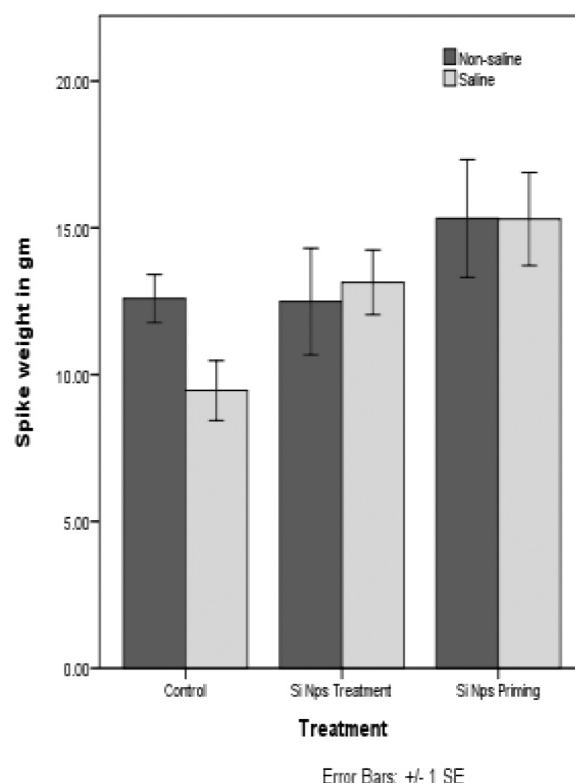


Figure 6. Spike weight in different treatments

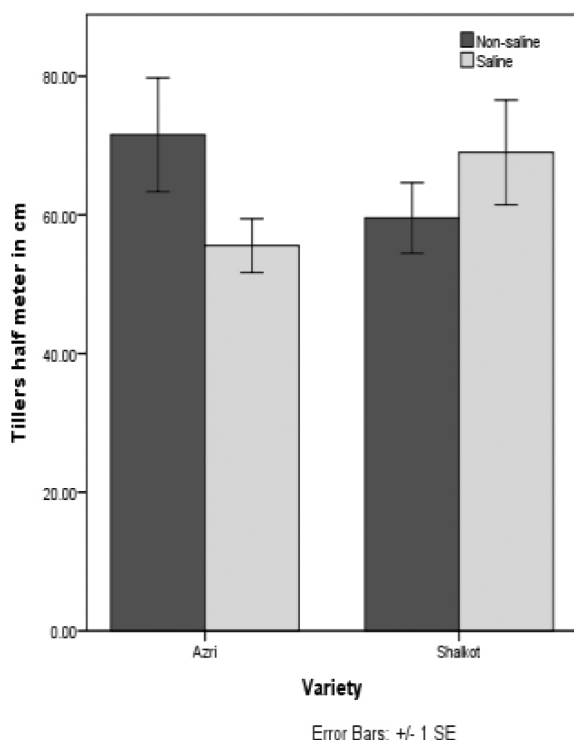


Figure 7. Tillers per half meter in two varieties

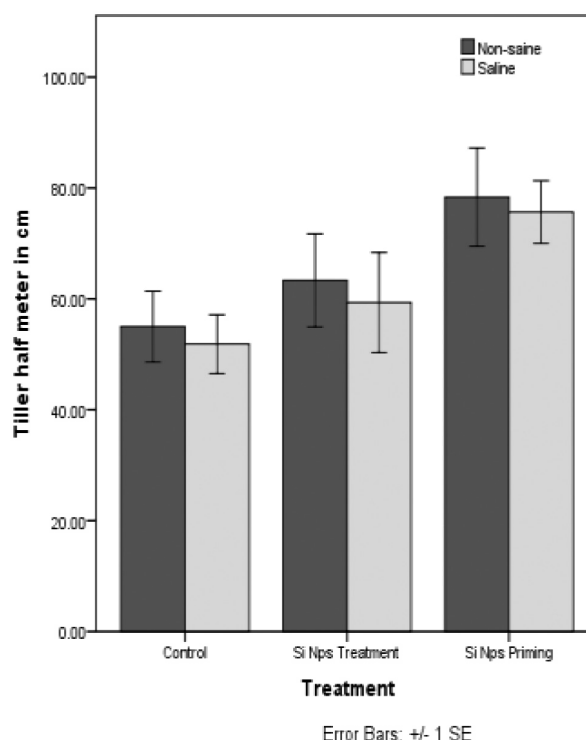


Figure 8. Tillers per half meter in different treatments

It is obvious from the results that in the absence of silica nanoparticles, growth was suppressed in saline soil while in the presence of silica, priming of seeds helped wheat mitigate the adverse effects of salinity.

Salinity reduces growth of wheat. Salinity increases sodium ion concentration and suppresses potassium absorption. It is obvious from the results that, in a controlled environment, the two wheat varieties generated

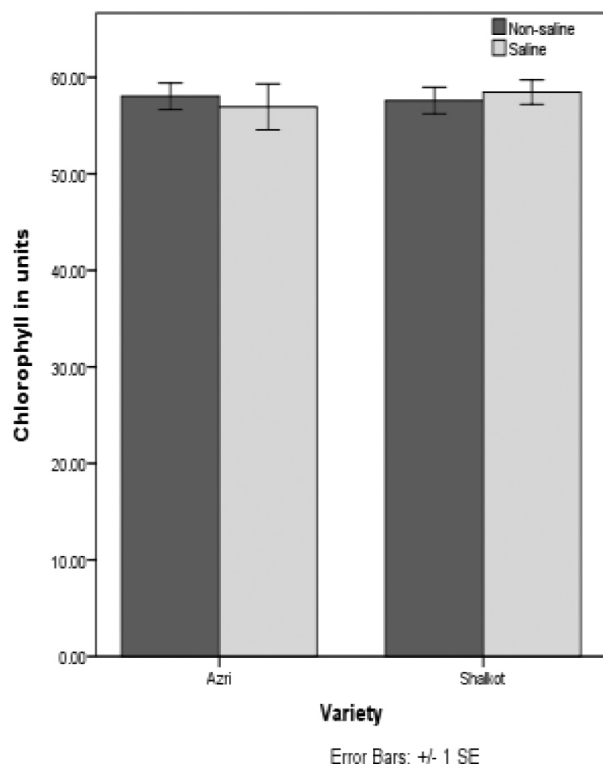


Figure 9. Chlorophyll content in two varieties

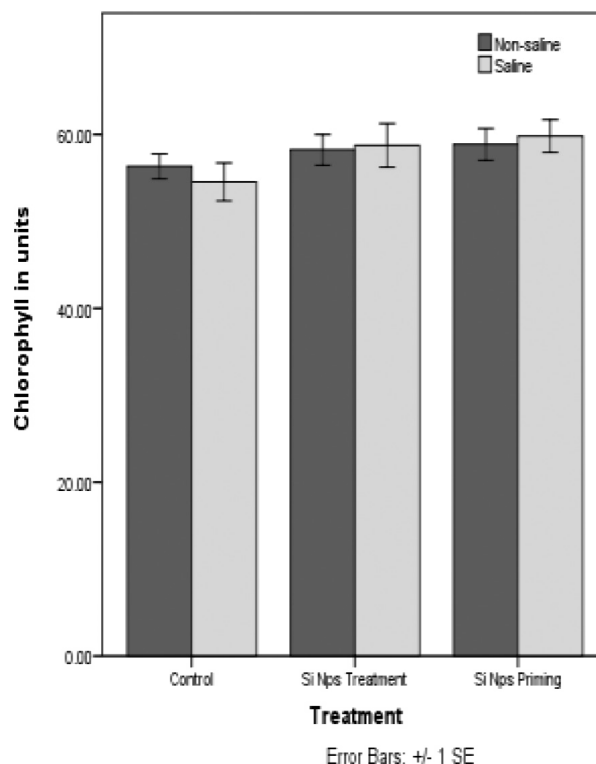


Figure 10. Chlorophyll content in different treatments

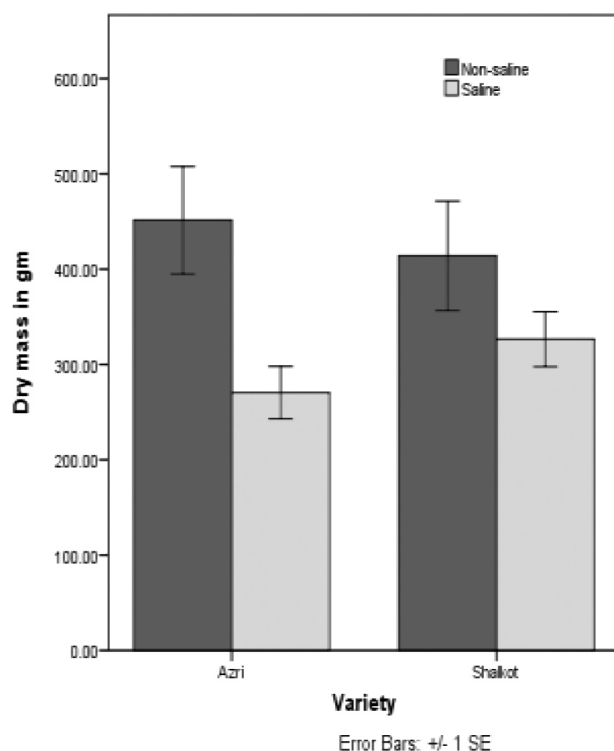


Figure 11. Dry mass in two wheat varieties

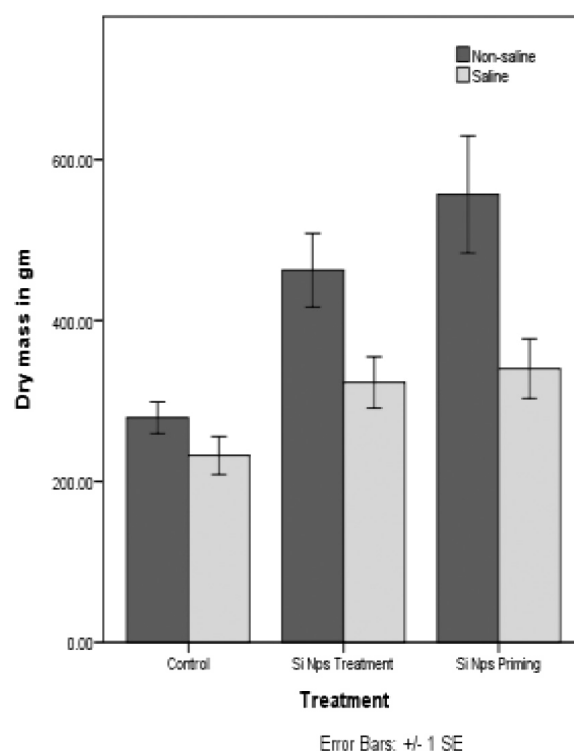


Figure 12. Dry mass in different treatments

different results in saline and non-saline conditions. Although both wheat varieties produced substantial results, Shalkot is more resistant to salt stress and gave better results of growth treatments with priming.

The current study revealed that increased concentration of salt adversely affected wheat varieties due to uptake of sodium. From the earlier studies it has been shown that employing silicon in any form can diminish the unfavorable impacts of salinity in wheat. By the induction of salt stress in two wheat

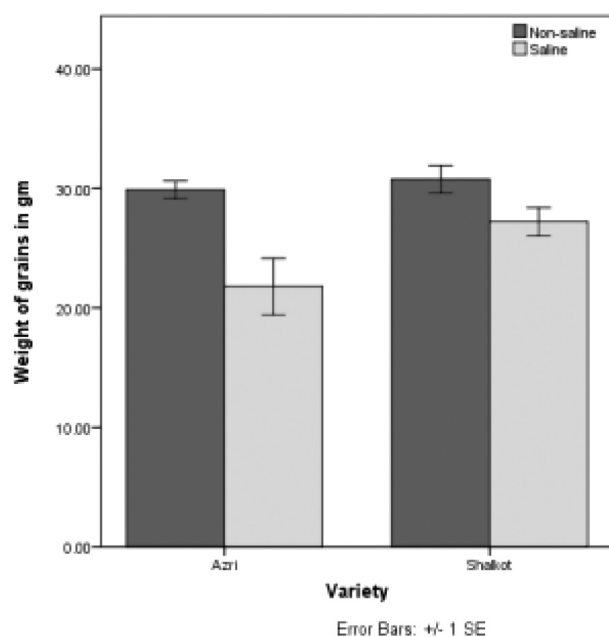


Figure 13. Weight of grains in two wheat varieties

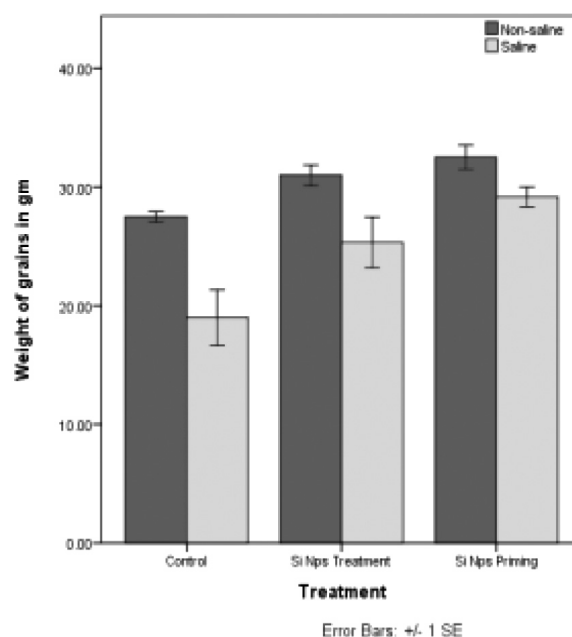


Figure 14. Weight of grains in different treatments

varieties results were in concordance with prior studies. It showed that increased uptake of sodium suppressed plant development. Silica nanoparticle supplementation helped the wheat varieties to overcome salinity stress and generated better results. It may be due to silica's hydrophilic nature as silica aids plants to store water which in turn results in more dilution of sodium in soil. Silica nanoparticles protect plant notably from adverse effect of salt as they are sources of silicon in plants. For example, sodium silicates application mitigates salinity impacts by enhancing the activity of defense-related enzymes of wheat grown in Quetta.

Application of silica nanoparticles in study has enhanced its demand in research. The valuable impact of these nanoparticles elevated the growth parameters. Results of growth parameters were in accordance with previous studies [10–34]. It is obvious from the results that silica nanoparticles reduce salinity stress with improved growth of two wheat varieties.

Principal component analysis: Principal component analysis (PCA) was carried out to analyze the selected samples of wheat varieties. PCA is a good and useful statistical technique for dimension reduction [35]. It converts high-dimensional data into smaller new variables. PCA is a multivariate method which analyzes the information table and observations are defined by many intercorrelated (dependent) variables. PCA transforms original variables which are known as principal components and are linear combinations [36].

PCA of wheat treated with silica nanoparticles revealed correlation and variance of samples grown in non-saline and saline soil. The variability in growth parameters of wheat grown in Quetta are elucidated through PCA shown in Figure 15. This elucidates the variance in data. The total three components were recognized with Eigenvalue greater than one. The first component PC1 revealed eigenvalue 2.924 followed by PC2 and PC3 having eigenvalues 1.638 and 1.049 respectively. The three components account for 80.142 % of total variance. The first component explains 41.767 % of total variance which is maximum variance by PC1 while PC2 and PC3 contribute 23.396 % and 14.979 % respectively. Spike lengths, plant height, chlorophyll, tillers per half meter, spike weight and grain weight are negatively correlated with PC1. This is similar to previous study [37]. These loadings of same sign with PC indicate positive association among these parameters of varieties [35].

PC2 was positively correlated with spike length and weight of seed grain while negatively correlated with plant height, tillers per half meter, chlorophyll, weight of dry mass. PC2 is strongly influenced by spike length and chlorophyll. It indicates longer spike length and increased seed grain weight. From the graph it is evident that PC1 and PC2 collectively explain 65 % of overall variability and are reasonably good for interpretation.

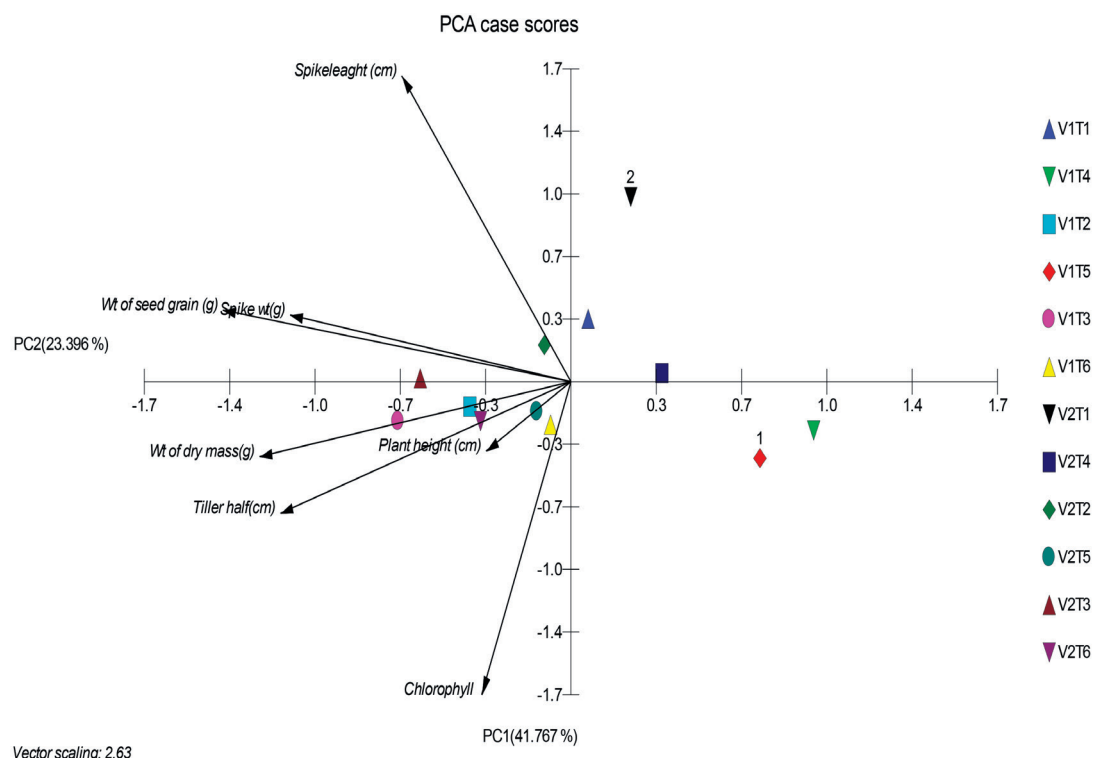


Figure 15. PCA of growth parameter of wheat grown under different treatments

PC3 is positively correlated with plant height, weight of dry mass, weight of seed grain while negatively correlated with spike length, tillers per half meter, chlorophyll, spike weight. Plant height dominates in PC3.

The plot shows several distinct groups. One group reveals that treatment V1T3, V1T2, V2T3 (with Si NPs and priming) are strongly correlated with weight of spike, weight of dry mass and weight of seed grain indicating high yield. In another V1T4 and V1T5 are present along PC1 and PC2 moderately correlated with chlorophyll content. However, chlorophyll and spike length show an inverse correlation. The varieties which show score along axis can be used to enhance yield and it can be good for physiological tolerance in wheat. Results are in agreement with previous studies.

Conclusion. This study evaluated the effects of nano-sized silica particle supplementation on two wheat varieties grown in the fields of BARDC, Quetta. The results demonstrate that silica nanoparticle supplementation substantially enhances wheat growth, even under saline stress conditions, making it a promising alternative for improving crop yield.

The findings suggest that incorporating silica nanoparticles into fertilizers, even in minimal quantities, could benefit agricultural productivity. Additionally, priming wheat seeds with trace amounts of silica nanoparticles has proven to be an effective technique, which could be introduced to farmers as a practical strategy. This approach may be particularly beneficial for wheat cultivation in salt-affected regions of Pakistan, where it can enhance crop resilience and yield. By integrating silica-based fertilization, wheat production in salt-affected areas could be improved.

Acknowledgements. The authors thank Balochistan Agricultural Research and Development Centre for experimental guidance and support.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Белуджистанскому центру сельскохозяйственных исследований и развития за руководство и поддержку в проведении экспериментов.

References

1. Shirazi M. U., Asif S. M., Khanzada B., Khanand M. A., Mohammad A. Growth and ion accumulation in some wheat genotypes under NaCl stress. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2001, vol. 4, no. 4, pp. 388–391. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2001.388.391>
2. Shahzad A., Hamid A., Hussain A., Rashid M., Khan M., Hussain Z. Current situation and future prospects of wheat production in Pakistan. *Journal of Life and Social Sciences*, 2022, vol. 1, no. 1, art. 5. <https://doi.org/10.64013/bbasrjlife.v2022i1.5>

3. Azeem M., Qasim M., Abbasi M. W., Tayyab, Sultana R., Adnan M. Y., Ali H. Salicylic acid seed priming modulates some biochemical parameters to improve germination and seedling growth of salt stressed wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 2019, vol. 51, no. 2, pp. 385–391. [https://doi.org/10.30848/PJB2019-2\(1\)](https://doi.org/10.30848/PJB2019-2(1))
4. Khan M., Shirazi M., Khan M. A., Mujtaba S., Islam E., Mumtaz S., Shereen A., Ansari R., Ashraf M. Y. Role of proline, K/Na ratio and chlorophyll content in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 2009, vol. 41, no. 2, pp. 633–638. Available at: [https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/41\(2\)/PJB41\(2\)633.pdf](https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/41(2)/PJB41(2)633.pdf) (accessed 12 January 2026).
5. Ghafoor A., Qadir M., Murtaza G. *Salt-affected soils: principles of management*. Lahore, Allied Book Centre, 2004. XXV, 304 p.
6. Hussain S. S., Jamil M., Sadiq M., Mehdi S. M. Alleviation of adverse effect of first irrigation to wheat crop in saline sodic soil. *Soil and Environment*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 78–82.
7. *Land use atlas of Pakistan*. Ministry of Environment Government of Pakistan, 2009. Available at: <https://wedocs.unep.org/items/58793c13-0f55-40eb-b6e4-800ee221abd9> (accessed 12 January 2026).
8. Larcher W. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Berlin, Springer Science & Business Media, 2003. 514 p.
9. Mushtaq A., Jamil N., Riaz M., Hornyak G. L., Ahmed N., Ahmed S. S., Shahwani M. N., Malghani M. N. K. Synthesis of silica nanoparticles and their effect on priming of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Biological Forum*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 150–157. Available at: <https://www.researchtrend.net/bfij/pdf/25%20BFIJ-1300-NELOFER%20JAMIL.pdf> (accessed 12 January 2026).
10. Mushtaq A., Rizwan S., Jamil N., Ishtiaq T., Irfan S., Ismail T., Malghani M. N., Shahwani M. N. Influence of silicon sources and controlled release fertilizer on the growth of wheat cultivars of Balochistan under salt stress. *Pakistan Journal of Botany*, 2019, vol. 51, no. 5, pp. 1561–1567. [https://doi.org/10.30848/pjb2019-5\(44\)](https://doi.org/10.30848/pjb2019-5(44))
11. Mushtaq A., Khan Z., Khan S., Rizwan S., Jabeen U., Bashir F., Ismail T., Anjum S., Masood A. Effect of silicon on antioxidant enzymes of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under salt stress. *Silicon*, 2020, vol. 12, no. 11, pp. 2783–2788. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00524-z>
12. Mushtaq A., Sabir N., Kousar T., Rizwan S., Jabeen U., Bashir F. Effect of sodium silicate and salicylic acid on sodium and potassium ratio in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under salt stress. *Silicon*, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 5595–5600. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01342-7>
13. Rao K. S., El-Hami K., Kodaki T., Matsushige K., Makino K. A novel method for synthesis of silica nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, vol. 289, no. 1, pp. 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.02.019>
14. Stöber W., Fink A., Bohn E. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1968, vol. 26, no. 1, pp. 62–69. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90272-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90272-5)
15. Rahman I. A., Padavettan V. Synthesis of silica nanoparticles by sol-gel: size-dependent properties, surface modification, and applications in silica-polymer nanocomposites – a review. *Journal of Nanomaterials*, 2012, vol. 2012, art. 132424. <https://doi.org/10.1155/2012/132424>
16. Sabaghnia N., Janmohammadi M. Effect of nano-silicon particles application on salinity tolerance in early growth of some lentil genotypes. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio C, Biologia*, 2014, vol. 69, no. 2, pp. 39–55. <https://doi.org/10.1515/umcsbio-2015-0004>
17. Siddiqui M. H., Al-Wahaibi M. H. Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 13–17. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.04.005>
18. Liang Y., Yang C., Shi H. Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, vol. 24, no. 2, pp. 229–243. <https://doi.org/10.1081/PLN-100001384>
19. Mecfel J., Hinke S., Goedel W. A., Marx G., Fehlhaber R., Bäucker E., Wienhaus O. Effect of silicon fertilizers on silicon accumulation in wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, vol. 170, no. 6, pp. 769–772. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625038>
20. Hameed A., Sheikh M. A., Jamil A., Basra S. M. A. Seed priming with sodium silicate enhances seed germination and seedling growth in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit stress induced by polyethylene glycol. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 2013, vol. 11, no. 1, pp. 19–24.
21. Ali A., Basra S., Ahmad R., Wahid A. Optimizing silicon application to improve salinity tolerance in wheat. *Soil and Environment*, 2009, vol. 28, no. 2, pp. 136–144.
22. Ahmad M., El-Saeid M. H., Akram M. A., Ahmad H., Haroon H., Hussain A. Silicon fertilization – a tool to boost up drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) crop for better yield. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, vol. 39, no. 9, pp. 1283–1291. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1105262>
23. Ahmed M., Qadeer U., Ahmed Z. I., Hassan F. U. Improvement of wheat (*Triticum aestivum*) drought tolerance by seed priming with silicon. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 299–315. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1048235>
24. Bukhari M. A., Ashraf M. Y., Ahmad R., Waraich E. A., Hameed M. Improving drought tolerance potential in wheat (*Triticum aestivum* L.) through exogenous silicon supply. *Pakistan Journal of Botany*, 2015, vol. 47, no. 5, pp. 1641–1648.
25. Bradford K. J. Manipulation of seed water relations via osmotic priming to improve germination under stress conditions. *HortScience*, 1986, vol. 21, no. 5, pp. 1105–1112. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.21.5.1105>
26. Azimi R., Borzelabad M. J., Feizi H., Azimi A. Interaction of SiO₂ nanoparticles with seed prechilling on germination and early seedling growth of tall wheatgrass (*Agropyron elongatum* L.). *Polish Journal of Chemical Technology*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 25–29. <https://doi.org/10.2478/pjct-2014-0045>
27. Hattori T., Inanaga S., Tanimoto E., Lux A., Luxova M., Sugimoto Y. Silicon induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant and Cell Physiology*, 2003, vol. 44, no. 7, pp. 743–749. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcg090>

28. Hossain M. T., Mori R., Soga K., Wakabayashi K., Kamisaka S., Fujii S., Hoson T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. *Journal of Plant Research*, 2002, vol. 115, no. 1117, pp. 0023–0027. <https://doi.org/10.1007/s102650200004>
29. Tahir M. A., Rahmatullah, Aziz M., Ashraf M., Kanwal S., Maqsood M. A. Beneficial effects of silicon in wheat under salinity stress-pot culture. *Pakistan Journal of Botany*, 2006, vol. 38, no. 5, pp. 1715–1722.
30. Ali A., Basra S. M., Hussain S., Iqbal J., Bukhsh M. A. H. A., Sarwar M. Salt stress alleviation in field crops through nutritional supplementation of silicon. *Pakistan Journal of Nutrition*, 2012, vol. 11, no. 8, pp. 637–655. <https://doi.org/10.3923/pjn.2012.735.753>
31. Suriyaprabha R., Karunakaran G., Yuvakkumar R., Rajendran V., Kannan N. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays*. L) seeds under hydroponic conditions. *Current Nanoscience*, 2012, vol. 8, iss. 6, pp. 902–908. <https://doi.org/10.2174/157341312803989033>
32. Li Y., Xi K., Liu X., Han S., Han X., Li G., Yang L., Ma D., Fang Z., Gong S., Yin J., Zhu Y. Silica nanoparticles promote wheat growth by mediating hormones and sugar metabolism. *Journal of Nanobiotechnology*, 2023, vol. 21, art. 2. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01753-7>
33. Tereshchenko N. N., Makarov B. I., Kravets A.V., Lushchaeva I. V., Minaeva O. M., Svetlichnyi V. A. Efficiency of using silicon dioxide nanoparticles to increase wheat productivity in soil and climatic conditions of Western Siberia. *BioNanoScience*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 4633–4643. <https://doi.org/10.1007/s12668-024-01313-3>
34. Al-Zboon K. K., Bani-Hani N. M., Al-Tabbal J. A., Al-Harabsheh M. S., Haddad M. A. A novel method for maximizing durum wheat yield using silica nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2024, vol. 21, no. 8, pp. 6207–6226. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05434-2>
35. Jolliffe I. T. Graphical representation of data using principal components. *Principal component analysis*. New York, 2002, pp. 78–110. https://doi.org/10.1007/0-387-22440-8_5
36. Abdi H., Williams L. J. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
37. Mishra V. K., Singh T., Baranwal D. K. Genetic diversity based on cluster and principal component analyses for yield and its contributing characters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Madras Agricultural Journal*, 2013, vol. 100, no. 4–6, pp. 320–323. <https://doi.org/10.29321/MAJ.10.001300>

Information about the authors

Nayab Hina – Ph. D. Scholar of Department in Chemistry at Sardar Bahadur Khan Women's University (Brewery Road, Quetta, Pakistan). E-mail: nayabhina2015@gmail.com

Dr. Ayesha Mushtaq – Ph. D. (Biotechnology), Associate Professor in Department of Biochemistry at Sardar Bahadur Khan Women's University (Brewery Road, Quetta, Pakistan). <https://orcid.org/0000-0002-2010-2130>. E-mail: ayeshamushtaq2000@yahoo.com

Dr. Farida Behlil – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor in Department of Chemistry at Sardar Bahadur Khan Women's University (Brewery Road, Quetta, Pakistan). E-mail: faridabehlil@yahoo.com

Dr. Farrukh Bashir – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor in Department of Chemistry at Sardar Bahadur Khan Women's University (Brewery Road, Quetta, Pakistan). E-mail: farrukh_chemistry@yahoo.com

Dr. Sabeena Rizwan – Ph. D. (Biochemistry), Professor in Department of Biochemistry at Sardar Bahadur Khan Women's University (Brewery Road, Quetta, Pakistan). E-mail: sabeenarizwan81@gmail.com

Dr. Jahangir Khan – Ph. D. (Agronomy with a concentration in plant breeding) from the University of Florida, USA; Senior Scientific Officer of Balochistan Agricultural Research and Development Centre (Brewery Road, Quetta, Pakistan). E-mail: jkazrc@yahoo.com

Информация об авторах

Найяб Хина – аспирантка кафедры химии Женского университета имени Сардара Бахадура Хана (Брюэри Роуд, Кветта, Пакистан). E-mail: nayabhina2015@gmail.com

Айеша Муштак – кандидат наук (биотехнологии), доцент кафедры биохимии Женского университета имени Сардара Бахадура Хана (Брюэри Роуд, Кветта, Пакистан). <https://orcid.org/0000-0002-2010-2130>. E-mail: ayeshamushtaq2000@yahoo.com

Фарида Бехлил – кандидат наук (химия), доцент кафедры химии Женского университета имени Сардара Бахадура Хана (Брюэри Роуд, Кветта, Пакистан). E-mail: faridabehlil@yahoo.com

Фаррух Башир – кандидат наук (химия), доцент кафедры химии Женского университета имени Сардара Бахадура Хана (Брюэри Роуд, Кветта, Пакистан). E-mail: farrukh_chemistry@yahoo.com

Сабина Ризван – кандидат наук (биохимия), профессор кафедры биохимии Женского университета имени Сардара Бахадура Хана (Брюэри Роуд, Кветта, Пакистан). E-mail: sabeenarizwan81@gmail.com

Джахангир Хан – кандидат наук (агрономия, специализация – селекция растений) Университета Флориды, США; старший научный сотрудник Белуджистанского центра сельскохозяйственных исследований и развития (Брюэри Роуд, Кветта, Пакистан). E-mail: jkazrc@yahoo.com

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

ЖЫВЁЛАГАДОЎЛЯ І ВЕТЭРЫНАРНАЯ МЕДЫЦЫНА

ANIMAL HUSBANDRY AND VETERINARY MEDICINE

УДК 636.234.1.082.12:577.21

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-232-245>

Поступила в редакцию 20.02.2026

Received 20.02.2026

М. И. Мамедов, У. Т. Турабов, И. Ф. Ганджаев

Азербайджанский государственный аграрный университет, Гянджа, Азербайджанская Республика

МЕТААНАЛИЗ SNP-МАРКЕРОВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ПРИЗНАКАМИ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ГОЛШТИНСКОЙ ПОРОДЫ, НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ANIMAL QTLDB И GENBANK

Аннотация. Целью исследования стала идентификация SNP-маркеров, ассоциированных с признаками молочной продуктивности у коров голштинской породы, на основе систематической интеграции данных международных баз Animal QTLdb (раздел CattleQTLdb) и GenBank, а также разработка оптимальной панели для их коммерческого применения. В рамках исследования было систематически отобрано 47 независимых научных работ, опубликованных в 2015–2024 гг. Совокупная выборка охватила данные по 23 456 животным, что обеспечивает высокую степень достоверности и репрезентативности полученных результатов. Идентифицированы 892 уникальных SNP-маркера, для 723 из которых были рассчитаны объединенные оценки эффектов с применением модели случайных эффектов. Проведены анализ гетерогенности, функциональная аннотация и приоритизация значимых вариантов. Полученные результаты показали, что 47 SNP достигли геномного уровня значимости ($p < 10^{-6}$). Наиболее сильная ассоциация была установлена для rs109421300 в гене DGAT1, который повышает жирность молока в среднем на 0,42 % (95 % доверительный интервал (ДИ): 0,38–0,46; $p = 1,2 \times 10^{-8}$), однако снижает удой на 153 кг. Для генов ABCG2, GHR, STAT5A, LEP и SCD1 выявлены консистентные эффекты в различных популяциях. Межпопуляционная вариабельность составила 15–25 %. Функциональная аннотация продемонстрировала, что 67 % значимых SNP связаны с метаболизмом липидов и лактацией. Анализ онтологии генов (Gene Ontology) выявил значительное обогащение категории биосинтеза липидов, содержащей 34 гена ($FDR = 2,3 \times 10^{-12}$). На основе алгоритма приоритизации предложена оптимальная панель из 30 SNP для коммерческого генотипирования. Панель совместима с платформой Illumina BovineSNP50, а стоимость тестирования одного животного составляет 25–30 долл. США на одно животное. Моделирование показало, что применение предложенной панели может повысить эффективность геномной селекции на 14,7 % (95 % ДИ: 12,1–17,3 %). Полученные результаты формируют фундаментальную основу для совершенствования геномной селекции молочного скота.

Ключевые слова: голштинская порода, SNP-маркеры, молочная продуктивность, метаанализ, DGAT1, геномная селекция, QTL, гены-кандидаты, CattleQTLdb, GenBank

Для цитирования: Мамедов, М. И. Метаанализ SNP-маркеров, ассоциированных с признаками молочной продуктивности крупного рогатого скота голштинской породы, на основе данных Animal QTLdb и GenBank / М. И. Мамедов, У. Т. Турабов, И. Ф. Ганджаев // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 3. – С. 232–245. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-232-245>

Mahil I. Mammadov, Urfan T. Turabov, Ilgar F. Ganjaev

Azerbaijan State Agricultural University, Ganja, Republic of Azerbaijan

META-ANALYSIS OF SNP MARKERS ASSOCIATED WITH MILK PRODUCTION TRAITS IN HOLSTEIN CATTLE BASED ON ANIMAL QTLDB AND GENBANK DATA

Abstract. This study aimed to identify SNP markers associated with milk yield, fat content, and protein percentage in Holstein cattle through a comprehensive meta-analysis of Animal QTLdb (CattleQTLdb section) and GenBank. A systematic review of 47 independent studies published between 2015 and 2024, covering 23,456 animals, was conducted. In total, 892 unique SNP markers were identified, and pooled effect estimates were calculated for 723 of them using a random-effects model. Heterogeneity analysis, functional annotation, and prioritization of significant variants were performed. The analysis revealed

47 SNPs reaching genome-wide significance ($p < 10^{-6}$), with the strongest association observed for rs109421300 in the DGAT1 gene, which increased milk fat content by an average of 0.42 % (95 % CI: 0.38–0.46; $p = 1.2 \times 10^{-8}$) but reduced yield by 153 kg. Consistent effects were also found for ABCG2, GHR, STAT5A, LEP, and SCD1 genes, with between-population variability ranging from 15 to 25 percent. Functional annotation showed that 67 % of significant SNPs were linked to lipid metabolism and lactation, and enrichment analysis revealed significant enrichment of the lipid biosynthesis category, containing 34 genes ($FDR = 2.3 \times 10^{-12}$). Based on prioritization algorithms, a panel of 30 SNPs was proposed for commercial genotyping, compatible with Illumina BovineSNP50 technology, with a testing cost of \$25–30 per animal. Modeling demonstrated that the application of this panel could improve the efficiency of genomic selection by 14.7 % (95 % CI: 12.1–17.3 %). These findings provide a solid foundation for enhancing genomic breeding programs in dairy cattle.

Keywords: Holstein cattle, SNP markers, milk production traits, meta-analysis, DGAT1, genomic selection, QTL, candidate genes, CattleQTLdb, GenBank

For citation: Mammadov M. I., Turabov U. T., Ganjaev I. F. Meta-analysis of SNP markers associated with milk production traits in Holstein cattle based on Animal QTLdb and GenBank data. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 232–245 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-232-245>

Введение. Обеспечение глобальной продовольственной безопасности в условиях роста численности населения является одним из главных вызовов XXI в. Согласно прогнозам ФАО, к 2050 г. численность населения планеты достигнет 9,7 млрд человек, что приведет к увеличению спроса на молочную продукцию на 58–60 % по сравнению с текущим уровнем. Традиционные методы селекции молочного скота, основанные на фенотипической оценке и родословных, характеризуются длительным генерационным интервалом (4–5 лет) и относительно низкими темпами генетического прогресса [1, 2]. В этом контексте применение геномных технологий открывает качественно новые возможности для ускорения селекционного процесса.

Последние два десятилетия ознаменовались революционными достижениями в области геномики сельскохозяйственных животных. Завершение секвенирования генома крупного рогатого скота в 2009 г. и последующая разработка высокоплотных SNP-чипов (Illumina BovineSNP50, BovineHD) создали фундаментальную основу для внедрения геномной селекции [3, 4]. Однонуклеотидные полиморфизмы (SNP) стали базовыми молекулярными маркерами благодаря их высокому уровню полиморфизма, равномерному распределению по геному, стабильности наследования и возможности автоматизированного высокопроизводительного генотипирования [5, 6].

Полногеномные исследования ассоциаций (Genome-wide association studies, GWAS) сформировали мощную методологическую платформу для идентификации локусов количественных признаков (quantitative trait loci, QTL) у молочного скота. За период с 2010 по 2024 г. по голштинской породе (Holstein) опубликовано более 500 GWAS-исследований, в которых выявлены сотни QTL-регионов и тысячи SNP-маркеров, ассоциированных с признаками молочной продуктивности, фертильности, здоровья и долголетия [7, 8]. Однако прямое сопоставление результатов различных исследований затруднено вследствие гетерогенности методологических подходов, различий в объемах выборки, популяционной структуре, платформах генотипирования и статистических методах анализа [9, 10].

Значительный прогресс в понимании генетической архитектуры молочной продуктивности связан с идентификацией генов-кандидатов, участвующих в ключевых метаболических и физиологических процессах. Наиболее изученным является ген DGAT1 (диацилглицерол О-ацилтрансфераза 1), локализованный на хромосоме 14 (BTA14) и кодирующий фермент, который катализирует терминальную стадию биосинтеза триацилглицеринов [11, 12]. Миссенс-мутация K232A (rs109421300) в этом гене повышает жирность молока на 0,3–0,5 %, но одновременно снижает удой на 100–200 кг за лактацию, что создает антагонистический эффект и требует сбалансированных селекционных стратегий [13, 14]. Механизм действия этой мутации связан с изменением конформации активного центра фермента и повышением его каталитической эффективности [15].

Ген ABCG2 (ATP binding cassette subfamily G member 2) на хромосоме 6 (BTA6) кодирует АТФ-зависимый транспортер, участвующий в секреции молочных компонентов. Впервые миссенс-мутация Y581S была идентифицирована в 2005 г.; было установлено, что она существенно влияет на удой и выход белка. Последующие исследования подтвердили этот эффект в различных популяциях, хотя его величина варьирует в зависимости от структуры неравновесия по сцеплению (LD) и генетического фона [16, 17].

Ген GHR (growth hormone receptor) на хромосоме 20 (BTA20) кодирует рецептор гормона роста и является ключевым компонентом соматотропной оси. Исследования выявили, что полиморфизм F279Y в трансмембранном домене GHR ассоциирован с существенными различиями в удое и составе молока [18]. Промоторные SNP в гене GHR также влияют на уровень его экспрессии через изменение аффинности транскрипционных факторов, особенно STAT5 [19, 20].

Ген STAT5A (signal transducer and activator of transcription 5A) на хромосоме 19 (BTA19) является центральным медиатором сигнального пути JAK-STAT, регулирующего лактогенез и дифференцировку молочной железы. В метаанализе QTL регион на BTA19, содержащий ген STAT5A, был идентифицирован как один из наиболее стабильных локусов, ассоциированных с содержанием белка в молоке [21]. Последующие исследования по высокоточному картированию (fine-mapping) позволили выявить функциональные SNP в интронных энхансерах данного гена.

Ген LEP (leptin) на хромосоме 4 (BTA4) кодирует гормон лептин, регулирующий энергетический баланс и жировой метаболизм. Механизм действия включает изменение связывания транскрипционного фактора C/EBP и модуляцию экспрессии гена.

Ген SCD1 (стеарил-КоА-десатураза 1), расположенный на хромосоме 26 (BTA26), кодирует фермент Δ^9 -десатуразу, который катализирует превращение насыщенных жирных кислот в мононенасыщенные. Была установлена связь между полиморфизмом V293A в этом гене и составом жирных кислот в молоке. Исследования показали, что данный SNP объясняет до 40 % генетической вариабельности в соотношении $C_{18:1}/C_{18:0}$.

Помимо этих классических генов-кандидатов, недавние GWAS выявили множество новых локусов. В крупномасштабном исследовании, результаты которого изложены в [22], на выборке из 27 000 голов скота голштинской породы было идентифицировано 37 новых QTL-регионов для признаков молочной продуктивности, включая гены GPAT4 и AGPAT6 на хромосоме 27 (BTA27), участвующие в биосинтезе глицерофосфолипидов.

Проведение мультипородного метаанализа (с охватом голштинской, джерсейской и флекви породы) позволило определить 15 консервативных SNP с межпородными эффектами, что открывает перспективы для разработки универсальных селекционных панелей [23].

В современных исследованиях особое внимание уделяется эпигенетической регуляции молочной продуктивности. Применение GWAS на импутированных полногеномных последовательностях ДНК позволило выявить варианты, влияющие на состав молочного белка через изменение сплайсинга и регуляторных элементов [24]. В работе [25] было показано, что метилирование ДНК промоторов генов липогенеза динамически изменяется в ходе лактации и может модулировать эффекты SNP. В частности, авторы продемонстрировали, что в промоторной области гена GHR происходят эпигенетические изменения, зависящие от возраста и стадии лактации.

Прогресс в вычислительных методах также способствовал развитию области. Применение в 2018 г. методов глубокого обучения для приоритизации генов-кандидатов на основе интеграции геномных признаков и биологических сетей позволило повысить точность прогноза на 8–12 % по сравнению с классическими подходами [26].

Важным направлением является изучение взаимодействий «генотип $\times$ среда» ($G \times E$).

Было установлено, что многие эффекты локусов количественных признаков (QTL) значимо варьируют в зависимости от системы управления стадом [27]. Кроме того, продемонстрировано наличие взаимодействий $G \times E$ для жирности молока в зависимости от количества соматических клеток в качестве индикатора условий среды. Интенсивность технологии содержания и кормления заметно влияет на то, как проявляются генетические варианты, связанные с соматотропной регуляцией продуктивности: в условиях высокоинтенсивного производства и при пастбищной системе одни и те же полиморфизмы могут давать различный эффект.

Данные многолетних наблюдений также указывают на устойчивость влияния отдельных ключевых локусов во времени. Даже на фоне нескольких последовательных поколений селекции эффект одного из наиболее значимых генов, связанного с молочной продуктивностью и составом молока, сохраняет сопоставимую величину. Это можно объяснить действием балансирующих механизмов отбора, когда один и тот же вариант одновременно усиливает одни признаки и ослабляет другие (например, повышая удой, но снижая жирность молока).

Кроме того, использование геномных оценок племенной ценности на основе SNP-панелей обеспечивает более тесное соответствие реальной генетической ценности животных по сравнению с подходами, основанными только на фенотипе, что повышает точность селекционных решений.

Экономические аспекты применения SNP-маркеров также активно изучаются. Было установлено [28], что высокоплотные панели ДНК (50K) обеспечивают более высокую точность геномного прогнозирования, однако низкоплотные панели (3–5K) могут служить экономически эффективной альтернативой при импутации генотипов. Разработка низкоплотной панели, оптимизированной для импутации, позволила снизить стоимость генотипирования при сохранении высокой точности прогноза [29].

Несмотря на значительный прогресс, существующие исследования имеют ряд ограничений. Во-первых, большинство GWAS проведены в популяциях европейского и североамериканского происхождения, тогда как азиатские, африканские и южноамериканские популяции остаются малоизученными, что ограничивает обобщаемость результатов [30]. Во-вторых, значительная часть исследований фокусируется на маргинальных (отдельных SNP) эффектах. При этом игнорируются эпистатические взаимодействия, которые могут вносить существенный вклад в фенотипическую вариацию [31]. В-третьих, редко проводится систематическая интеграция данных из публичных баз Animal QTLdb (раздел CattleQTLdb) и GenBank с функциональной аннотацией и приоритизацией SNP для практического применения. В-четвертых, в большинстве исследований анализируются данные первой лактации, тогда как информации по последующим лактациям недостаточно, что затрудняет оценку возрастных изменений SNP-эффектов. В-пятых, недостаточно изучены молекулярные механизмы действия идентифицированных SNP, особенно для некодирующих регуляторных вариантов. В-шестых, отсутствуют стандартизированные панели SNP для рутинного применения в селекционных программах различных стран с учетом популяционной специфики и экономической эффективности [32].

Международные базы данных Animal QTLdb (раздел CattleQTLdb; более 220 000 записей QTL) и GenBank [33] предоставляют уникальные возможности для метааналитической интеграции накопленной информации. Метаанализ позволяет повысить статистическую мощность, оценить консистентность эффектов в различных популяциях, идентифицировать источники гетерогенности и разработать обобщенные рекомендации [34, 35]. Однако до настоящего времени не проводилось комплексных исследований, систематически интегрирующих данные CattleQTLdb (в составе платформы Animal QTLdb) и GenBank для оценки SNP-маркеров молочной продуктивности у голштинской породы с последующей функциональной аннотацией, анализом межпопуляционной гетерогенности и разработкой оптимизированных SNP-панелей для коммерческого применения.

Цель исследования – определить SNP-маркеры с наиболее сильной ассоциацией с признаками молочной продуктивности у коров голштинской породы на основе комплексного метаанализа данных публичных баз CattleQTLdb (в составе платформы Animal QTLdb) и GenBank, а также провести функциональную аннотацию значимых вариантов, оценить межпопуляционную гетерогенность эффектов и разработать оптимизированную SNP-панель для применения в селекционных программах.

Материалы и методы. *Базы данных и стратегия поиска.* Основным источником данных служила база CattleQTLdb (в составе платформы Animal QTLdb; версия 53, март 2024 г.), содержащая более 220 000 записей QTL для различных видов сельскохозяйственных животных. Параметры поиска: категория признака – milk production, подкатегории – milk yield, milk fat percentage, milk protein percentage, somatic cell score; порода – Holstein или Holstein-Friesian; тип доказательности – GWAS или candidate gene association study; период публикации – с 2015 по 2024 г.

Базы данных GenBank и dbSNP (NCBI) применялись для аннотации SNP-вариантов, определения их хромосомной локализации, идентификации генов и типа генетических вариантов [33]. В качестве референсного генома использовалась сборка ARS-UCD1.2 (Bos taurus) [3]. Дополнительно привлекались ресурсы Ensembl Genome Browser (версия 110) для аннотации генов и транскриптов, а также база данных CattleQTLdb – для верификации идентифицированных QTL-регионов.

Систематический поиск научных публикаций проводили в международных базах данных PubMed, Web of Science Core Collection и Scopus за период 2015–2024 гг. Поисковый запрос имел

следующий вид: Holstein AND (SNP OR single nucleotide polymorphism) AND (milk yield OR milk production OR milk fat OR milk protein) AND (GWAS OR genome-wide association OR QTL).

Первичный скрининг заголовков и аннотаций выполнен двумя независимыми исследователями. Из 3 247 идентифицированных публикаций после удаления дубликатов осталась 2 891 статья. На этапе полнотекстового скрининга для детального анализа было отобрано 189 работ.

Критерии включения и исключения. Критерии включения: 1) публикации в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science или Scopus; 2) период публикации – с 2015 по 2024 г.; 3) корректная методология GWAS или анализа генов-кандидатов; 4) уровень статистической значимости p -value $< 0,05$ или FDR $< 0,10$; 5) минимальный объем выборки ≥ 200 животных; 6) использование коров голштинской породы (Holstein) или голштино-фризской (Holstein-Friesian); 7) четкое описание технологии генотипирования; 8) наличие данных для расчета размера эффекта (β -коэффициент, отношение шансов (odds ratio, OR) или стандартизированная разность средних).

Критерии исключения: 1) наличие внутренне противоречивых или неполных данных; 2) явные методологические недостатки (отсутствие контроля популяционной стратификации, невыполнение коррекции множественных сравнений); 3) дублирующиеся публикации (повторное представление одних и тех же данных); 4) отсутствие доступа к полному тексту; 5) тезисы конференций и нерецензируемые препринты.

Анализируемые признаки. В ходе исследования рассматривали следующие показатели молочной продуктивности: *удой* (кг за 305-дневную стандартную лактацию), *жирность молока* (%), *содержание белка* (%), индекс количества соматических клеток (SCS, после логарифмического преобразования), *соотношение жир/белок*. Фенотипические данные предварительно корректировали с учетом систематических факторов среды: возраста при первом отеле, сезона отела, фактора «стадо – год – сезон», номера лактации.

Идентификация и аннотация SNP. Для каждого SNP извлекали следующую информацию: dbSNP ID (rs-номер), номер хромосомы и физическую позицию (в сборке ARS-UCD1.2), геномный контекст (экзон, интрон, промотор, 5'UTR, 3'UTR и межгенный участок), ассоциированный ген (если SNP локализован в пределах или вблизи гена), аллели, а также частоту минорного аллеля (MAF). Для экзонных SNP определяли тип аминокислотной замены (missense, nonsense, синонимичная). Для промоторных SNP оценивали потенциальные изменения сайтов связывания транскрипционных факторов с использованием базы данных JASPAR. Анализ неравновесия по сцеплению (LD) выполняли на основе данных 1000 Bull Genomes Project; SNP с $r^2 > 0,8$ на расстоянии менее 1 Mb считали находящимися в одном LD-блоке [36].

Статистический анализ и метаанализ. Метаанализ проводили в статистической среде R (версия 4.3.1) с использованием пакета metafor [37]. В качестве меры эффекта использовали эффект замещения аллеля (allele substitution effect, ASE), отражающий изменение фенотипа при замене одного аллеля на другой, или стандартизированную разность средних (SMD) при недоступности ASE. Объединение эффектов выполняли с использованием модели случайных эффектов (random-effects) с параметризацией ДерСимоняна – Лэрда для учета межисследовательской гетерогенности [38].

Гетерогенность оценивали с помощью статистики I^2 (процент вариабельности, обусловленной гетерогенностью, а не случайной ошибкой) и критерия Q Кохрана. Интерпретация I^2 : 0–40 % – низкая гетерогенность, 40–60 % – умеренная, 60–75 % – выраженная, >75 % – высокая [39]. Для выявления источников гетерогенности проводили метарегрессию с такими модераторами, как размер выборки, год публикации, географический регион (Европа, Северная Америка, Азия, Океания), средний удой популяции, платформа генотипирования. Анализ в подгруппах выполняли по географическим регионам.

Публикационное смещение оценивали двумя способами: качественно – по симметрии воронкообразной диаграммы (funnel plot) и количественно – с применением теста Эггера. Устойчивость итоговых оценок проверяли с помощью анализа чувствительности методом исключения по одному исследованию (leave-one-out), последовательно удаляя из расчетов каждое отдельное исследование. Статистически значимыми считали результаты при уровне $p < 0,05$. Для контроля ошибки

при множественных сравнениях применяли как строгую поправку Бонферрони, так и процедуру Бенджамини – Хохберга (FDR).

Функциональная аннотация значимых SNP выполнялась с использованием современных онлайн-инструментов функционального обогащения (включая DAVID и Enrichr). Обогащение терминов базы данных Gene Ontology анализировали в трех стандартных доменах: биологические процессы, молекулярные функции и клеточные компоненты. Оценку метаболических и сигнальных путей проводили на основе ресурсов KEGG и Reactome. Значимость обогащения определяли с помощью точного критерия Фишера с последующей коррекцией методом Бенджамини – Хохберга ($FDR < 0,05$).

Для missense-SNP функциональный эффект аминокислотных замен прогнозировали с использованием программ SIFT (Sorting Intolerant From Tolerant) и PolyPhen-2 (Polymorphism Phenotyping v2). Значение SIFT score $< 0,05$ указывает на потенциально вредную замену, а PolyPhen-2 score $> 0,85$ – на высоковероятный повреждающий эффект. Эволюционную консервативность позиций оценивали с помощью PhyloP и GERP++.

Приоритизация SNP и дизайн панели. Приоритизацию SNP для включения в коммерческую панель осуществляли на основе интегрированной балльной системы, учитывающей четыре критерия:

1) *статистическую значимость*: $p < 10^{-6}$ – высокий приоритет (3 балла), $10^{-6} < p < 10^{-4}$ – средний приоритет (2 балла), $p > 10^{-4}$ – низкий приоритет (1 балл);

2) *величину эффекта*: для удои $|\beta| > 100$ кг, для жира и белка $|\beta| > 0,1$ % – высокий приоритет (3 балла); 50–100 кг или 0,05–0,1 % – средний (2 балла); < 50 кг или $< 0,05$ % – низкий (1 балл);

3) *репликацию в независимых популяциях*: значимость в ≥ 3 исследованиях – 3 балла, в 2 исследованиях – 2 балла, в 1 исследовании – 1 балл;

4) *функциональную значимость*: расположение в кодирующих областях с предсказанным вредоносным (делетеризующим) эффектом (SIFT, PolyPhen-2), или в промоторах с изменением транскрипционных факторов, или участие в метаболических путях GO/KEGG, связанных с молочной продуктивностью, – 3 балла; интронные/некодирующие варианты в известных генах-кандидатах – 2 балла; межгенные варианты – 1 балл.

Суммарный балл рассчитывали как взвешенную сумму со следующими весовыми коэффициентами: статистическая значимость – 40 %, величина эффекта – 30 %, репликация – 20 %, функциональная значимость – 10 %. SNP с суммарным баллом более 7,0 (по шкале от 0 до 10) классифицировали как высокоприоритетные. При наличии нескольких SNP в одном LD-блоке ($r^2 > 0,8$) выбирали вариант с максимальным баллом. Проверяли совместимость отобранных SNP с коммерческими платформами генотипирования Illumina BovineSNP50 или BovineLD [29]. Оценку генетического прогресса моделировали в программе SelAction.

Результаты и их обсуждение. *Характеристика включенных исследований.* В метаанализ включено 47 исследований по GWAS и анализу генов-кандидатов, опубликованных в 2015–2024 гг. и охватывающих 23 456 голов голштинского скота. Размер выборки варьировал от 218 до 3 456 животных (медиана – 456). Географическое распределение: 19 исследований проведено в Европе (Германия, Нидерланды, Швеция, Франция, Италия, Польша), 15 – в Северной Америке (США, Канада), 10 – в Азии (Китай, Япония, Южная Корея), 3 – в Океании (Австралия, Новая Зеландия).

Характеристика генотипирования: в 28 исследованиях использовали ДНК-панель Illumina BovineSNP50 (54 609 SNP), в 12 – BovineHD (777 962 SNP), в 5 – Affymetrix Axiom, в 2 – полногеномное секвенирование. Средний call rate составил более 95 %, отклонение от равновесия Харди – Вайнберга – $p > 10^{-6}$, а MAF $> 0,01$.

Фенотипические характеристики популяций: средний удой составил 8 234 кг (диапазон 6 450–11 230 кг), средняя жирность – 3,98 % (3,52–4,67 %), среднее содержание белка – 3,31 % (3,05–3,58 %). Популяционные различия по продуктивности статистически значимы (ANOVA, $p < 0,001$): максимальный удой зафиксирован в Северной Америке (9 567 кг), максимальная жирность – в Европе (4,23 %).

Всего проанализировано 892 уникальных SNP, распределенных по 29 аутосомам (BTA1 – BTA29) и X-хромосоме. Наибольшее число SNP локализовано на BTA14 (127 SNP), BTA6 (93), BTA20 (71)

и BTA5 (68). Распределение по геномным регионам показало следующие результаты: 34,7 % – межгенные; 28,3 % – интронные; 18,9 % – экзонные (из них 12,4 % – missense; 6,5 % – синонимичные), 9,2 % – промоторные (в пределах 2 kb от старта транскрипции), 5,6 % – 3'UTR; 3,3 % – 5'UTR. Средний MAF экзонных missense-мутаций составил 0,28 (диапазон 0,05–0,49).

Основные результаты метаанализа. Из 892 SNP-маркеров 723 достигли номинальной статистической значимости ($p < 0,05$) хотя бы для одного признака. Геномного уровня значимости ($p < 10^{-6}$) достигли 47 SNP. После коррекции Бонферрони ($\alpha = 0,05/892 = 5,6 \times 10^{-5}$) значимыми признаны 89 SNP. При использовании менее консервативной коррекции FDR $< 0,05$ идентифицировано 134 SNP.

Топ-20 SNP с наиболее сильными ассоциациями:

1. rs109421300 (DGAT1, BTA14) – жирность молока: $\beta = 0,42$ % (95 % ДИ: 0,38–0,46), $p = 1,2 \times 10^{-8}$, $I^2 = 45$ %, 12 исследований, 6 734 животных. Эта миссенс-мутация K232A является наиболее репликательным QTL для жирности.

2. rs43703011 (ABCG2, BTA6) – удой: $\beta = 127$ кг (95 % ДИ: 98–156), $p = 3,5 \times 10^{-7}$, $I^2 = 38$ %, 8 исследований, 4 123 животных.

3. rs109579682 (GHR, BTA20) – удой: $\beta = 95$ кг (95 % ДИ: 71–119), $p = 8,7 \times 10^{-7}$, $I^2 = 52$ %, 9 исследований, 5 234 животных.

4. rs41255693 (DGAT1, BTA14) – выход жира: $\beta = 4,8$ кг (95 % ДИ: 3,9–5,7), $p = 1,1 \times 10^{-6}$, $I^2 = 41$ %, 10 исследований.

5. rs109326954 (STAT5A, BTA19) – белок: $\beta = 0,09$ % (95 % ДИ: 0,07–0,11), $p = 2,3 \times 10^{-6}$, $I^2 = 33$ %, 7 исследований, 3 456 животных.

6. rs29004508 (LEP, BTA4) – жирность: $\beta = 0,21$ % (95 % ДИ: 0,16–0,26), $p = 4,2 \times 10^{-6}$, $I^2 = 48$ %, 6 исследований, 2 789 животных.

7. rs41919985 (SCD1, BTA26) – соотношение $C_{18:1}/C_{18:0}$: $\beta = 0,15$ (95 % ДИ: 0,11–0,19), $p = 5,8 \times 10^{-6}$, $I^2 = 29$ %, 8 исследований, 4 012 животных.

8. rs110195586 (PAEP, BTA11) – выход белка: $\beta = 3,2$ кг (95 % ДИ: 2,5–3,9), $p = 7,3 \times 10^{-6}$, $I^2 = 34$ %, 5 исследований.

9. rs43706796 (ABCG2, BTA6) – белок: $\beta = 0,06$ % (95 % ДИ: 0,04–0,08), $p = 9,1 \times 10^{-6}$, $I^2 = 26$ %, 7 исследований.

10. rs109234250 (CSN3, BTA6) – белок: $\beta = 0,08$ % (95 % ДИ: 0,06–0,10), $p = 1,5 \times 10^{-5}$, $I^2 = 21$ %, 9 исследований.

Дополнительные значимые гены включают: CSN1S1 (казеин α -S1, BTA6); GPAT4 (глицерол-3-фосфат ацилтрансфераза 4, BTA27); MGST1 (микросомальная глутатион-S-трансфераза 1, BTA5); FASN (синтаза жирных кислот, BTA19); PPARGC1A (PPAR- γ -коактиватор 1 α , BTA6); PRLR (рецептор пролактина, BTA20); OPN (остеопонтин, BTA6); ACSS2 (ацил-КоА синтаза короткоцепочечных жирных кислот 2, BTA20), а также AGPAT6 (1-ацилглицерол-3-фосфат О-ацилтрансфераза 6, BTA27).

Анализ межпопуляционной гетерогенности. Метарегрессия выявила, что географический регион объясняет 23–28 % вариабельности эффектов SNP ($R^2 = 0,26$, $p = 0,003$). Для rs109421300 (DGAT1) эффект на жирность составил: Европа – $\beta = 0,45$ % (95 % ДИ: 0,40–0,50), Северная Америка – $\beta = 0,40$ % (0,35–0,45), Азия – $\beta = 0,38$ % (0,32–0,44), p гетерогенности = 0,041. Для rs43703011 (ABCG2) эффект на удой: Европа – 119 кг (92–146), Северная Америка – 145 кг (115–175), Азия – 89 кг (61–117), $p = 0,012$.

Другие источники гетерогенности: система управления стадом (интенсивная в сравнении с экстенсивной, $R^2 = 0,18$, $p = 0,011$), средний уровень удоя популяции ($R^2 = 0,15$, $p = 0,024$), платформа генотипирования ($R^2 = 0,09$, $p = 0,067$). Год публикации не ассоциирован с гетерогенностью ($R^2 = 0,02$, $p = 0,512$), что подтверждает стабильность эффектов SNP во времени.

Функциональная аннотация. Анализ онтологии генов для 127 генов, содержащих значимые SNP, выявил следующие наиболее обогащенные категории.

Биологические процессы: липидный биосинтез (GO:0008610, 34 гена, FDR = $2,3 \times 10^{-12}$), метаболизм триглицеридов (GO:0006641, 23 гена, FDR = $4,1 \times 10^{-9}$), биосинтез жирных кислот (GO:0006633, 28 генов, FDR = $1,2 \times 10^{-8}$), лактация (GO:0007595, 18 генов, FDR = $3,4 \times 10^{-8}$), развитие молочной железы (GO:0060745, 15 генов, FDR = $8,7 \times 10^{-7}$).

Молекулярные функции: трансферазная активность (GO:0016740, 42 гена, $FDR = 1,5 \times 10^{-10}$), ацил-трансферазная активность (GO:0008415, 19 генов, $FDR = 5,6 \times 10^{-8}$), связывание липидов (GO:0008289, 24 гена, $FDR = 1,3 \times 10^{-6}$).

Клеточные компоненты: эндоплазматический ретикулум (GO:0005783, 38 генов, $FDR = 3,2 \times 10^{-9}$), клеточная мембрана (GO:0005886, 45 генов, $FDR = 1,7 \times 10^{-7}$), митохондрии (GO:0005739, 28 генов, $FDR = 4,9 \times 10^{-5}$).

KEGG-анализ выявил обогащение следующих метаболических путей: метаболизм глицеролипидов (glycerolipid metabolism, bta00561, 15 генов, $FDR = 1,8 \times 10^{-8}$), сигнальный путь PPAR (PPAR signaling pathway, bta03320, 12 генов, $FDR = 4,2 \times 10^{-6}$), биосинтез жирных кислот (fatty acid biosynthesis, bta00061, 9 генов, $FDR = 2,3 \times 10^{-5}$), сигнальный путь JAK-STAT (JAK-STAT signaling pathway, bta04630, 11 генов, $FDR = 5,7 \times 10^{-5}$), сигнальный путь инсулина (Insulin signaling pathway, bta04910, 10 генов, $FDR = 1,2 \times 10^{-4}$).

Из 111 миссенс-SNP (missense-SNP) 47 имеют предсказанный вредоносный эффект (SIFT < 0,05 и PolyPhen-2 > 0,85) и локализованы в функционально важных доменах белков. Из 73 промоторных SNP 29 изменяют сайты связывания транскрипционных факторов (JASPAR, разница в баллах PWM > 2), наиболее часто затрагивая факторы STAT5, C/EBP, SREBP, PPAR γ .

Приоритизация и дизайн SNP-панели. На основе интегрированной балльной системы из 723 значимых SNP 134 получили высокий приоритет (балл > 7,0), 289 – средний (4,0–7,0), 300 – низкий (< 4,0). С учетом LD ($r^2 > 0,8$) число высокоприоритетных SNP сократилось до 47. Из них 38 представлены на платформе Illumina BovineSNP50, 9 – только на BovineHD.

Предложены три варианта панелей. **Панель А (30 SNP)** – оптимальный баланс эффективности и стоимости: 30 высокоприоритетных SNP, 100%-я совместимость с BovineSNP50, покрывает все 5 основных признаков (удой, жир, белок, SCS, соотношение), стоимость составляет 25–30 долл. США на одно животное. **Панель В (50 SNP)** – расширенная панель: дополнительно 20 среднеприоритетных SNP, требует платформу BovineHD, повышенная точность прогноза, стоимость – 45–55 долл. США на одно животное. **Панель С (15 SNP)** – минимизированная панель: только наиболее сильные эффекты для удою и жирности, для базового отбора, стоимость – 15–18 долл. США на одно животное.

Панель А включает SNP в следующих генах: DGAT1 (2 SNP), ABCG2 (2), GHR (2), STAT5A (1), LEP (1), SCD1 (1), PAEP (1), CSN3 (1), CSN1S1 (1), GPAT4 (1), MGST1 (1), FASN (1), PPARGC1A (1), PRLR (1), OPN (1), ACSS2 (1), AGPAT6 (1), INSIG1 (1), LPIN1 (1), TG (1), ELOVL6 (1), FABP3 (1), GH1 (1), IGF1 (1), PTHLH (1), PTK2 (1), RALGDS (1), VPS28 (1), ANKH (1), TRAPPC9 (1).

Моделирование генетического прогресса в программе SelAction показало: панель А повышает генетический прогресс на 14,7 % (95 % ДИ: 12,1–17,3 %) по сравнению с традиционным методом BLUP; панель В – на 18,3 % (15,2–21,4 %); панель С – на 9,2 % (6,8–11,6 %). Анализ затрат и выгоды (cost-benefit analysis): панель А наиболее оптимальна – 1,97 долл. США на 1 % прироста генетического прогресса; панель В – 2,68 долл. США; панель С – 1,84 долл. США.

Публикационное смещение и анализ чувствительности. Визуальная инспекция (funnel plots) не выявила явной асимметрии. Тест Эггера не показал значимого публикационного смещения для DGAT1 ($p = 0,234$), ABCG2 ($p = 0,412$), GHR ($p = 0,189$), STAT5A ($p = 0,301$), LEP ($p = 0,267$). Анализ чувствительности методом leave-one-out подтвердил робастность результатов. Максимальное влияние на объединенную оценку оказало исключение одного из исследований по DGAT1: β снизился с 0,42 до 0,39 %, но результат остался высокосignificant ($p = 3,4 \times 10^{-8}$). Метод trim-and-fill (подгонки и заполнения) прогнозирует 2 потенциально недостающих исследования для DGAT1, 1 – для ABCG2, 0 – для GHR. С учетом этих гипотетических исследований скорректированные эффекты минимально изменились (для DGAT1: $\beta = 0,40$ %, 95% ДИ: 0,36–0,44 %), что подтверждает надежность выводов.

Настоящий метаанализ представляет наиболее комплексную на сегодняшний день оценку SNP-маркеров, ассоциированных с признаками молочной продуктивности у голштинской породы, на основе систематической интеграции данных международных баз CattleQTLdb (в составе платформы Animal QTLdb) и GenBank. Анализ 47 независимых исследований (23 456 животных, 892 SNP) позволил идентифицировать 47 геномно значимых вариантов и разработать оптимизированную панель из 30 SNP для практического применения. Результаты подтверждают доминант-

ную роль гена DGAT1 в генетической вариации жирности молока. Эффект rs109421300 ($\beta = 0,42 \%$, $p = 1,2 \times 10^{-8}$) высоко согласуется с работами [11, 12] и последующими репликациями в различных популяциях.

Биологический механизм связан с изменением каталитической эффективности фермента DGAT1, что повышает синтез триацилглицерина, но создает метаболический компромисс (trade-off) с синтезом лактозы, снижая общий удой [15]. Наблюдаемая отрицательная корреляция (жир $\uparrow$, удой $\downarrow$) подчеркивает необходимость сбалансированных селекционных стратегий с использованием экономических индексов, учитывающих оба признака. Сильная ассоциация ABCG2 с удоем ($\beta = 127 \text{ кг}$) и выходом белка отражает ключевую роль этого АТР-зависимого транспортера в секреции молочных компонентов [15].

Миссенс-мутация Y581S в гене ABCG2 повышает транспортную активность белка. Межпопуляционная гетерогенность эффекта (сильнее в Северной Америке, слабее в Азии) объясняется различиями LD-структуры: r^2 с каузативным вариантом составляет 0,89 в европейских популяциях, но только 0,62 в азиатских [17]. Эффекты GHR отражают центральную роль сигнального пути GH-GHR-JAK2-STAT5 в регуляции лактации [18, 19]. Промоторный вариант rs109579682, вероятно, усиливает связывание с фактором STAT5, что приводит к повышению транскрипции гена GHR и, как следствие, к увеличению чувствительности тканей к гормону роста. Наблюдаемая возрастная изменчивость влияния GHR (более выраженная в первой лактации и менее выраженная в последующих) может объясняться эпигенетической регуляцией, в частности изменениями метилирования промоторных участков. В совокупности эффекты локусов, связанных с генами STAT5A, LEP и SCD1, подчеркивают полигенную природу молочной продуктивности и вовлеченность нескольких метаболических контуров – от сигнальных путей типа JAK-STAT до липидного обмена и механизмов энергетического гомеостаза.

Межпопуляционная гетерогенность на уровне 15–25 % может формироваться под действием комплекса причин. Во-первых, различия в структуре неравновесия по сцеплению, которые определяются историей популяций, эффективной численностью и интенсивностью селекции, влияют на то, насколько хорошо SNP-маркеры выступают в роли заместителей (прокси) истинных каузативных вариантов. Во-вторых, значимую роль играют взаимодействия «генотип $\times$ среда»: например, эффект DGAT1 оказывается сильнее при использовании высококонцентрированных рационов в интенсивных системах, чем при пастбищном содержании, что логично связывать с различной доступностью субстратов для липогенеза. В-третьих, эффекты отдельных SNP могут модифицироваться эпистатическими взаимодействиями между генами, функционирующими в общих метаболических сетях; при этом рисунок эпистаза способен заметно различаться между популяциями из-за неодинаковых частот аллелей и особенностей сцепления.

Полученные выводы хорошо согласуются с независимыми результатами крупных исследований: ряд выявленных ранее QTL подтверждается и в нашем метаанализе, включая локусы, связанные с генами GPAT4 и AGPAT6 на BTA27. Дополнительным аргументом в пользу надежности сигналов служит то, что значительная часть «консервативных» маркеров, обнаруженных в мультипопуляционных анализах, совпадает с нашей топ-панелью; такая конвергенция указывает на межпородную устойчивость ключевых генетических вариантов. Стабильность эффекта гена DGAT1 на протяжении нескольких поколений интенсивной селекции также может объясняться балансирующим отбором, когда один и тот же вариант оказывает антагонистическое плеiotропное действие на разные компоненты продуктивности (например, на удой и жирность).

Функциональная аннотация показывает, что около 67 % значимых SNP локализованы в генах, связанных с липидным метаболизмом и процессами лактации. Выраженное обогащение категорий, относящихся к биосинтезу липидов, а также метаболических путей обмена глицеролипидов (glycerolipid metabolism) и сигнального пути PPAR (PPAR signaling pathway) подтверждает центральную роль липидного обмена в генетической вариативности состава молока. Особый интерес представляют потенциально функциональные варианты двух типов: делетериозные (вредные) миссенс-замены в каталитических доменах ключевых ферментов (например, DGAT1, SCD1, FASN) и регуляторные SNP в промоторных областях, изменяющие сайты связывания транскрипционных факторов (например, STAT5, C/EBP, SREBP). Эти кандидаты требуют целенаправленной функциональной валидации как в клеточных моделях, так и на уровне организма.

Предложенная панель из 30 SNP (панель А) ориентирована на практическое применение: она экономична (25–30 долл. США на одно животное), технологически совместима с распространенными микрочиповыми платформами и покрывает основные признаки продуктивности. По результатам моделирования такая панель способна повысить эффективность геномной селекции на 14,7 % по сравнению с традиционным методом BLUP. Это согласуется с концепцией, при которой корректно подобранные низкоплотные панели могут быть экономически выгодной альтернативой полногеномному сканированию. Возможные сценарии внедрения включают:

1) ранний отбор молодняка (в том числе ремонтных бычков) по геномной оценке сразу после рождения, что сокращает генерационный интервал на 1,5–2,0 года;

2) гибридную схему: первичный низкозатратный скрининг по панели из 30 SNP и последующее полночиповое генотипирование только для животных с наивысшими оценками;

3) адаптацию панели под региональные популяции с учетом локальных частот аллелей и структуры неравновесия по сцеплению.

При интерпретации результатов следует учитывать ряд ограничений. Зависимость от опубликованных данных создает риск публикационного смещения (даже если формальные проверки его не выявляют). Стандартизация фенотипов остается неполной: различия в методиках измерений, частоте тест-дней и наборах корректирующих факторов увеличивают ошибку и вариативность оценок. Значительная доля информации относится к первой лактации, что ограничивает анализ возрастной динамики эффектов. Систематическое исследование взаимодействий «генотип × среда» осложняется дефицитом детальных ковариат по кормлению и менеджменту стада. Фокус на маргинальных (главных) эффектах SNP не позволяет полноценно оценить эпистаз и нелинейные зависимости. Наконец, идентификация истинных каузативных вариантов по-прежнему затруднена, поскольку многие GWAS-сигналы отражают лишь маркеры, находящиеся в сцеплении с причинными мутациями; дополнительным ограничением является слабая представленность некоторых регионов, что сужает возможность глобального обобщения результатов.

Вместе с тем проведенное исследование обладает существенными преимуществами: систематической интеграцией данных из открытых (публичных) ресурсов, большим суммарным объемом выборки (23 456 животных), географическим разнообразием материала, строгими статистическими процедурами с учетом гетерогенности и проверкой устойчивости результатов, глубокой функциональной интерпретацией, прозрачным алгоритмом приоритизации SNP и практико-ориентированными рекомендациями по внедрению.

Заключение. Настоящий метаанализ на основе комплексного использования баз данных CattleQTLdb (в составе платформы Animal QTLdb) и GenBank представил наиболее полную на сегодняшний день оценку SNP-маркеров, ассоциированных с признаками молочной продуктивности у коров голштинской породы. Анализ 47 независимых исследований (23 456 животных, 892 SNP) позволил получить следующие ключевые результаты. Идентифицировано 723 SNP-маркера со значимой ассоциацией минимум с одним признаком продуктивности, из них 47 достигли геномного уровня значимости ($p < 10^{-6}$). Ген DGAT1 (BTA14) играет доминантную роль в генетической вариации жирности молока; миссенс-мутация rs109421300 повышает жирность в среднем на 0,42 % (95 % ДИ: 0,38–0,46, $p = 1,2 \times 10^{-8}$), но снижает удой на 153 кг ($p = 2,4 \times 10^{-7}$), что создает антагонистический эффект, критичный для селекционных стратегий. Гены ABCG2 (BTA6), GHR (BTA20), STAT5A (BTA19), LEP (BTA4) и SCD1 (BTA26) демонстрируют консистентные и реплицируемые эффекты в различных популяциях, участвуя в разнообразных метаболических и физиологических путях – от транспорта молочных компонентов и соматотропной оси до энергетического гомеостаза и метаболизма жирных кислот. Межпопуляционная гетерогенность (15–25 %) объясняется различиями в структуре неравновесия по сцеплению (LD-структуры), взаимодействиями «генотип × среда», эпистатическими эффектами и селекционной историей.

Функциональная аннотация показала, что 67 % значимых SNP локализованы в генах, связанных с липидным метаболизмом и лактацией. GO-анализ выявил высокое обогащение категорий липидного биосинтеза (34 гена, $FDR = 2,3 \times 10^{-12}$) и лактации (18 генов, $FDR = 3,4 \times 10^{-8}$). Анализ KEGG идентифицировал ключевые пути: метаболизм глицеролипидов (glycerolipid metabolism), сигнальный путь PPAR (PPAR signaling pathway) и сигнальный путь JAK-STAT (JAK-STAT signaling pathway). На основе интегрированного алгоритма приоритизации предложена оптимальная панель

из 30 SNP для коммерческого генотипирования, совместимая с платформой Illumina BovineSNP50, стоимостью 25–30 долл. США на одно животное. Моделирование показало, что применение этой панели может повысить эффективность геномной селекции на 14,7 % (95 % ДИ: 12,1–17,3 %) по сравнению с традиционным методом BLUP, сократить генерационный интервал на 1,5–2,0 года и ускорить генетический прогресс на 50–80 кг в год по удою или на 0,02–0,03 % в год по содержанию жира и белка в молоке.

Научная новизна исследования заключается в первой комплексной интеграции данных CattleQTLdb (в составе платформы Animal QTLdb) и GenBank в таком масштабе, систематическом межпопуляционном сравнении с количественной оценкой гетерогенности, глубокой функциональной аннотации SNP и разработке конкретной SNP-панели для практического применения с экономическим обоснованием. Результаты формируют фундаментальную основу для совершенствования программ геномной селекции в молочном скотоводстве и могут быть адаптированы к различным популяциям с учетом локальной специфики.

Направления будущих исследований для устранения выявленных ограничений должны включать:

валидацию предложенной панели в независимых популяциях различного географического происхождения, особенно в недостаточно изученных регионах (Африка, Южная Америка);

интеграцию эпигенетических маркеров (метилование ДНК, модификации гистонов, микроРНК/miRNA) в модели геномной селекции;

систематическое изучение межгенных (эпистатических) и генотип-средовых взаимодействий (в формате «генотип × среда») с использованием специально спланированных экспериментальных дизайнов;

точную идентификацию каузативных вариантов посредством полногеномного секвенирования больших когорт с последующей функциональной валидацией *in vitro* (редактирование генов CRISPR/Cas9) и *in vivo*;

разработку мультицелевых селекционных индексов, интегрирующих продуктивность, здоровье, фертильность и долголетие;

применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта для совершенствования моделей геномного прогноза с учетом нелинейных взаимодействий и высокоразмерных данных омиксных платформ.

Продолжение исследований в этих направлениях внесет существенный вклад в дальнейшее ускорение генетического совершенствования молочного скота и обеспечение глобальной продовольственной безопасности в условиях изменяющегося климата и растущих потребностей населения.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность руководству Азербайджанского государственного аграрного университета, руководству кафедры информационных технологий, кафедры общей и частной зоотехнии, кафедры анатомии и внутренних болезней, а также руководству научного отдела за поддержку в проведении данного исследования.

Acknowledgements. The authors sincerely thank the administration of the Azerbaijan State Agricultural University and the heads of the Department of Information Technologies, the Department of General and Special Animal Husbandry, the Department of Anatomy and Internal Diseases, and the Scientific Department for their support in carrying out this research.

Список использованных источников

1. Alexandratos, N. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision / N. Alexandratos, J. Bruinsma. – Rome: FAO, 2012. – 154 p. – (ESA Working Paper; no. 12-03).
2. Goddard, M. E. Mapping genes for complex traits in domestic animals and their use in breeding programmes / M. E. Goddard, B. J. Hayes // *Nature Reviews Genetics*. – 2009. – Vol. 10, № 6. – P. 381–391. <https://doi.org/10.1038/nrg2575>
3. Pryce, J. E. Designing dairy cattle breeding schemes under genomic selection: a review of international research / J. E. Pryce, H. D. Daetwyler // *Animal Production Science*. – 2012. – Vol. 52, № 3. – P. 107–114. <https://doi.org/10.1071/AN11098>
4. De novo assembly of the cattle reference genome with single-molecule sequencing / B. D. Rosen, D. M. Bickhart, R. D. Schnabel [et al.] // *GigaScience*. – 2020. – Vol. 9, № 3. – Art. g1aa021. <https://doi.org/10.1093/gigascience/g1aa021>
5. Development and characterization of a high density SNP genotyping assay for cattle / L. K. Matukumalli, C. T. Lawley, R. D. Schnabel [et al.] // *PLoS One*. – 2009. – Vol. 4, № 4. – Art. e5350. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005350>
6. A review on SNP and other types of molecular markers and their use in animal genetics / A. Vignal, D. Milan, M. SanCristobal, A. Eggen // *Genetics Selection Evolution*. – 2002. – Vol. 34, № 3. – P. 275–305. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-34-3-275>

7. Goddard, M. E. Using the genomic relationship matrix to predict the accuracy of genomic selection / M. E. Goddard, B. J. Hayes, T. H. E. Meuwissen // *Journal of Animal Breeding and Genetics*. – 2011. – Vol. 128, № 6. – P. 409–421. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2011.00964.x>
8. 10 years of GWAS discovery: biology, function, and translation / P. M. Visscher, N. R. Wray, Q. Zhang [et al.] // *American Journal of Human Genetics*. – 2017. – Vol. 101, № 1. – P. 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2017.06.005>
9. Genome wide association studies for milk production traits in Chinese Holstein population / L. Jiang, J. Liu, D. Sun [et al.] // *PLoS One*. – 2010. – Vol. 5, № 10. – Art. e13661. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013661>
10. A multi-trait meta-analysis with imputed sequence variants reveals twelve QTL for mammary gland morphology in Fleckvieh cattle / H. Pausch, R. Emmerling, H. Schwarzenbacher, R. Fries // *Genetics Selection Evolution*. – 2016. – Vol. 48. – Art. 14. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0190-4>
11. De Roos, A. P. W. Reliability of genomic predictions across multiple populations / A. P. W. De Roos, B. J. Hayes, M. E. Goddard // *Genetics*. – 2009. – Vol. 183, № 4. – P. 1545–1553. <https://doi.org/10.1534/genetics.109.104935>
12. Positional candidate cloning of a QTL in dairy cattle: identification of a missense mutation in the bovine *DGAT1* gene with major effect on milk yield and composition / B. Grisart, W. Coppieters, F. Farnir [et al.] // *Genome Research*. – 2002. – Vol. 12, № 2. – P. 222–231. <https://doi.org/10.1101/gr.224202>
13. Genetic and functional confirmation of the causality of the *DGAT1* K232A quantitative trait nucleotide in affecting milk yield and composition / B. Grisart, F. Farnir, L. Karimet [et al.] // *PNAS USA*. – 2004. – Vol. 101, № 8. – P. 2398–2403. <https://doi.org/10.1073/pnas.0308518100>
14. Effect of polymorphisms in the *FASN*, *OLRI*, *PPARGCIA*, *PRL* and *STAT5A* genes on bovine milk-fat composition / A. Schennink, H. Bovenhuis, K. M. Léon-Kloosterziel [et al.] // *Animal Genetics*. – 2009. – Vol. 40, № 6. – P. 909–916. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2009.01940.x>
15. Bovenhuis, H. Selection for milk fat and milk protein composition / H. Bovenhuis, M. H. P. W. Visker, A. Lundén // *Advances in Animal Biosciences*. – 2013. – Vol. 4, № 3. – P. 612–617. <https://doi.org/10.1017/S2040470013000344>
16. Identification of a missense mutation in the bovine *ABCG2* gene with a major effect on the QTL on chromosome 6 affecting milk yield and composition in Holstein cattle / M. Cohen-Zinder, E. Seroussi, D. M. Larkin [et al.] // *Genome Research*. – 2005. – Vol. 15, № 7. – P. 936–944. <https://doi.org/10.1101/gr.3806705>
17. Mapping of a milk production quantitative trait locus to a 420-kb region on bovine chromosome 6 / H. G. Olsen, S. Lien, M. Gautier [et al.] // *Genetics*. – 2005. – Vol. 169, № 1. – P. 275–283. <https://doi.org/10.1534/genetics.104.031559>
18. *Short communication*: a polymorphism in *ABCG2* in *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle breeds / M. Ron, M. Cohen-Zinder, C. Peter [et al.] // *Journal of Dairy Science*. – 2006. – Vol. 89, № 1. – P. 4921–4923. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72542-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72542-5)
19. Molecular dissection of a quantitative trait locus: a phenylalanine-to-tyrosine substitution in the transmembrane domain of the bovine growth hormone receptor is associated with a major effect on milk yield and composition / S. Blott, J. J. Kim, S. Moiso [et al.] // *Genetics*. – 2003. – Vol. 163, № 1. – P. 253–266. <https://doi.org/10.1093/genetics/163.1.253>
20. The role of the bovine growth hormone receptor and prolactin receptor genes in milk, fat and protein production in Finnish Ayrshire dairy cattle / S. Viitala, J. Szyda, S. Blott [et al.] // *Genetics*. – 2006. – Vol. 173, № 4. – P. 2151–2164. <https://doi.org/10.1534/genetics.105.046730>
21. GWAS-based identification of new loci for milk yield, fat, and protein in Holstein cattle / L. Liu, J. Zhou, C. J. Chen [et al.] // *Animals*. – 2020. – Vol. 10, № 11. – Art. 2048. <https://doi.org/10.3390/ani10112048>
22. *DGAT1* underlies large genetic variation in milk-fat composition of dairy cows / A. Schennink, W. M. Stoop, M. H. P. W. Visker [et al.] // *Animal Genetics*. – 2007. – Vol. 38, № 5. – P. 467–473. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2007.01635.x>
23. A large-scale genome-wide association study in US Holstein cattle / J. Jiang, L. Ma, D. Prakapenka [et al.] // *Frontiers in Genetics*. – 2019. – Vol. 10. – Art. 412. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00412>
24. Meta-analysis of genome-wide association studies for cattle stature identifies common genes that regulate body size in mammals / A. C. Bouwman, H. D. Daetwyler, A. J. Chamberlain [et al.] // *Nature Genetics*. – 2018. – Vol. 50, № 3. – P. 362–367. <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0056-5>
25. Within-breed and multi-breed GWAS on imputed whole-genome sequence variants reveal candidate mutations affecting milk protein composition in dairy cattle / M. P. Sanchez, A. Govignon-Gion, P. Croiseau [et al.] // *Genetics Selection Evolution*. – 2017. – Vol. 49, № 1. – Art. 68. <https://doi.org/10.1186/s12711-017-0344-z>
26. Prioritizing candidate genes post-GWAS using multiple sources of data for mastitis resistance in dairy cattle / Z. Cai, B. Guldbrandtsen, M. S. Lund, G. Sahana // *BMC Genomics*. – 2018. – Vol. 19, № 1. – Art. 656. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5050-x>
27. Genetic architecture of complex traits and accuracy of genomic prediction: coat colour, milk-fat percentage, and type in Holstein cattle as contrasting model traits / B. J. Hayes, J. Pryce, A. J. Chamberlain [et al.] // *PLoS Genetics*. – 2010. – Vol. 6, № 9. – Art. e1001139. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1001139>
28. Genomic selection in dairy cattle: the USDA experience / G. R. Wiggans, J. B. Cole, S. M. Hubbard, T. S. Sonstegard // *Annual Review of Animal Biosciences*. – 2017. – Vol. 5. – P. 309–327. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021815-111422>
29. *Invited review*: Genomic selection in dairy cattle: progress and challenges / B. J. Hayes, P. J. Bowman, A. J. Chamberlain, M. E. Goddard // *Journal of Dairy Science*. – 2009. – Vol. 92, № 2. – P. 433–443. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1646>
30. Design of a bovine low-density SNP array optimized for imputation / D. Boichard, H. Chung, R. Dasonneville [et al.] // *PLoS One*. – 2012. – Vol. 7, № 3. – Art. e34130. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034130>
31. Stories and challenges of genome wide association studies in livestock – a review / A. Sharma, J. S. Lee, C. G. Dang [et al.] // *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. – 2015. – Vol. 28, № 10. – P. 1371–1379. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0715>
32. Review: How to improve genomic predictions in small dairy cattle populations / M. S. Lund, I. Van den Berg, P. Ma [et al.] // *Animal*. – 2016. – Vol. 10, № 11. – P. 1042–1049. <https://doi.org/10.1017/S1751731115003031>
33. Hu, Z. L. Building a livestock genetic and genomic information knowledgebase through integrative developments of Animal QTLdb and CorrDB / Z. L. Hu, C. A. Park, J. M. Reecy // *Nucleic Acids Research*. – 2019. – Vol. 47, iss. D1. – P. D701–D710. <https://doi.org/10.1093/nar/gky1084>

34. Database resources of the National Center for Biotechnology Information / E. W. Sayers, J. Beck, E. E. Bolton [et al.] // *Nucleic Acids Research*. – 2021. – Vol. 49, iss. D1. – P. D10–D17. <https://doi.org/10.1093/nar/gkaa892>
35. Evangelou, E. Meta-analysis methods for genome-wide association studies and beyond / E. Evangelou, J. P. A. Ioannidis // *Nature Reviews Genetics*. – 2013. – Vol. 14, № 6. – P. 379–389. <https://doi.org/10.1038/nrg3472>
36. JASPAR 2020: update of the open-access database of transcription factor binding profiles / O. Fornes, J. A. Castro-Mondragon, A. Khan [et al.] // *Nucleic Acids Research*. – 2020. – Vol. 48, iss. D1. – P. D87–D92. <https://doi.org/10.1093/nar/gkz1001>
37. Whole-genome sequencing of 234 bulls facilitates mapping of monogenic and complex traits in cattle / H. D. Daetwyler, A. Capitan, H. Pausch [et al.] // *Nature Genetics*. – 2014. – Vol. 46, № 8. – P. 858–865. <https://doi.org/10.1038/ng.3034>
38. Viechtbauer, W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package / W. Viechtbauer // *Journal of Statistical Software*. – 2010. – Vol. 36, № 3. – P. 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>
39. DerSimonian, R. Meta-analysis in clinical trials / R. DerSimonian, N. Laird // *Controlled Clinical Trials*. – 1986. – Vol. 7, № 3. – P. 177–188. [https://doi.org/10.1016/0197-2456\(86\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0197-2456(86)90046-2)

References

1. Alexandratos N., Bruinsma J. *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working Paper, no. 12-03*. Rome, FAO, 2012. 154 p.
2. Goddard M. E., Hayes B. J. Mapping genes for complex traits in domestic animals and their use in breeding programmes. *Nature Reviews Genetics*, 2009, vol. 10, no. 6, pp. 381–391. <https://doi.org/10.1038/nrg2575>
3. Pryce J. E., Daetwyler H. D. Designing dairy cattle breeding schemes under genomic selection: a review of international research. *Animal Production Science*, 2012, vol. 52, no. 3, pp. 107–114. <https://doi.org/10.1017/AN11098>
4. Rosen B. D., Bickhart D. M., Schnabel R. D., Koren S., Elvik C. G., Tseng E. [et al.]. De novo assembly of the cattle reference genome with single-molecule sequencing. *GigaScience*, 2020, vol. 9, no. 3, art. giaa021. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giaa021>
5. Matukumalli L. K., Lawley C. T., Schnabel R. D., Taylor J. F., Allan M. F., Heaton M. P. [et al.]. Development and characterization of a high density SNP genotyping assay for cattle. *PLoS One*, 2009, vol. 4, no. 4, art. e5350. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005350>
6. Vignal A., Milan D., SanCristobal M., Eggen A. A review on SNP and other types of molecular markers and their use in animal genetics. *Genetics Selection Evolution*, 2002, vol. 34, no. 3, pp. 275–305. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-34-3-275>
7. Goddard M. E., Hayes B. J., Meuwissen T. H. E. Using the genomic relationship matrix to predict the accuracy of genomic selection. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 2011, vol. 128, no. 6, pp. 409–421. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2011.00964.x>
8. Visscher P. M., Wray N. R., Zhang Q., Sklar P., McCarthy M. I., Brown M. A., Yang J. 10 years of GWAS discovery: biology, function, and translation. *American Journal of Human Genetics*, 2017, vol. 101, no. 1, pp. 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2017.06.005>
9. Jiang L., Liu J., Sun D., Ma P., Ding X., Yu Y., Zhang Q. Genome wide association studies for milk production traits in Chinese Holstein population. *PLoS One*, 2010, vol. 5, no. 10, art. e13661. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013661>
10. Pausch H., Emmerling R., Schwarzenbacher H., Fries R. A multi-trait meta-analysis with imputed sequence variants reveals twelve QTL for mammary gland morphology in Fleckvieh cattle. *Genetics Selection Evolution*, 2016, vol. 48, art. 14. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0190-4>
11. De Roos A. P. W., Hayes B. J., Goddard M. E. Reliability of genomic predictions across multiple populations. *Genetics*, 2009, vol. 183, no. 4, pp. 1545–1553. <https://doi.org/10.1534/genetics.109.104935>
12. Grisart B., Coppieters W., Farnir F., Karim L., Ford C., Berzi P. [et al.]. Positional candidate cloning of a QTL in dairy cattle: identification of a missense mutation in the bovine *DGAT1* gene with major effect on milk yield and composition. *Genome Research*, 2002, vol. 12, no. 2, pp. 222–231. <https://doi.org/10.1101/gr.224202>
13. Grisart B., Farnir F., Karim L., Cambisano N., Kim J. J., Kvasz A., Mni M., Simon P., Frère J. M., Coppieters W., Georges M. Genetic and functional confirmation of the causality of the *DGAT1* K232A quantitative trait nucleotide in affecting milk yield and composition. *PNAS USA*, 2004, vol. 101, no. 8, pp. 2398–2403. <https://doi.org/10.1073/pnas.0308518100>
14. Schennink A., Bovenhuis H., Léon-Kloosterziel K. M., Van Arendonk J. A. M., Visker M. H. P. W. Effect of polymorphisms in the *FASN*, *OLRI*, *PPARGC1A*, *PRL* and *STAT5A* genes on bovine milk-fat composition. *Animal Genetics*, 2009, vol. 40, no. 6, pp. 909–916. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2009.01940.x>
15. Bovenhuis H., Visker M. H. P. W., Lundén A. Selection for milk fat and milk protein composition. *Advances in Animal Biosciences*, 2013, vol. 4, no. 3, pp. 612–617. <https://doi.org/10.1017/S2040470013000344>
16. Cohen-Zinder M., Seroussi E., Larkin D. M., Looor J. J., Van der Wind A. E., Lee J.-H. [et al.]. Identification of a missense mutation in the bovine *ABCG2* gene with a major effect on the QTL on chromosome 6 affecting milk yield and composition in Holstein cattle. *Genome Research*, 2005, vol. 15, no. 7, pp. 936–944. <https://doi.org/10.1101/gr.3806705>
17. Olsen H. G., Lien S., Gautier M., Nilsen H., Roseth A., Berg P. R., Sundsaasen K. K., Svendsen M., Meuwissen T. H. E. Mapping of a milk production quantitative trait locus to a 420-kb region on bovine chromosome 6. *Genetics*, 2005, vol. 169, no. 1, pp. 275–283. <https://doi.org/10.1534/genetics.104.031559>
18. Ron M., Cohen-Zinder M., Peter C., Weller J. I., Erhardt G. *Short communication: a polymorphism in ABCG2 in Bos indicus and Bos taurus cattle breeds*. *Journal of Dairy Science*, 2006, vol. 89, no. 12, pp. 4921–4923. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72542-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72542-5)
19. Blott S., Kim J. J., Moiso S., Schmidt-Küntzel A., Cornet A., Berzi P. [et al.]. Molecular dissection of a quantitative trait locus: a phenylalanine-to-tyrosine substitution in the transmembrane domain of the bovine growth hormone receptor is associated with a major effect on milk yield and composition. *Genetics*, 2003, vol. 163, no. 1, pp. 253–266. <https://doi.org/10.1093/genetics/163.1.253>
20. Viitala S., Szyda J., Blott S., Schulman N., Lidauer M., Mäki-Tanila A., Georges M., Vilkkii J. The role of the bovine growth hormone receptor and prolactin receptor genes in milk, fat and protein production in Finnish Ayrshire dairy cattle. *Genetics*, 2006, vol. 173, no. 4, pp. 2151–2164. <https://doi.org/10.1534/genetics.105.046730>
21. Liu L., Zhou J., Chen C. J., Zhang J., Wen W., Tian J., Zhang Z., Gu Y. GWAS-based identification of new loci for milk yield, fat, and protein in Holstein cattle. *Animals*, 2020, vol. 10, no. 11, art. 2048. <https://doi.org/10.3390/ani10112048>

22. Schennink A., Stoop W. M., Visker M. H. P. W., Heck J. M., Bovenhuis H., Van der Poel J. J., Van Valenberg H. J., Van Arendonk J. A. *DGAT1* underlies large genetic variation in milk-fat composition of dairy cows. *Animal Genetics*, 2007, vol. 38, no. 5, pp. 467–473. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2007.01635.x>
23. Jiang J., Ma L., Prakapenka D., VanRaden P. M., Cole J. B., Da Y. A large-scale genome-wide association study in US Holstein cattle. *Frontiers in Genetics*, 2019, vol. 10, art. 412. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00412>
24. Bouwman A. C., Daetwyler H. D., Chamberlain A. J., Ponce C. H., Sargolzaei M., Schenkel F. S. [et al.]. Meta-analysis of genome-wide association studies for cattle stature identifies common genes that regulate body size in mammals. *Nature Genetics*, 2018, vol. 50, no. 3, pp. 362–367. <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0056-5>
25. Sanchez M. P., Govignon-Gion A., Croiseau P., Fritz S., Hozé C., Miranda G. [et al.]. Within-breed and multi-breed GWAS on imputed whole-genome sequence variants reveal candidate mutations affecting milk protein composition in dairy cattle. *Genetics Selection Evolution*, 2017, vol. 49, no. 1, art. 68. <https://doi.org/10.1186/s12711-017-0344-z>
26. Cai Z., Guldbbrandtsen B., Lund M. S., Sahana G. Prioritizing candidate genes post-GWAS using multiple sources of data for mastitis resistance in dairy cattle. *BMC Genomics*, 2018, vol. 19, no. 1, art. 656. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5050-x>
27. Hayes B. J., Pryce J., Chamberlain A. J., Bowman P., Goddard M. E. Genetic architecture of complex traits and accuracy of genomic prediction: coat colour, milk-fat percentage, and type in Holstein cattle as contrasting model traits. *PLoS Genetics*, 2010, vol. 6, no. 9, art. e1001139. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1001139>
28. Wiggins G. R., Cole J. B., Hubbard S. M., Sonstegard T. S. Genomic selection in dairy cattle: the USDA experience. *Annual Review of Animal Biosciences*, 2017, vol. 5, pp. 309–327. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021815-111422>
29. Hayes B. J., Bowman P. J., Chamberlain A. J., Goddard M. E. *Invited review*: Genomic selection in dairy cattle: progress and challenges. *Journal of Dairy Science*, 2009, vol. 92, iss. 2, pp. 433–443. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1646>
30. Boichard D., Chung H., Dassonneville R., David X., Eggen A., Fritz S. [et al.]. Design of a bovine low-density SNP array optimized for imputation. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 3, art. e34130. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034130>
31. Sharma A., Lee J. S., Dang C. G., Sudrajat P., Kim H. C., Yeon S. H., Kang H. S., Lee S.-H. Stories and challenges of genome wide association studies in livestock – a review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2015, vol. 28, no. 10, pp. 1371–1379. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0715>
32. Lund M. S., Van den Berg I., Ma P., Brøndum R. F., Su G. Review: How to improve genomic predictions in small dairy cattle populations. *Animal*, 2016, vol. 10, no. 11, pp. 1042–1049. <https://doi.org/10.1017/S1751731115003031>
33. Hu Z. L., Park C. A., Reecy J. M. Building a livestock genetic and genomic information knowledgebase through integrative developments of Animal QTLdb and CorrDB. *Nucleic Acids Research*, 2019, vol. 47, iss. D1, pp. D701–D710. <https://doi.org/10.1093/nar/gky1084>
34. Sayers E. W., Beck J., Bolton E. E., Bourexis D., Brister J. R., Canese K. [et al.]. Database resources of the National Center for Biotechnology Information. *Nucleic Acids Research*, 2021, vol. 49, iss. D1, pp. D10–D17. <https://doi.org/10.1093/nar/gkaa892>
35. Evangelou E., Ioannidis J. P. A. Meta-analysis methods for genome-wide association studies and beyond. *Nature Reviews Genetics*, 2013, vol. 14, no. 6, pp. 379–389. <https://doi.org/10.1038/nrg3472>
36. Fornes O., Castro-Mondragon J. A., Khan A., Van der Lee R., Zhang X., Richmond P. A. [et al.]. JASPAR 2020: update of the open-access database of transcription factor binding profiles. *Nucleic Acids Research*, 2020, vol. 48, iss. D1, pp. D87–D92. <https://doi.org/10.1093/nar/gkz1001>
37. Daetwyler H. D., Capitan A., Pausch H., Stothard P., Van Binsbergen R., Brøndum R. F. [et al.]. Whole-genome sequencing of 234 bulls facilitates mapping of monogenic and complex traits in cattle. *Nature Genetics*, 2014, vol. 46, no. 8, pp. 858–865. <https://doi.org/10.1038/ng.3034>
38. Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software*, 2010, vol. 36, no. 3, pp. 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>
39. DerSimonian R., Laird N. Meta-analysis in clinical trials. *Controlled Clinical Trials*, 1986, vol. 7, no. 3, pp. 177–188. [https://doi.org/10.1016/0197-2456\(86\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0197-2456(86)90046-2)

Інфармацыя аб аўтарах

Мамедов Махиль Иса – доктор философии технических наук, доцент кафедры информационных технологий, Азербайджанский государственный аграрный университет (пр. Ата-тюрка, 450, Гянджа, Азербайджанская Республика). <https://orcid.org/0000-0002-9384-2746>. E-mail: mahil.mammadov@adau.edu.az

Турабов Урфан Туран – доктор философии аграрных наук, доцент кафедры общей и частной зоотехнии, Азербайджанский государственный аграрный университет (пр. Ата-тюрка, 450, Гянджа, Азербайджанская Республика). <https://orcid.org/0000-0003-4049-9603>. E-mail: urfan0766@mail.ru

Ганджаев Илгар Фархад – доктор философии ветеринарных наук, доцент кафедры анатомии и внутренних болезней, Азербайджанский государственный аграрный университет (пр. Ата-тюрка, 450, Гянджа, Азербайджанская Республика). <https://orcid.org/0009-0008-1923-4313>. E-mail: igenceyev@bk.ru

Information about the authors

Mahil Isa Mammadov – Ph. D. (Technical Sciences), Associate Professor at the Department of Information Technologies, Azerbaijan State Agricultural University (450, Ataturk Av., Ganja, Republic of Azerbaijan). <https://orcid.org/0000-0002-9384-2746>. E-mail: mahil.mammadov@adau.edu.az

Urfan Turan Turabov – Ph. D. (Agricultural Sciences), Associate Professor at the Department of General and Special Animal Husbandry, Azerbaijan State Agricultural University (450, Ataturk Av., Ganja, Republic of Azerbaijan). <https://orcid.org/0000-0003-4049-9603>. E-mail: urfan0766@mail.ru

Ilgar Farhad Ganjaev – Ph. D. (Veterinary Sciences), Associate Professor at the Department of Anatomy and Internal Diseases, Azerbaijan State Agricultural University (450, Ataturk Av., Ganja, Republic of Azerbaijan). <https://orcid.org/0009-0008-1923-4313>. E-mail: igenceyev@bk.ru

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

УДК 636.234.1.082.12

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-246-251>

Поступила в редакцию 25.09.2025

Received 25.09.2025

В. М. Гукеев¹, А. М. Хуранов²¹*Институт сельского хозяйства Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук,
Нальчик, Российская Федерация*²*Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова,
Нальчик, Российская Федерация***СВЯЗЬ ПОЛИМОРФИЗМА ГЕНОВ МОЛОЧНЫХ БЕЛКОВ
С УДОЕМ КОРОВ-ПЕРВОТЕЛОК – ДОЧЕРЕЙ БЫКОВ
КРАСНО-ПЕСТРОЙ ГОЛШТИНСКОЙ ПОРОДЫ**

Аннотация. Исследования проведены в племенном репродукторном хозяйстве СХПК «Ленинцы» (Кабардино-Балкарская Республика) на 54 коровах-первотелках – дочерях быков Имбиря 23433, Тайсона 1060 и Тоника 5155. Частоту отдельных аллелей определяли по методике Е. К. Меркурьевой (1977 г.). Цель исследований – сравнение генетического полиморфизма лучших и худших дочерей быков по генам пролактина (*PRL*) и каппа-казеина (*CSN3*). Сравнительная оценка показала, что по гену *PRL* чаще встречаются гетерозиготные генотипы *AB* по дочерям быков Тайсона 1060 (81,8 %) и Имбиря 23433 (62,5 %). По дочерям Тоника 5155 генотипы *AA* и *AB* распределились по 50 %, а среди всех 54 дочерей быков не было обнаружено ни одной особи с генотипом *BB*. В среднем удельный вес гетерозиготных генотипов по гену *PRL* был в два раза больше (66,7 %), чем гомозиготных (33,3 %). По гену *CSN3*, наоборот, наибольшее число дочерей (75 %) имели гомозиготный генотип *aa* и только 12 гол. (25 %) гетерозиготный генотип *ab*. По результатам исследований по генотипу гена *PRL* удельный вес гетерозиготных генотипов *AB* оказался в два раза больше гомозиготных *AA*, частота встречаемости аллеля *A* составила 0,67, аллеля *a* – 0,88. В выборке не выявили ни одной особи гомозиготной как по генотипу *BB*, так и по генотипу *bb*. Сравнительная оценка разных вариантов отбора свидетельствует о том, что использование данных маркеров, в отличие от фенотипа, не позволяет отбирать лучших животных. На данном этапе зоотехнические методы остаются приоритетными при формировании высокопродуктивного стада.

Ключевые слова: генотип, полиморфизм генов, хозяйственно полезные признаки, коровы-первотелки, красно-пестрая голштинская порода, пролактин, каппа-казеин

Для цитирования: Гукеев, В. М. Связь полиморфизма генов молочных белков с удоем коров-первотелок – дочерей быков красно-пестрой голштинской породы / В. М. Гукеев, А. М. Хуранов // *Весті Національної академії наук України. Серія аграрних наук.* – 2026. – Т. 64, № 3. – С. 246–251. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-246-251>

Vladimir M. Gukezhev, Alan M. Khuranov¹*Institute of Agriculture of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Nalchik, Russian Federation*²*Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov, Nalchik, Russian Federation***RELATIONSHIP BETWEEN MILK PROTEIN GENE POLYMORPHISM AND MILK YIELD
IN FIRST-CALVING COWS – DAUGHTERS OF RED-AND-WHITE HOLSTEIN BULLS**

Abstract. The study was conducted on 54 first-calf heifers, the daughters of bulls Imbir 23433, Tyson 1060, and Tonik 5155, from the Lenintsy Agricultural Production Cooperative Breeding Farm, Maysky District, Kabardino-Balkarian Republic. The frequency of individual alleles was determined using the method of E. K. Merkuryeva (1977). The objective of the study was to compare the genetic polymorphism of the highest- and lowest-yielding daughters of bulls for the prolactin (*PRL*) and kappa-casein (*CSN3*) genes. A comparative assessment showed that heterozygous *AB* genotypes for the *PRL* gene are more common in the daughters of bulls Tyson 1060 (81.8 %) and Imbir 23433 (62.5 %). Among the daughters of Tonik 5155, the *AA* and *AB* genotypes were distributed 50 % each, and among all 54 daughters of the bulls, there was not a single individual with the *BB* genotype. On average, the proportion of heterozygous genotypes for the *PRL* gene was twice as high (66.7 %) as that of homozygous genotypes (33.3 %). Conversely, for the *CSN3* gene, the greatest number of daughters (75 %) had the homozygous genotype *aa* and only 12 heads (25 %) had the heterozygous genotype *ab*. According to the results of studies on the *PRL* gene genotype, the proportion of heterozygous *AB* genotypes was twice as high as that of homozygous *AA*, the frequency of the *A* allele was 0.67, and the *a* allele was 0.88. The sample did not contain a single individual homozygous for either the *BB* or *bb* genotypes. A comparative evaluation of various selection options indicates that, at this stage, the use of these markers, unlike phenotype, does not allow for the selection of the best animals. At this stage, zootechnical methods remain the preferred approach for building a high-yielding herd.

Keywords: genotype, gene polymorphism, economically valuable traits, first-calf heifers, red-and-white Holstein breed, prolactin, kappa-casein

For citation: Gukezhev V. M., Khuranov A. M. Relationship between milk protein gene polymorphism and milk yield in first-calving cows – daughters of Red-and-White Holstein bulls. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 246–251 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-246-251>

Введение. Молочное скотоводство является самой крупной отраслью животноводства в СНГ. В разных природно-экономических зонах развитие молочного скотоводства обладает определенными особенностями, которые обуславливаются структурой аграрных угодий и направленностью аграрного производства, почвенными и климатическими обстоятельствами [1].

В прошедшее десятилетие в развитии молочного скотоводства наметились положительные тенденции: замедлились темпы сокращения поголовья крупного рогатого скота, повысилась продуктивность коров. Эти изменения привели к увеличению валового производства молока и обеспечению им населения [2].

В странах Европы с высокоразвитым молочным скотоводством, а также в США и Канаде ДНК-технологии широко используют в селекционной практике [3].

Поиск способов повышения продуктивности коров при низких затратах и с сохранением репродуктивных показателей является основным вопросом повышения устойчивости и жизнеспособности молочного скота. Выполненные исследования по изучению влияния различий и индивидуальных способностей коров в стаде позволили установить, что недостаточно внимания уделяется взаимосвязи генотипа коров и контрастных особенностей в молочных стадах [4].

Каппа-казеин напрямую связан с гидрофильными свойствами казеина молока, влияющими на технологические процессы при производстве кисломолочных продуктов. За образование данной фракции отвечает ген каппа-казеина (*CSN3*). На данный момент обнаружено 15 аллелей этого гена, которые отвечают за генетический полиморфизм. Самые распространенные из них – *A* и *B*, отличающиеся друг от друга двумя заменами аминокислот. В сочетании они дают три основных генотипа: *AA*, *AB*, *BB*. При изучении их влияния на свойства молока и молочных продуктов были получены противоречивые данные. Определенная группа ученых утверждает, что генотип *BB* по *CSN3* является приоритетным по удою, содержанию белка, жира и технологическим свойствам, другие исследователи получили противоположные результаты – в пользу генотипов *AA* и *AB*. Вследствие этого актуально проводить генотипирование крупного рогатого скота по гену *CSN3* для дальнейшего изучения и развития селекционных программ в племенном молочном скотоводстве [5].

Пролактин (bPRL) – один из самых универсальных гормонов гипофиза с точки зрения его биологической активности [6]. Биологическое действие пролактина (или лютеотропного гормона) заключается в его влиянии на воспроизводительные функции. Он регулирует процессы дифференцировки клеток эпителия в молочной железе и ее развитие, а также функцию желтого тела, стимулирует процесс молокообразования в период лактации. Гормон также стимулирует накопление аминокислот для синтеза молочных белков и глюкозы для синтеза лактозы и жира [7]. Участвуя в инициации и поддержании лактации у млекопитающих, пролактин может являться эвентуальным генетическим маркером молочной продуктивности крупного рогатого скота, а как следствие – дополнительным критерием отбора при селекции [8].

Многочисленные исследования подтверждают, что коровы с генотипом *BB* по гену *PRL* являются наиболее обильномолочными и жирномолочными, а также имеют самый высокий выход белка и молочного жира [9].

Оценка степени влияния различных генотипов генов *PRL*, *TG5* (тиреоглобулин) и *BLG* (бета-лактоглобулин) на индекс плодовитости, проведенная Ю. Р. Юльметьевой с соавторами, показала, что при увеличении продолжительности межотельного периода (МОП) у особей с генотипом *AA* по гену *PRL* потери молока были на 0,2 кг/сут, или 12,5 %, меньше, чем у носителей генотипа *AB* + *BB*. При этом выход жира и белка молока у животных, гомозиготных по аллели *A* был ниже по сравнению с носителями генотипа *AB* + *BB* [10].

Цель исследований – проведение анализа и сравнения генетического полиморфизма лучших и худших дочерей быков в голштинизированном стаде красной степной породы по генам *PRL* и *CSN3*.

Материалы и методы исследования. Исследования проведены на 54 коровах-первотелках, являющихся дочерьми быков красно-пестрой голштинской породы – Имбиря 23433, Тайсона 1060 и Тоника 5155 племенного репродукторного хозяйства СХПК «Ленинцы» (Майский р-н Кабардино-Балкарской Республики). У исследованных методами ДНК-диагностики животных изучен полиморфизм однонуклеотидных ДНК-маркеров по генам *PRL* и *CSN3* и их аллельных вариантов. Частота встречаемости генотипов рассчитана по формуле

$$P = \frac{n}{N},$$

где P – частота определенного генотипа; n – количество животных; N – общее число животных.

Частоту отдельных аллелей определяли по методике Е. К. Меркурьевой (1977 г.):

$$P_A = \frac{2n_{AA} + n_{AB}}{2N},$$

$$Q_B = \frac{2n_{BB} + n_{AB}}{2N},$$

где P_A – частота аллеля A ; n_{AA} – число особей с гомозиготным генотипом аллеля A ; n_{AB} – число особей с гетерозиготным генотипом; Q_B – частота аллеля B ; n_{BB} – число особей с гомозиготным генотипом аллеля B ; n_{AB} – число особей с гетерозиготным генотипом; N – общее число особей.

Результаты исследований и их обсуждение. Достижения молекулярной генетики, позволяющие установление взаимосвязи генов с основными хозяйственно полезными селекционируемыми признаками отбора, существенно могут повысить эффективность традиционных методов и подходов по вопросам совершенствования стад и пород животных с учетом генотипа на уровне ДНК. На данном этапе выявлен достаточно широкий набор полиморфных генов-кандидатов в качестве генетических маркеров молочной продуктивности, эффективность которых определяется путем сравнения показателей продуктивности животных разных генотипов. Однако представляет существенный селекционный интерес, в какой степени показатели животных совпадают или различаются с фенотипическими данными. В связи с этим целью исследований являлись анализ и сравнение генетического полиморфизма лучших и худших дочерей быков в голштинизированном стаде красной степной породы по генам *PRL* и *CSN3*.

Полиморфизм гена *PRL* в исследованных группах дочерей быков красно-пестрой голштинской породы (Имбирь 23433, Тайсон 1060 и Тоник 5155) представлен в табл. 1.

Таблица 1. Частота встречаемости генотипов гена *PRL* и их аллельных вариантов

Table 1. Frequency of occurrence of *PRL* genotypes and their allelic variants

Кличка и № быка	Количество дочерей	Частота встречаемости генотипов						Частота встречаемости аллелей	
		<i>AA</i>		<i>AB</i>		<i>BB</i>		<i>A</i>	<i>B</i>
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%		
Имбирь 23433	16	6	37,5	10	62,5	–	–	0,69	0,31
Тайсон 1060	22	4	18,2	18	81,8	–	–	0,59	0,41
Тоник 5155	16	8	50,0	8	50,0	–	–	0,75	0,25
Итого	54	18	33,3	36	66,7	–	–	0,67	0,33

Анализ данных табл. 1 показывает, что среди дочерей всех трех быков не было обнаружено ни одной дочери с генотипом *BB*. Удельный вес гетерозиготных типа *AB* дочерей оказался в два раза больше, чем гомозиготных *AA* (66,7 %). Наибольший удельный вес гетерозиготных дочерей (81,8 %) установлен в потомстве быка Тайсона 1060. Интересно отметить, что в потомстве быка Тоника 5155 отмечено одинаковое количество гомозиготных *AA* и гетерозиготных *AB* типов дочерей. Частота встречаемости аллеля A в среднем составила 0,67, тогда как аллеля B – 0,33, то есть в два раза меньше.

Частота встречаемости генотипов гена *CSN3* показана в табл. 2.

Результаты свидетельствуют о том, что и по данному гену среди дочерей быков не оказалось ни одной с генотипом *bb*. Существенное преимущество в потомстве всех быков занимают гомозиготные особи типа *aa* – 75,0 %, соответственно, частота встречаемости аллеля a оказалась высокой и составила 0,88.

Таблица 2. Полиморфизм гена *CSN3*Table 2. Polymorphism of the *CSN3* gene

Кличка и № быка	Количество дочерей	Частота встречаемости генотипов						Частота встречаемости аллелей	
		<i>aa</i>		<i>ab</i>		<i>bb</i>		<i>a</i>	<i>b</i>
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%		
Имбирь 23433	14	10	71,4	4	28,6	—	—	0,86	0,14
Тайсон 1060	20	18	90,0	2	10,0	—	—	0,95	0,05
Тоник 5155	14	8	57,1	6	42,9	—	—	0,78	0,22
Итого	48	36	75,0	12	25,0	—	—	0,88	0,12

Таблица 3. Величина удоя за 305 дней первой лактации дочерей быков разного генотипа

Table 3. Milk yield for 305 days of the first lactation of daughters of bulls of different genotypes

Кличка и № быка	Полиморфизм гена <i>PRL</i>						Полиморфизм гена <i>CSN3</i>					
	<i>AA</i>		<i>AB</i>		<i>BB</i>		<i>aa</i>		<i>ab</i>		<i>bb</i>	
	<i>n</i>	удой, кг	<i>n</i>	удой, кг (± к <i>AA</i>)	<i>n</i>	удой, кг	<i>n</i>	удой, кг	<i>n</i>	удой, кг (± к <i>aa</i>)	<i>n</i>	удой, кг
Имбирь 23433	6	4 936,7	10	4 258,2 –678,5	—	—	10	4 182,5	2	5 442,0 +1 259,5	—	—
Тайсон 1060	5	3 984,3	17	4 835,6 +851,3	—	—	16	4 583,5	6	4 944,5 +361,0	—	—
Тоник 5155	8	5 307,0	8	4 278,5 –1 028,5	—	—	8	5 248,5	6	4 402,3 –846,2	—	—
Итого	19	4 852,0	35	4 534,3 –317,7	—	—	34	4 649,5	14	4 756,3 +106,8	—	—

Особый интерес для практиков-селекционеров представляет взаимосвязь полиморфизма разных генов с показателями молочной продуктивности. С этой целью нами проведен сравнительный анализ зависимости удоя дочерей от генотипа (табл. 3).

Анализ результатов табл. 3 свидетельствует о том, что по гену *PRL* наибольший удельный вес (65,4 %) занимают первотелки с гетерозиготным генотипом *AB*. Однако более высоким удоём за первую лактацию – 4 852,0 кг – характеризовались гомозиготные первотелки генотипа *AA*, которые превосходили сверстниц по удою на 317,7 кг. Обращает на себя внимание тот факт, что из трех дочерей быков гомозиготные дочери быка Тоника 5155 достоверно (+1 028,5 кг, $p \leq 0,01$) и Имбиря 23433 (+678,5 кг, $p \leq 0,05$) превосходили гетерозиготных сверстниц, а среди дочерей быка Тайсона 1060 наиболее высокий удой получен от гетерозиготных дочерей – 4 835,6 кг, что также достоверно (+851,3 кг, $p \leq 0,01$) превышает удой гомозиготных (*AA*) сверстниц.

Что касается полиморфизма гена *CSN3*, то здесь в среднем гетерозиготные первотелки *ab* с небольшим перевесом (+106,8 кг, разница статистически недостоверна) превосходили гомозиготных сверстниц. Однако данный показатель был достигнут преимущественно за счет гетерозиготных дочерей быка Тайсона 1060. Следует отметить, что и в данном случае гомозиготные дочери быка Тоника 5155 достоверно (+846,2 кг, $p \leq 0,01$) превосходили гетерозиготных, тогда как у полубрата Тайсона 1060, наоборот, преимущество у гетерозиготных.

Значительный интерес для селекции представляет возможность прогнозирования распределения генотипов с учетом фактических показателей удоя дочерей. С этой целью нами были выделены лучшие (с удоём за первую лактацию 5 000 кг и более) и худшие (менее 4 500 кг) дочери быков в зависимости от генотипа (табл. 4).

Оценка племенной ценности полубратьев – Тайсона 1060 и Тоника 5155 – выявила качественные различия в генотипе их потомства: лучшие дочери Тайсона 1060 характеризовались гетерозиготностью, а лучшие дочери Тоника 5155 – гомозиготностью, при идентичном количественном распределении худших по продуктивности животных в обеих группах. По удою гомозиготные дочери незначительно и недостоверно превышали гетерозиготных на 191,0 кг и 153,5 кг соответственно. Такая же закономерность отмечена и по дочерям быка-производителя Имбиря 23433. Сравнительный анализ лучших дочерей показал, что если у быка Имбиря 23433 продуктивность

Т а б л и ц а 4. Распределение дочерей быков по фенотипу на лучших по удою (5 000 кг и выше) и худших (до 4 500 кг) в зависимости от генотипа

Table 4. Distribution of daughters of bulls by phenotype into the best in milk yield (5,000 kg and above) and the worst (up to 4,500 kg) depending on the genotype

Кличка и № быка	Генотип <i>PRL</i>				Генотип <i>CSN3</i>			
	Лучшие по удою, <i>n</i> -удой, кг		Худшие по удою, <i>n</i> -удой, кг		Лучшие по удою, <i>n</i> -удой, кг		Худшие по удою, <i>n</i> -удой, кг	
	<i>AA</i>	<i>AB</i>	<i>AA</i>	<i>AB</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>	<i>aa</i>	<i>ab</i>
Имбирь 23433	4-5445,0	4-5448,5	2-3941,1	6-3467,7 –473,4	2-5455,0	4-5404,1	6-3758,3	–
Тайсон 1060	–	10-5893,8	4-3984,3	8-3793,3 –191,0	6-5878,7	4-5882,3	10-3826,4	2-4010,0
Тоник 5155	6-5660,7	–	2-4432,0	8-4278,5 –153,5	4-6111,0	–	4-4386,2	6-4404,3
Итого	10-5574,4	14-5766,6	8-4085,4	22-3880,9	12-5885,5	8-5643,2	20-3917,9	8-4305,7

Т а б л и ц а 5. Эффективность разных вариантов отбора

Table 5. Effectiveness of different selection options

Кличка и № быка	Фенотип			Генотип					
	Лучшие	Худшие	Разница, кг	<i>PRL</i>			<i>CSN3</i>		
				<i>AA</i>	<i>AB</i>	Разница, кг	<i>aa</i>	<i>ab</i>	Разница, кг
Имбирь 23433	8-5446,8	8-3586,1	1 860,7	6-4943,7	10-4260,0	683,7	8-4186,2	4-5404,1	1 217,9
Тайсон 1060	10-5893,8	12-3857,1	2 036,7	4-3984,3	18-4960,2	975,8	16-4596,0	6-5258,2	662,2
Тоник 5155	6-5660,7	10-4309,2	1 351,5	8-5353,5	8-4278,5	1 075,0	4-5248,6	6-4404,3	844,3

потомства не имела значимых различий, то гетерозиготные дочери быка Тайсона 1060 превосходили по удою своих сверстниц – гомозиготных дочерей быка Тоника 5155 – на 233,1 кг.

Эффективность разных вариантов отбора указана в табл. 5.

Результаты исследований по генотипу *PRL* свидетельствуют о достоверном превосходстве дочерей оцениваемых производителей над сверстницами: для гомозиготного потомства быков Имбиря 23433 и Тоника 5155 прибавка по удою составила +683,7 ($p \leq 0,05$) и +1 075,0 кг ($p \leq 0,01$), тогда как у быка Тайсона 1060 наибольшую продуктивность проявили гетерозиготные дочери (+975,8 кг, $p \leq 0,01$).

По генотипу *CSN3* достоверное превосходство отмечено по гетерозиготным дочерям Имбиря 23433 (+1 217,9 кг, $p \leq 0,01$) и Тайсона 1060 (+662,2 кг, $p \leq 0,05$), тогда как по дочерям Тоника 5155 превосходство гомозиготных дочерей составило 1 075,0 кг ($p \leq 0,01$).

Выводы. По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Частота встречаемости генотипов гена *PRL* и их аллельных вариантов показала, что удельный вес гетерозиготных генотипов *AB* оказался в два раза больше гомозиготных *AA*; в выборке не оказалось ни одной особи гомозиготной по генотипу *BB*; частота встречаемости аллеля *A* составила 0,67.

2. По генотипам гена *CSN3*, наоборот, удельный вес гомозиготных генотипов оказался в три раза больше и составил 75 %, соответственно, частота встречаемости аллеля *a* равнялась 0,88.

3. Сравнительная оценка разных вариантов отбора свидетельствует о том, что на данном этапе использование данных маркеров, в отличие от фенотипа, не позволяет отбирать лучших животных.

В связи с этим для повышения точности селекции рекомендуется поиск новых маркеров, более тесно связанных с величиной удою.

Список использованных источников

- Панин, В. А. Полиморфизм генов молочных белков симментальских коров / В. А. Панин // Эффективное животноводство. – 2020. – № 1 (158). – С. 40–43. <https://doi.org/10.24411/9999-007A-2019-1074>
- Гинтов, В. В. Экономическая эффективность ведения молочного скотоводства в Архангельской области / В. В. Гинтов // Эффективное животноводство. – 2019. – № S5 (153). – С. 74–77. <https://doi.org/10.24411/9999-007A-2019-1043>

3. Харламов, А. В. Влияние генов каппа-казеина и лактоглобулина на молочную продуктивность коров и белковый состав молока (обзор) / А. В. Харламов, В. А. Панин, В. И. Косилов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 1 (81). – С. 193–197.
4. Magne, M. A. Initial insights on the performances and management of dairy cattle herds combining two breeds with contrasting features / M. A. Magne, V. Thénard, S. Mihout // *Animal*. – 2016. – Vol. 10, № 5. – P. 892–901. <http://doi.org/10.1017/S1751731115002840>
5. Щипакова, Е. Н. Характеристика молочного белка каппа-казеина крупного рогатого скота / Е. Н. Щипакова, И. С. Кожевникова // Молочное и мясное скотоводство. – 2023. – № 6. – С. 20–24. <http://doi.org/10.33943/MMS.2023.75.39.004>
6. Полиморфизм генов CSN3, BPRL и BGH у коров костромской породы в связи с показателями молочной продуктивности / А. В. Перчун, И. В. Лазебная, С. Г. Белокуров [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11, ч. 2. – С. 304–308.
7. Тараненко, А. Г. Пролактин и лактация / А. Г. Тараненко. – М.: Агропромиздат, 1987. – 127 с.
8. Селионова, М. И. Оценка полиморфизма гена пролактина у коров молочных пород / М. И. Селионова, Л. В. Кононова, О. В. Сычёва // Животноводство и кормопроизводство. – 2018. – Т. 101, № 1. – С. 27–33.
9. Генотипирование холмогорского и голштинского скота по генам пролактина и соматотропина / И. Е. Багаль, И. Ю. Павлова, Я. А. Хабибрахманова [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 5. – С. 11–13.
10. Характеристика воспроизводительной функции коров голштинской породы в зависимости от их генетического потенциала / Ю. Р. Юльметьева, Ф. Ф. Зиннатова, Е. Н. Рачкова [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 9. – С. 48–51.

References

1. Panin V. A. Polymorphism of genes of milk proteins of Simmental cows. *Effektivnoye zhivotnovodstvo* [Efficient Animal Husbandry], 2020, no. 1 (158), pp. 40–43 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/9999-007A-2019-1074>
2. Gintov V. V. Economic efficiency of dairy cattle breeding in the Arkhangelsk region. *Effektivnoye zhivotnovodstvo* [Efficient Animal Husbandry], 2019, no. S5 (153), pp. 74–77 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/9999-007A-2019-1043>
3. Harlamov A. V., Panin V. A., Kosilov V. I. Effect of kappa-casein and lactoglobulin genes on milk yields of cows and the content of protein in milk. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2020, no. 1 (81), pp. 193–197 (in Russian).
4. Magne M. A., Thénard V., Mihout S. Initial insights on the performances and management of dairy cattle herds combining two breeds with contrasting features. *Animal*, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 892–901. <http://doi.org/10.1017/S1751731115002840>
5. Shchipakova E. N., Kozhevnikova I. S. Characterization of bovine kappa-casein milk protein. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo = Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding*, 2023, no. 6, pp. 20–24 (in Russian). <http://doi.org/10.33943/MMS.2023.75.39.004>
6. Perchun A. V., Lazebnaya I. V., Belokurov S. G., Ruzina M. N., Sulimova G. E. Polymorphism of CSN3, BGH and BPRL genes in connection with milk quality traits in Kostroma cattle breed. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2012, no. 11, pt. 2, pp. 304–308 (in Russian).
7. Taranenko A. G. *Prolactin and lactation*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 127 p. (in Russian).
8. Selionova M. I., Kononova L. V., Sycheva O. V. Evaluation of polymorphism of prolactin gene in dairy cows. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo = Animal Husbandry and Fodder Production*, 2018, vol. 101, no. 1, pp. 27–33 (in Russian).
9. Bagal' I. Ye., Pavlova I. Yu., Khabibrakhmanova Ya. A., Kalashnikova L. A., Yaluga V. L. Genotyping Kholmogor and Holstein cattle in the genes of prolactin and somatotropin. *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk = Vestnik of the Russian Agricultural Science*, 2014, no. 5, pp. 11–13 (in Russian).
10. Yulmetieva Yu. R., Zinnatova F. F., Rachkova E. N., Shakirov Sh. K., Tagirov M. Sh. Characteristic of the reproductive function of Holstein cows depending on their genetic potential. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 2017, vol. 31, no. 9, pp. 48–51 (in Russian).

Информация об авторах

Гукежев Владимир Мицахович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий лабораторией животноводства, Институт сельского хозяйства Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (ул. Кирова, 224, 360004, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Российская Федерация). E-mail: ishkbncran@yandex.ru

Хуранов Алан Мухадинович – кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры ветеринарной медицины, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова (пр. Ленина, 1, 360030, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Российская Федерация). E-mail: huranovan85@mail.ru

Information about the authors

Vladimir M. Gukezhiev – Dr. Sc. (Agriculture), Professor, Head of the Laboratory of Animal Husbandry, Institute of Agriculture of the Russian Academy of Sciences, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (224, Kirov Str., 360004, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation). E-mail: ishkbncran@yandex.ru

Alan M. Khuranov – Ph. D. (Veterinary), Associate Professor of the Department of Veterinary Medicine, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov (1, Lenin Ave., 360030, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation). E-mail: huranovan85@mail.ru

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS

УДК 637.12.055:579.864:577.21.08
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-252-264>

Поступила в редакцию 19.08.2025
Received 19.08.2025

Е. Н. Бирюк, Н. К. Жабанос, А. А. Соглаева, Т. А. Савельева, Д. С. Корягина

*Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

ГЕНОТИПИРОВАНИЕ ГАЗО- И АРОМАТОБРАЗУЮЩИХ ЗАКВАСОЧНЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ

Аннотация. Представлены результаты исследований разрешающей способности методов RAPD- и Rep-ПЦР для выявления генетической гетерогенности газо- и ароматобразующих молочнокислых бактерий, выделенных из сырого молока. Изучение типизирующей способности Rep-ПЦР в отношении лейконостоков показало, что изоляты, выделенные из разных природных источников, образуют отличающиеся профили ампликонов при использовании праймеров BOXA1R, BOXA2R, ERIC2-1. Типизирующая способность Rep-ПЦР в отношении изолятов диацетильного лактококка выявлена только с праймерами BOXA2R и ERIC2-1. Метод RAPD-ПЦР обладает типизирующей способностью в отношении лейконостоков при использовании праймеров XD8, P15, P16 и RAPD-mes. Анализ профилей фрагментов изолятов диацетильного лактококка, полученных с помощью RAPD-ПЦР с праймерами XD8 и P16, подтвердил способность метода выявлять гетерогенность внутри биоварианта *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis*. Результаты исследований используются для выделения новых штаммов и пополнения Республиканской коллекции промышленных штаммов заквасочных культур и их бактериофагов РУП «Институт мясо-молочной промышленности».

Ключевые слова: генотипирование, RAPD-ПЦР, Rep-ПЦР, заквасочные культуры, лейконостоки, диацетильный лактококк

Для цитирования: Генотипирование газо- и ароматобразующих заквасочных культур с использованием молекулярных методов / Е. Н. Бирюк, Н. К. Жабанос, А. А. Соглаева [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 3. – С. 252–264. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-252-264>

Alena N. Biruk, Natallia K. Zhabanos, Alla A. Soglaeva, Tamara A. Savelyeva, Darya S. Karahina

Institute for the Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

GENOTYPING OF GAS- AND AROMA-FORMING STARTER CULTURES USING MOLECULAR METHODS

Abstract. The article presents the results of studies on the resolving power of the RAPD and Rep-PCR methods for revealing the genetic heterogeneity of gas- and aroma-forming lactic acid bacteria isolated from raw milk. The study of the typing ability of Rep-PCR in relation to leuconostocs showed that isolates obtained from different natural sources form different amplicon profiles when using primers BOXA1R, BOXA2R, ERIC2-1. The typing ability of Rep-PCR for diacetyl lactococci isolates was demonstrated only with primers BOXA2R and ERIC2-1. The RAPD-PCR method showed typing ability for leuconostocs using primers XD8, P15, P16, and RAPD-mes. The analysis of the fragment profiles of diacetyl lactococcal isolates obtained by RAPD-PCR with primers XD8 and P16 confirmed the ability of the method to detect heterogeneity within the biovariant of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis*. The results of the research are used to isolate new strains and replenish the Republican collection of industrial strains of starter cultures and their bacteriophages of RUE “Institute of Meat and Dairy Industry”.

Keywords: genotyping, RAPD-PCR, Rep-PCR, starter cultures, leuconostocs, diacetyl lactococcus

For citation: Biruk A. N., Zhabanos N. K., Soglaeva A. A., Savelyeva T. A., Karahina D. S. Genotyping of gas- and aroma-forming starter cultures using molecular methods. *Vesti Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 3, pp. 252–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-3-252-264>

Введение. Производство ферментированных молочных продуктов базируется на использовании заквасок на основе комбинаций молочнокислых микроорганизмов разных таксономических групп. Получение готовых продуктов с заданным комплексом характеристик во многом определяется составом и свойствами применяемых микроорганизмов. Наиболее часто для производства молочных продуктов (в частности, творога, сметаны, сыра и др.) применяют бактериальные закваски, в состав которых входят штаммы лактококков (*Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis*), термофильного стрептококка (*Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*) и лейконостоков: *Leuconostoc lactis* и *Leuconostoc mesenteroides*, который включает три подвида: *dextranicum*, *mesenteroides*, *cremoris*.

Газо- и ароматобразующие микроорганизмы (лейконостоки и диацетильный лактококк) продуцируют в ферментируемое сырье продукты метаболизма, обладающие специфическим вкусом и запахом, которые придают аромат молочному сгустку. Вкус и аромат зависят от различных эфиров, возникающих при взаимодействии спиртов и органических кислот, образуемых микроорганизмами. *Leuconostoc mesenteroides* является активным продуцентом уксусной, молочной, муравьиной, пировиноградной кислот и ацетона [1–4].

Доказано, что *Leuconostoc mesenteroides* продуцируют бактериоцины, которые рассматриваются как современная альтернатива антибиотикам по причине селективного подавления роста патогенной микрофлоры, не оказывая отрицательного воздействия на представителей нормофлоры [5, 6]. Поэтому штаммы *Leuconostoc* используются в молочной промышленности для предотвращения роста патогенных микроорганизмов, а также для производства пробиотиков и биологически активных добавок¹ [7].

Одной из отличительных особенностей *Lactococcus lactis* subsp. *diacetylactis* является способность продуцировать фермент цитритазу, которая расщепляет цитраты с образованием диоксида углерода (CO₂) и ароматических веществ – ацетона и диацетила. Диацетил имеет особое значение для ароматизации масла, а также важен как ароматизирующий компонент в сливках, пахте и различных сортах свежего сыра [8]. Благодаря газообразующей микрофлоре молочный сгусток содержит углекислый газ, что обеспечивает всплытие творога при отваривании. В кисломолочных напитках присутствие диоксида углерода в известной степени улучшает вкус, придавая продукту легкий пикантный привкус [3]. Газообразующая микрофлора также важна для формирования глазков во многих видах сыра, кроме того, лейконостоки оказывают сильное влияние на органолептические показатели сыра.

Выделение чистых культур молочнокислых бактерий является основой по созданию и поддержанию отраслевых коллекций микроорганизмов. Для изготовления ассортимента заквасок и обеспечения их стабильных функциональных характеристик необходимо постоянно обеспечивать ротацию заквасочных штаммов, что связано как с изменением биологических свойств заквасочных микроорганизмов при их длительном культивировании и хранении, так и с разнообразием бактериофагов на молокоперерабатывающих предприятиях. Развитие молокоперерабатывающей промышленности как основного потребителя заквасок ставит новые задачи по обеспечению направленности технологических процессов ферментации сырья, а также получению продукции со стабильными показателями качества и определенными органолептическими характеристиками [9]. Этим обусловлена необходимость постоянного выделения чистых культур молочнокислых бактерий с целью получения производственно ценных штаммов заквасочных микроорганизмов.

Важнейшей задачей при выделении производственно ценных штаммов заквасочных культур является их точная таксономическая идентификация. Современные исследования показывают, что в последние годы идентификация микроорганизмов только на основании морфологических, культуральных и физиолого-биохимических признаков стала недостоверной, так как было установлено, что многие виды молочнокислых бактерий обладают высоким уровнем фенотипической изменчивости. Указанные признаки дают только предварительные сведения о систематическом положении данного микроорганизма и часто не позволяют отнести его к определенному виду.

¹ Патент RU 2273662, МПК C12N 1/20 (2006.01), A23C 9/12 (2006.01), C12R 1/01 (2006.01). Консорциум микроорганизмов пробиотического действия: № 2004118804/13: заявлено 22.06.2004: опубл. 10.04.2006 / Рожков А. В., Шестаков А. И.; заявители: Рожков А. В., Шестаков А. И. Бюл. № 10.

Для более точной идентификации микроорганизмов необходимо использовать различные молекулярно-генетические методы [10, 11].

В специализированных коллекциях поддерживается большое число промышленно ценных штаммов ограниченного количества видов. Важной задачей является сохранение их внутривидового разнообразия. Выбор штаммов для включения в коллекционный фонд проводится на основании анализа экологических особенностей (место, время, объект выделения), фено- и генотипических диагностических свойств, внесенных в паспорт штамма. Для отбора культур в коллекционный фонд важно использование дополнительных тестов, которые позволяют дифференцировать разные штаммы одного вида или подвида [12].

В настоящее время для оценки гетерогенности микроорганизмов используют методы генотипирования, которые можно разделить на несколько групп: фрагментный анализ ДНК, прямые методы (на основе секвенирования специфичных участков ДНК, ДНК-микрочипы, полногеномное секвенирование) и косвенные методы (электрофорез в денатурирующей системе, анализ кривых плавления). Фрагментный анализ ДНК включает различные методы получения фингерпринтов: гель-электрофорез в пульсирующем поле (*PFGE – Pulsed Field Gel Electrophoresis*), анализ полиморфизма рестрикционных фрагментов (*RFLP – Restriction Fragment Length Polymorphism*), полиморфизм произвольно амплифицированных фрагментов ДНК (*RAPD – Random Amplification of Polymorphic DNA*), амплификацию повторяющихся последовательностей экстрагенных полиндромов, многолокусный анализ вариабельного числа копий tandemных повторов (*MLVA – Multiple Locus Variable Number Tandem Repeats Analysis*); анализ полиморфизма амплифицированных фрагментов (*AFLP – Amplified Fragment Length Polymorphism*) удачно совмещает возможности эндонуклеаз, рестрикции и амплификации [13].

Дифференцирующие возможности, определяющие способность метода различать бактериальные штаммы конкретного вида, являются одним из наиболее важных критериев для выбора метода генотипирования объекта исследования. Такими свойствами, например, обладают молекулярные маркеры RAPD-ПЦР и AFLP, которые позволяют оценить стабильность штаммов микроорганизмов при ведении коллекций и производстве бактериальных препаратов. Разрешающая способность метода зависит от многих факторов, среди которых ключевую роль играет выбор наиболее информативного участка генома. Кроме того, большинство методов генотипирования проявляют специфичность по отношению к бактериальным штаммам, вследствие чего они с различной эффективностью дифференцируют тот или иной вид. Воспроизводимость результатов генотипирования является важным требованием к методу ДНК-фингерпринта, обычно результаты фрагментарного анализа ДНК труднее воспроизвести и сравнить между лабораториями, чем результаты генотипирования, основанного на секвенировании последовательностей ДНК [13].

Цель настоящей работы – изучение разрешающей способности методов RAPD- и Rep-ПЦР для выявления генетической гетерогенности газо- и ароматобразующих молочнокислых бактерий, выделенных из сырого молока.

Материалы и методы исследований. Исследования по изучению разрешающей способности методов RAPD- и Rep-ПЦР для генотипирования изолятов заквасочных культур проводили в отделе биотехнологий РУП «Институт мясо-молочной промышленности» в 2021–2023 гг. В работе использовали изоляты лейконостоков и диацетильного лактококка, выделенные из природных источников в рамках выполнения мероприятия 100 (93) «Разработать технологию получения газо- и ароматобразующих микроорганизмов на основе методов молекулярно-генетического типирования и освоить производство заквасок для творога с их использованием» подпрограммы «Инновационные биотехнологии» Государственной программы «Научные технологии и техника» на 2021–2025 годы.

Бактериальные культуры выращивали в жидкой среде MRS [14]. Выделение ДНК из бактериальных клеток проводили с использованием коммерческого набора «АртДНК MiniSpin» (ООО «АртБиоТех», Республика Беларусь) согласно инструкции производителя. Для проведения амплификации использовали реактивы и праймеры производства ОДО «Праймтех» (Республика Беларусь).

Для Rep-ПЦР использовали праймеры ERIC2-1, ERIC IR1, BOX A1R и BOX A2R. Для RAPD-ПЦР использовали праймеры P15, P16, XD8 и XD9, (GTG)₅ и RAPD-mes (только для *Leuconostoc*). Про-

дукты амплификации смешивали с интеркалирующим красителем UView 6x Loading Dye (Bio-Rad) и разделяли с помощью электрофореза в 1,5%-м агарозном геле с использованием 1X TAE буфера. Для документирования результатов электрофореза использовали систему GelDoc XR+ (Bio-Rad). Размеры фрагментов ДНК устанавливали на основании их электрофоретической подвижности в геле, в качестве маркеров молекулярного веса использовали M1Kb и M100bp (ОДО «Праймтех», Республика Беларусь).

Кластерный анализ полученных ПЦР-профилей осуществляли с помощью программы TREECON for Windows (версия 1.3b). Бинарные матрицы исходных данных создавали вручную после визуализации гелей, обозначая присутствие фрагмента как 1, а его отсутствие – 0. Анализ осуществляли методом невзвешенного попарного среднего (UPGMA). Бутстрап вычисляли по выборке из 100 деревьев. Критерием устойчивости кластера считали значение бутстрапа выше 60.

Результаты и их обсуждение. Анализ литературных данных показал, что для генотипирования *Leuconostoc mesenteroides* чаще применяют Rep-ПЦР (амплификация повторяющейся экстрагенной палиндромной ДНК) и RAPD-ПЦР (ПЦР с неспецифическими праймерами). Эти методы основаны на использовании коротких праймеров, число и расположение сайтов связывания таких неспецифических праймеров различаются среди бактерий разных видов и различных штаммов одного вида, что позволяет по профилю образуемых ПЦР-фрагментов выявлять генетическое различие/сходство микроорганизмов [15, 16].

Геномы прокариот характеризуются наличием нескольких категорий повторяющихся последовательностей, таких как гены рРНК, тРНК, IS-элементы, а также прямые повторяющиеся последовательности, локализованные в некодирующих регионах или Rep-участках. Праймеры ERIC, соответствующие последовательностям Rep-повторов *E.coli*, успешно используют для анализа меж- и внутривидовых различий бактериальных геномов. Генетические перестройки приводят к тому, что в ходе ERIC-ПЦР могут образовываться профили ампликонов, которые отличаются не только у разных видов микроорганизмов, но и у представителей одного вида [17].

Для анализа разрешающей способности методов Rep- и RAPD-ПЦР отобраны 6 изолятов лейконостоков (p1601/1-7-7, p1656/1-2-1, p1618/1-2, p1613/2-1-5, p1736/1-1, p1766/2-2) и 4 изолята диациетильного лактококка (p1607/2-5-7, p1609/1-3-2, p1604/1-9-7, p1606/1-2-8), выделенные из сырого молока из разных регионов Республики Беларусь (табл. 1).

Таблица 1. Изоляты лейконостоков и диациетильного лактококка, отобранные для исследований разрешающей способности методов Rep- и RAPD-ПЦР

Table 1. *Leuconostoc* and diacetyl lactococcus isolates selected for studies of the resolving power of the Rep- and RAPD-PCR methods

Номер изолята	Источник выделения	Видовая принадлежность
p1601/1-7-7	Молоко сырое, ОАО «Городея», д. Большая Лысица, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1613/2-1-5	Молоко сырое, ОАО «Щорсы», д. Щорсы, Новогрудский р-н, Гродненская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1618/1-2	Молоко сырое, СРДУП «Свитязь», д. Валевка, Новогрудский р-н, Гродненская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1656/1-2-1	Молоко сырое, СПК АК «Снов», д. Снов, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1736/1-1	Молоко сырое, Барановичский молочный комбинат, г. Барановичи, Брестская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1766/2-2	Молоко сырое, ОАО «Комаровка», аг. Томашовка, Брестский р-н, Брестская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1604/1-9-7	Молоко сырое, СК «Острошицы», д. Веснино, Логойский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>
p1606/1-2-8	Молоко сырое, СПК «Агрокомбинат Снов», д. Новый Снов, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>
p1607/2-5-7	Молоко сырое, СПК «Агрокомбинат Снов», д. Сычи, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>
p1609/1-3-2	Молоко сырое, ОАО «Смолевичи Бройлер», филиал «Смолевичи Дэйриз», Смолевичский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>

Видовая принадлежность исследуемых культур подтверждена результатами ПЦР со специфичными праймерами Lmes-f (5'-AACTTAGTGTGCGCATGAC-3') и Lmes-r (5'-AGTCGAGTTACAGACTACAA-3'), размер ПЦР-продукта – 1 150 п. н., опубликованными в работе [18].

Анализ профилей фрагментов, полученных с помощью Rep-ПЦР с праймерами ERIC IIR, ERIC2-1, BOXA1R и BOXA2R, показал, что метод обладает типизирующей способностью и позволяет выявлять гетерогенность внутри вида *Leuconostoc mesenteroides* (рис. 1). При использовании праймеров BOXA1R и BOXA2R все исследуемые изоляты отличаются профилями фрагментов Rep-ПЦР.

При использовании праймеров ERIC IIR и ERIC2-1 большее количество ампликонов образуется с праймером ERIC2-1 по сравнению с ERIC IIR. Кроме того, с праймером ERIC2-1 для каждого изолята лейконостоков образуется уникальный профиль, в отличие от праймера ERIC IIR, с которым два изолята (p1613/2-1-5 и p1766/2-2) из шести имеют схожий паттерн (см. рис. 1).

Анализ профилей фрагментов разных изолятов диациетильного лактококка, полученных с праймерами BOXA1R и BOXA2R, позволил установить, что с праймером BOXA1R образуются практически идентичные профили у всех исследуемых культур. В то же время с праймером BOXA2R у всех изолятов образуются различные профили ампликонов. С праймерами ERIC IIR и ERIC2-1 образуются схожие профили у изолятов p1606/1-2-8 и p1609/1-3-2 (рис. 2).

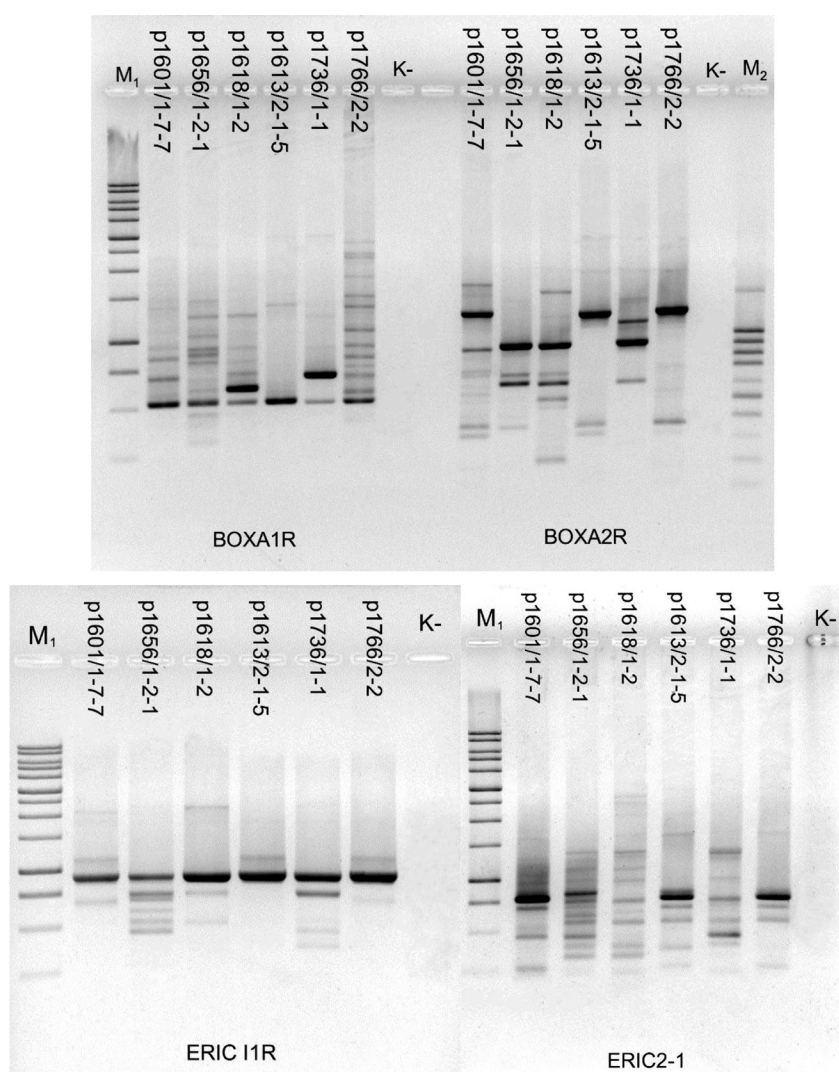


Рис. 1. Электрофоретические профили продуктов Rep-ПЦР лейконостоков с праймерами BOXA1R, BOXA2R, ERIC IIR и ERIC2-1; M₁ – маркер молекулярного веса M1Kb; M₂ – маркер молекулярного веса M100bp; K- – отрицательный контроль

Fig. 1. Electrophoretic profiles of Rep-PCR products of leuconostocs with primers BOXA1R, BOXA2R, ERIC IIR and ERIC2-1; M₁ – molecular weight marker M1Kb; M₂ – molecular weight marker M100bp; K- – negative control

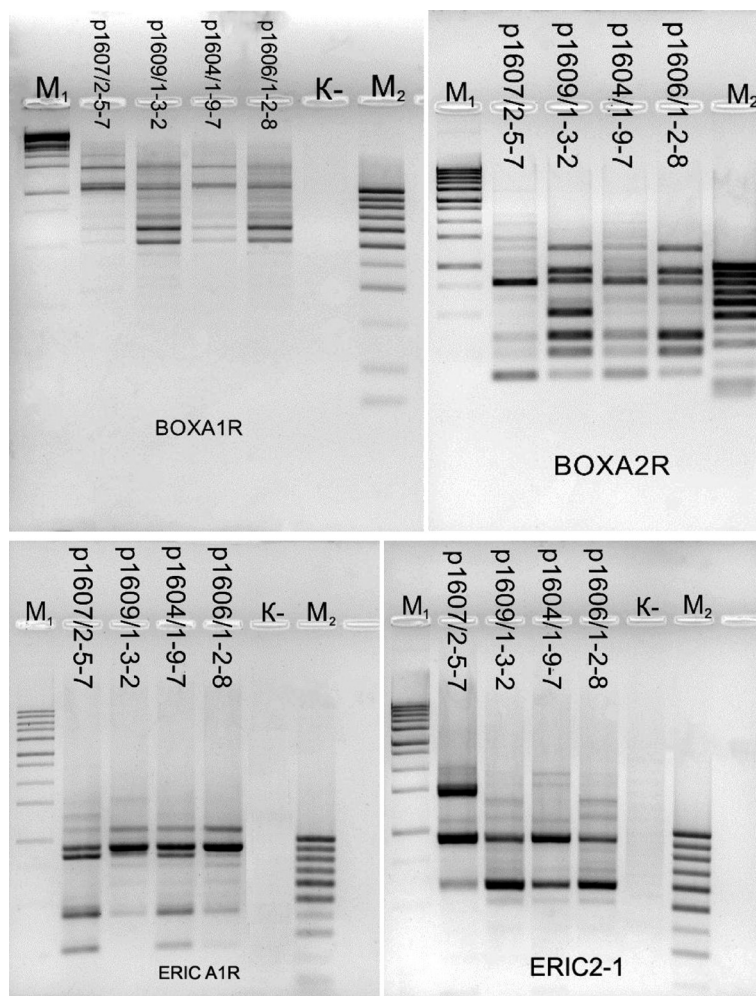


Рис. 2. Электрофоретические профили продуктов Rep-ПЦР диацетильного лактококка с праймерами BOXA1R, BOXA2R, ERIC 1R и ERIC2-1; M₁ – маркер молекулярного веса M1Kb; M₂ – маркер молекулярного веса M100bp; K- – отрицательный контроль

Fig. 2. Electrophoretic profiles of Rep-PCR products of diacetyl lactococcus with primers BOXA1R, BOXA2R, ERIC 1R and ERIC2-1; M₁ – molecular weight marker M1Kb; M₂ – molecular weight marker M100bp; K- – negative control

Анализ профилей фрагментов, полученных с помощью RAPD-ПЦР с праймерами P15, P16, XD8, XD9, (GTG)₅, RAPD-mes, подтвердил типизирующую способность метода выявлять гетерогенность внутри вида *Leuconostoc mesenteroides* (рис. 3). При использовании праймеров XD8, P16, (GTG)₅, RAPD-mes все исследуемые изоляты отличаются профилями ампликонов. С праймером P15 только у двух изолятов *Leuconostoc mesenteroides* образуются идентичные профили ампликонов (p1613/2-1-5 и p1766/2-2). Все остальные изоляты имеют уникальные профили ампликонов. Наименьшее количество ампликонов у всех изолятов образуется с праймером XD9. Праймер RAPD-mes, благодаря тому что разработан специально для типирования лейконостоков, позволяет получать хорошо читаемые электрофореграммы.

Анализ профилей фрагментов изолятов диацетильного лактококка, полученных с помощью RAPD-ПЦР, показал, что метод обладает типизирующей способностью и позволяет выявлять гетерогенность внутри биоварианта только с праймерами XD8, XD9 и P16 (рис. 4). Наибольшее количество четких ампликонов наблюдается с праймером XD8. С праймером P15 получены схожие профили ампликонов для изолятов p1604/1-9-7, p1606/1-2-8, p1609/1-3-2. С праймером (GTG)₅ получены схожие профили ампликонов для изолятов p1604/1-9-7, p1606/1-2-8, p1607/2-5-7.

Таким образом, для всех исследуемых культур лейконостоков уникальные профили фрагментов получены при проведении Rep-ПЦР с праймерами ERIC2-1, BOXA1R и BOXA2R, для изолятов диацетильного лактококка – с праймерами BOXA2R и ERIC2-1.

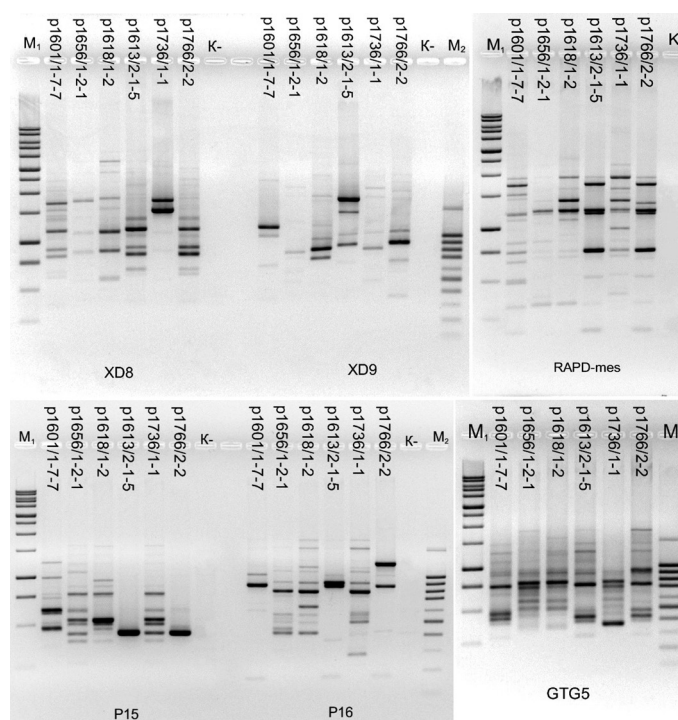


Рис. 3. Электрофорез продуктов RAPD-ПЦР лейконостоков с праймерами XD8, XD9, P15, P16 и (GTG)₅;
M₁ – маркер молекулярного веса 1Kb; M₂ – маркер молекулярного веса 100bp; K – отрицательный контроль

Fig. 3. Electrophoresis of RAPD-PCR products of leuconostocs with primers XD8, XD9, P15, P16 and (GTG)₅;
M₁ – molecular weight marker 1Kb; M₂ – molecular weight marker 100bp; K – negative control

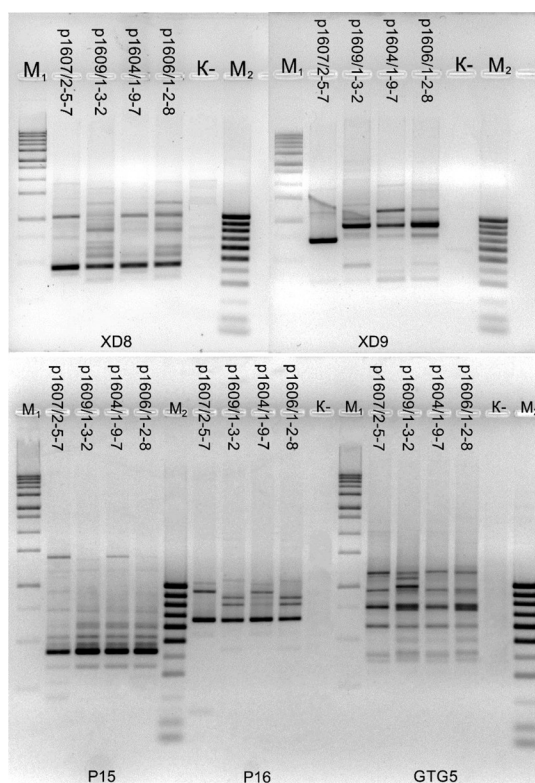


Рис. 4. Электрофорез продуктов RAPD-ПЦР диацильного лактококка с праймерами XD8, XD9, P15, P16 и (GTG)₅;
M₁ – маркер молекулярного веса 1Kb; M₂ – маркер молекулярного веса 100bp; K – отрицательный контроль

Fig. 4. Electrophoresis of RAPD-PCR products of diacetyl lactococcus with primers XD8, XD9, P15, P16 and (GTG)₅;
M₁ – molecular weight marker 1Kb; M₂ – molecular weight marker 100bp; K – negative control

При проведении RAPD-ПЦР лучшая разрешающая способность для лейконостоков установлена при использовании праймеров XD8, P15, P16 и RAPD-mes, для диацетильного лактококка – с праймерами XD8 и P16.

На следующем этапе проведены исследования по выявлению различий по профилю генерируемых ампликонов среди изолятов, выделенных как из одного, так и из разных природных источников. Для типирования отобраны 20 изолятов *Leuconostoc mesenteroides* из 8 природных источников и 10 изолятов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* bv. *diacetylactis* из 4 природных источников (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Изоляты лейконостоков и диацетильного лактококка, отобранные для генотипирования

Table 2. *Leuconostoc* and diacetyl lactococcus isolates selected for genotyping

Номер изолята	Источник выделения	Видовая принадлежность
p1601/1-4-2 p1601/1-7-7	Молоко сырое, ОАО «Городея», д. Большая Лысица, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1605/2-3-1 p1605/2-5-9	Молоко сырое, ОАО «Новая жизнь», д. Наручевичи, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1613/2-1-2 p1613/2-1-5	Молоко сырое, ОАО «Щорсы», д. Щорсы, Новогрудский р-н, Гродненская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1618/1-2 p1618/1-1-2 p1618/1-1-9	Молоко сырое, СРДУП «Свитязь», д. Валивка, Новогрудский р-н, Гродненская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1656/1-2-1 p1656/1-2-6 p1656/1-2-7	Молоко сырое, СПК АК «Снов», д. Снов, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1754/1-2 p1754/2-1	Молоко сырое козье, д. Большие Прусы, Кобыльский р-н, Минская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1764/2-4	Молоко сырое, ОАО «Агро-Пелище», аг. Пелище, Каменецкий р-н, Брестская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1766/2-1 p1766/2-2 p1766/2-5	Молоко сырое, ОАО «Комаровка», аг. Томашовка, Брестский р-н, Брестская обл.	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
p1604/1-5-2 p1604/1-9-7 p1604/1-3-1	Молоко сырое, СК «Острошицы», д. Веснино, Логойский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>
p1606/1-2-8 p1606/1-4-3	Молоко сырое, СПК АК «Снов», д. Новый Снов, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>
p1607/2-5-7 p1607/2-6-7	Молоко сырое, СПК АК «Снов», д. Сычи, Несвижский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>
p1609/1-1-7 p1609/1-3-2 p1609/1-5-4	Молоко сырое, ОАО «Смолевичи Бройлер», филиал «Смолевичи Дэйриз», Смолевичский р-н, Минская обл.	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> bv. <i>diacetylactis</i>

Типирование проводили с праймерами, отобранными на предыдущем этапе работы: для Rep-ПЦР использовали праймеры BOXA2R и ERIC2-1 как для лейконостоков, так и для диацетильного лактококка; при проведении RAPD-ПЦР с лейконостоками использовали праймеры XD8, P15, P16 и RAPD-mes, для типирования диацетильного лактококка – праймеры XD8 и P16.

Для оценки генетического родства исследуемых культур провели кластерный анализ результатов генотипирования при помощи программы TREECON for Windows (версия 1.3b) [19]. Результаты анализа представлены на рис. 5 и 6 в виде филогенетических деревьев.

В результате анализа электрофореграмм, полученных с использованием праймеров BOXA2R и ERIC2-1, установлено, что не все исследуемые изоляты лейконостоков, выделенные из одного природного источника, имеют идентичные профили ампликонов. Так, изолят p1618/1-2 имеет профили фрагментов, отличные от профилей изолятов p1618/1-1-2 и p1618/1-1-9, а изоляты p1613/2-1-2 и p1613/2-1-5 различаются профилями фрагментов, полученными в результате Rep-ПЦР с обоими праймерами.

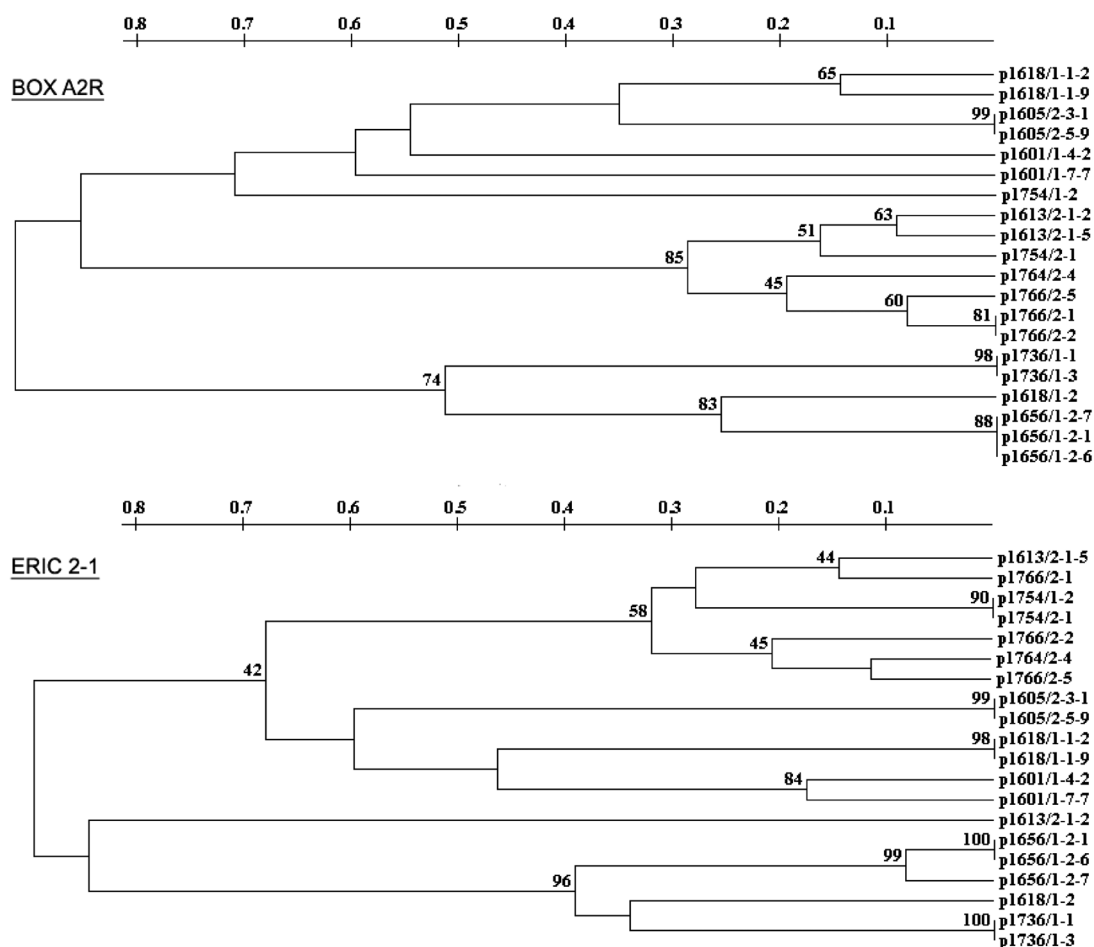


Рис. 5. Филогенетические деревья, полученные в результате анализа электрофореграмм Rep-ПЦР лейконостоков

Fig. 5. Phylogenetic trees obtained as a result of the analysis of Rep-PCR electropherograms of leuconostocs

В результате анализа электрофореграмм, полученных при проведении RAPD-ПЦР с праймерами XD8, P15, P16 и RAPD-mes, выявлены различия в профилях фрагментов для изолятов лейконостоков p1618/1-2, p1618/1-1-2 и p1618/1-1-9, а также для изолятов p1613/2-1-2 и p1613/2-1-5 (рис. 6). Таким образом, результаты исследований показали, что комбинированное использование Rep-ПЦР и RAPD-ПЦР повышает достоверность типирования изолятов лейконостоков.

В результате типирования культур диацетильного лактококка методами RAPD-ПЦР и Rep-ПЦР выявлены различия между изолятами, выделенными из одного природного источника (рис. 7, 8), что позволяет использовать их совместно при создании бактериальных консорциумов.

Заключение. В настоящее время для оценки гетерогенности микроорганизмов широко используют различные методы генотипирования. Разрешающая способность метода зависит от многих факторов, главный из которых – выбор наиболее информативного участка генома. Кроме того, большинство методов генотипирования проявляют специфичность по отношению к бактериальным штаммам, вследствие чего они с различной эффективностью дифференцируют тот или иной вид.

Изучение типизирующей способности Rep-ПЦР в отношении лейконостоков показало, что изоляты, выделенные из разных природных источников, образуют отличающиеся профили ампликонов с использованием праймеров BOXA1R, BOXA2R, ERIC2-1. Типизирующая способность Rep-ПЦР в отношении изолятов диацетильного лактококка выявлена только с праймерами BOXA2R и ERIC2-1. Метод RAPD-ПЦР обладает типизирующей способностью в отношении лейконостоков с использованием праймеров XD8, P15, P16 и RAPD-mes. Анализ профилей фрагментов изолятов диацетильного лактококка, полученных с помощью RAPD-ПЦР, показал, что метод обладает типизирующей способностью и позволяет выявлять гетерогенность внутри биоварианта *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar. *diacetylactis* с праймерами XD8 и P16.

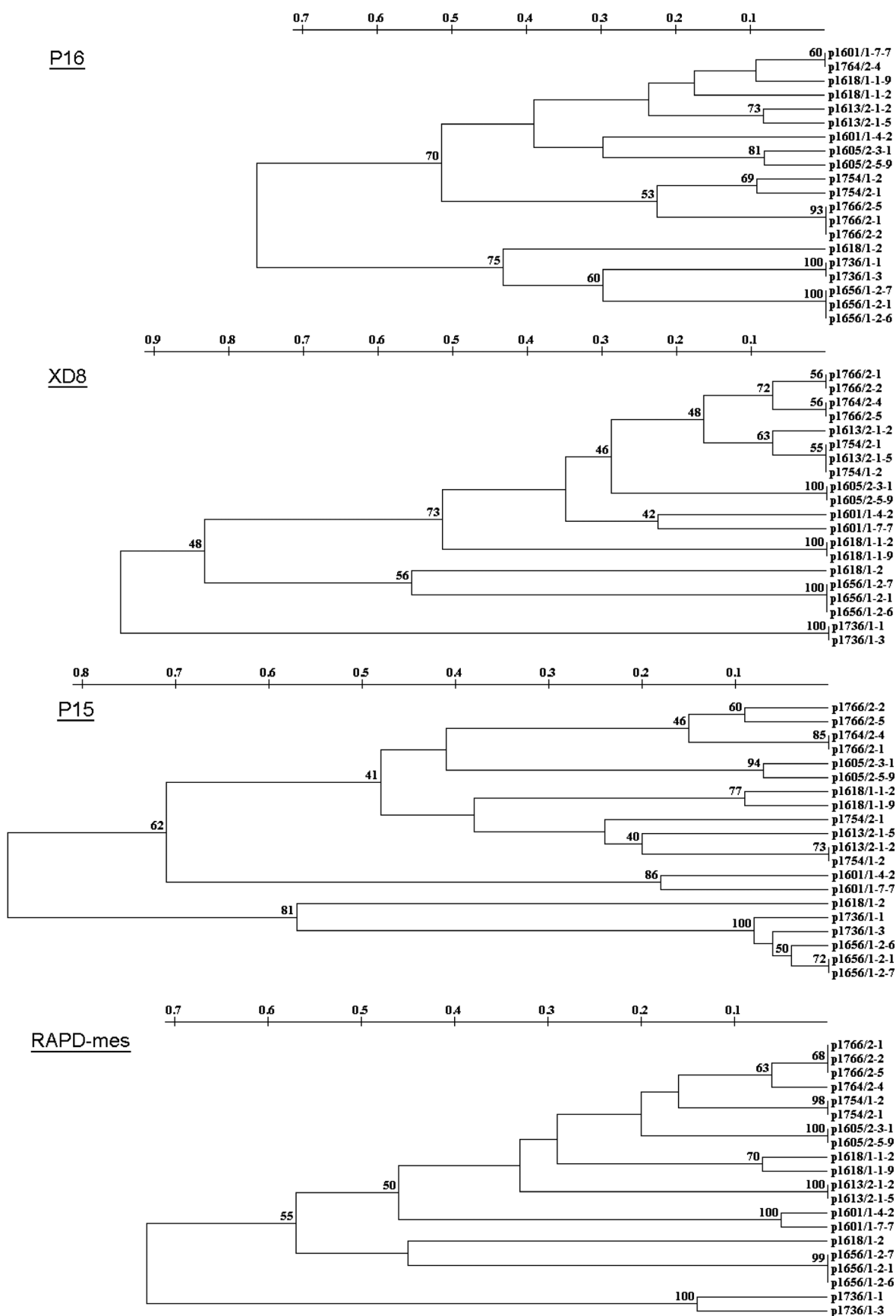


Рис. 6. Филогенетические деревья, полученные в результате анализа RAPD-ПЦР электрофореграмм лейконосточков

Fig. 6. Phylogenetic trees obtained as a result of the analysis of RAPD-PCR electropherograms of leuconostoc

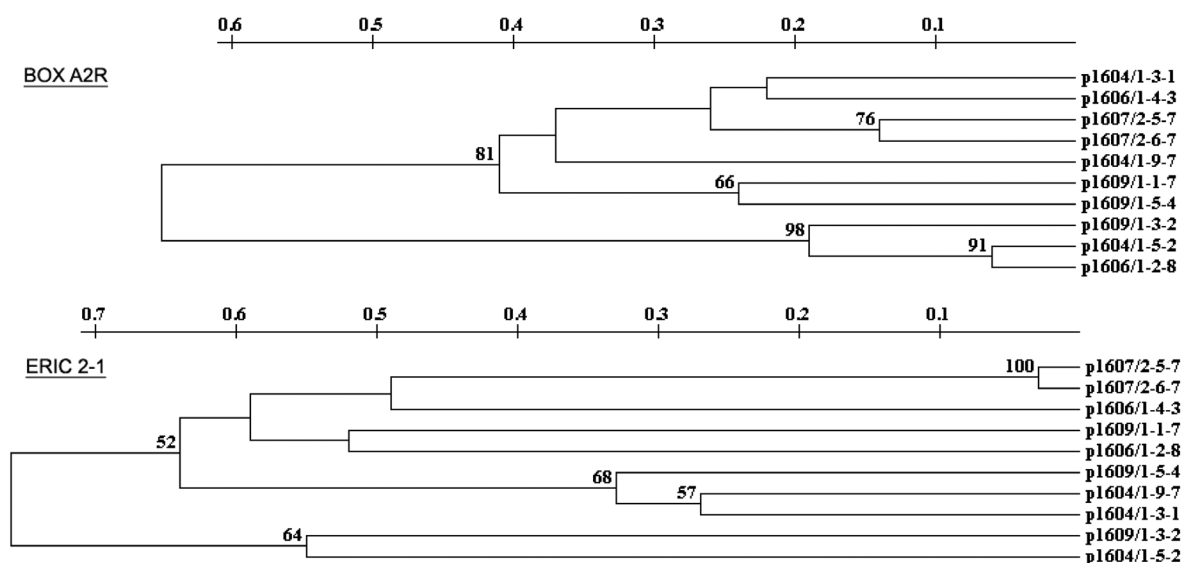


Рис. 7. Филогенетические деревья, полученные в результате анализа электрофореграмм Rep-ПЦР лактококков

Fig. 7. Phylogenetic trees obtained as a result of the analysis of Rep-PCR electropherograms of lactococci

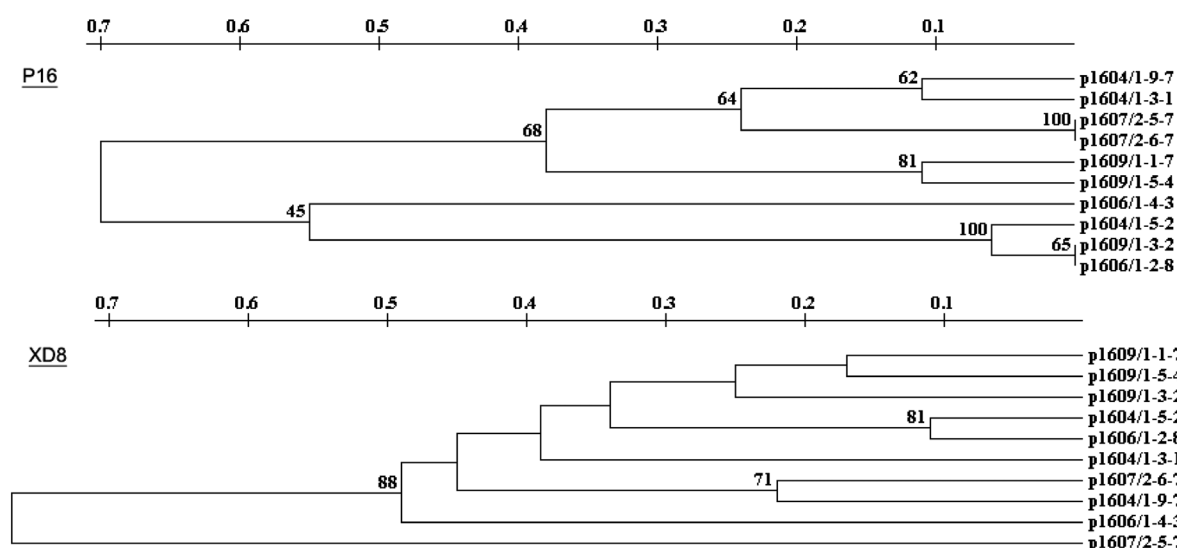


Рис. 8. Филогенетические деревья, полученные в результате анализа электрофореграмм RAPD-ПЦР лактококков

Fig. 8. Phylogenetic trees obtained as a result of the analysis of RAPD-PCR electropherograms of lactococci

Выявление гетерогенности среди изолятов диацетильного лактококка и лейконостоков с помощью комбинированного использования методов Rep-ПЦР и RAPD-ПЦР повышает достоверность типирования изолятов, выделенных из природных источников.

Благодарности. Работа выполнена в рамках мероприятия 100 (93) «Разработать технологию получения газо- и ароматобразующих микроорганизмов на основе методов молекулярно-генетического типирования и освоить производство заквасок для творога с их использованием» подпрограммы «Инновационные биотехнологии» Государственной программы «Наукоёмкие технологии и техника» на 2021–2025 годы (срок выполнения – 2021–2023 гг.). Авторы выражают благодарность М. А. Шукшиной за помощь в получении экспериментальных данных, использованных при подготовке статьи.

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of Activity 100 (93) “To develop a technology for obtaining gas- and aroma-forming microorganisms based on molecular genetic typing methods and to establish the production of starter cultures for cottage cheese using them,” subprogramme “Innovative Biotechnologies” of the State Programme “Science-Intensive Technologies and Equipment” for 2021–2025 (implementation period: 2021–2023). The authors express their gratitude to M. A. Shukshina for her assistance in obtaining the experimental data used in the preparation of this article.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Organic acids production from lactic acid bacteria: a preservation approach / S. P. Bangar, S. Suri, M. Trif, F. Ozogul // *Food Bioscience*. – 2022. – Vol. 46. – Art. 101615. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101615>
2. Bintsis, T. Lactic acid bacteria as starter cultures: an update in their metabolism and genetics / T. Bintsis // *AIMS Microbiology*. – 2018. – Vol. 4, № 4. – P. 665–684. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>
3. Smid, E. J. Production of aroma compounds in lactic fermentations / E. J. Smid, M. Kleerebezem // *Annual Review of Food Science and Technology*. – 2014. – Vol. 5. – P. 313–326. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030713-092339>
4. Impact of lactic acid bacteria and their metabolites on the techno-functional properties and health benefits of fermented dairy products / H. Sharma, F. Ozogul, E. Bartkiene, J. M. Rocha // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2023. – Vol. 63, № 21. – P. 4819–4841. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2007844>
5. *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* SJRP55 reduces *Listeria monocytogenes* growth and impacts on fatty acids profile and conjugated linoleic acid content in fermented cream / D. O. Borges, M. M. Matsuo, C. S. Bogsan [et al.] // *LWT*. – 2019. – Vol. 107. – P. 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.085>
6. Coelho, M. Lactic acid bacteria in raw-milk cheeses: from starter cultures to probiotic functions / M. Coelho, F. X. Malcata, C. Silva // *Foods*. – 2022. – Vol. 11, № 15. – Art. 2276. <https://doi.org/10.3390/foods11152276>
7. Fatma, C. H. Isolation and identification of *Leuconostoc mesenteroides* producing bacteriocin isolated from Algerian raw camel milk / C. H. Fatma, Z. Benmechernene // *African Journal of Microbiology Research*. – 2013. – Vol. 7, № 23. – P. 2961–2969. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.5753>
8. Aroma formation during cheese ripening is best resembled by *Lactococcus lactis* retentostat cultures / O. van Mastriht, D. G. Tejeda, M. N. Kristensen [et al.] // *Microbial Cell Factories*. – 2018. – Vol. 17, № 1. – Art. 104. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0950-7>
9. Прикладная биотехнология: от фундаментальных исследований к промышленным технологиям / Н. К. Жабанос, Н. Н. Фурик, Е. Н. Бирюк, Т. А. Савельева // *Наука и инновации*. – 2024. – № 10 (260). – С. 12–18.
10. Локачук, М. Н. Видовая идентификация чистых культур заквасочных лактобацилл / М. Н. Локачук, Ю. М. Фролова // *Пищевые системы*. – 2021. – Т. 4, № 3S. – С. 184–187. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-184-187>
11. Выделение и идентификация молочнокислых бактерий для ферментированных молочных продуктов / Т. Н. Орлова, И. А. Функ, Р. В. Дорофеев [и др.] // *Ползуновский вестник*. – 2019. – № 2. – С. 47–50. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.02.009>
12. Грачева, И. В. Принципы формирования коллекционных фондов штаммов микроорганизмов / И. В. Грачева, А. В. Осин, В. В. Кутырев // *Проблемы особо опасных инфекций*. – 2021. – № 2. – С. 16–23. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2021-2-16-23>
13. Проблемы генотипирования микроорганизмов / Р. А. Волкова, Е. С. Сколотнева, Е. В. Эльберт [и др.] // *Биопрепараты. Профилактика, диагностика, лечение*. – 2016. – Т. 16, № 3 (59). – С. 139–144.
14. Development of a selective medium for the enumeration of lactic acid bacteria and bifidobacteria in food products / J. H. Yoon, J. Y. Kim, J. H. Yoo, S. Y. Lee // *Food Science and Biotechnology*. – 2023. – Vol. 32, № 5. – P. 713–721. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01202-z>
15. Identification, typing, and functional characterization of *Leuconostoc* spp. strains from traditional, starter-free cheeses / Á. Alegria, S. Delgado, A. B. Flórez, B. Mayo // *Dairy Science and Technology*. – 2013. – Vol. 93, № 6. – P. 657–673. <https://doi.org/10.1007/s13594-013-0128-3>
16. DNA profiling of *Leuconostoc mesenteroides* strains isolated from fermented food and farm produce in Korea by repetitive-element PCR / J. Kaur, S. Lee, A. Sharma, Y.-S. Park // *Food Science and Biotechnology*. – 2017. – Vol. 26, № 6. – P. 1667–1673. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0189-9>
17. Генетическое типирование *Salmonella enterica* с помощью ПЦР / В. В. Слизень, Ж. Ф. Циркунова, Е. И. Гудкова, О. Ч. Глаз // *Медицинский журнал*. – 2014. – № 3 (49). – С. 93–97.
18. Lee, H. J. Multiplex PCR-based detection and identification of *Leuconostoc* species / H. J. Lee, S. Y. Park, J. Kim // *FEMS Microbiology Letters*. – 2000. – Vol. 193, № 2. – P. 243–247. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb09431.x>
19. Van de Peer, Y. TREECON for Windows: a software package for the construction and drawing of evolutionary trees for the Microsoft Windows environment / Y. Van de Peer, R. De Wachter // *Computer Applications in the Biosciences: CABIOS*. – 1994. – Vol. 10, № 5. – P. 569–570. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/10.5.569>

References

1. Bangar S. P., Suri S., Trif M., Ozogul F. Organic acids production from lactic acid bacteria: a preservation approach. *Food Bioscience*, 2022, vol. 46, art. 101615. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101615>
2. Bintsis T. Lactic acid bacteria as starter cultures: an update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 665–684. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>
3. Smid E. J., Kleerebezem M. Production of aroma compounds in lactic fermentations. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2014, vol. 5, pp. 313–326. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030713-092339>
4. Sharma H., Ozogul F., Bartkiene E., Rocha J. M. Impact of lactic acid bacteria and their metabolites on the technofunctional properties and health benefits of fermented dairy products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, vol. 63, no. 21, pp. 4819–4841. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2007844>
5. Borges D. O., Matsuo M. M., Bogsan C. S., da Silva T. F., Casarotti S. N., Penna A. L. B. *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* SJRP55 reduces *Listeria monocytogenes* growth and impacts on fatty acids profile and conjugated linoleic acid content in fermented cream. *LWT*, 2019, vol. 107, pp. 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.085>
6. Coelho M., Malcata F. X., Silva C. Lactic acid bacteria in raw-milk cheeses: from starter cultures to probiotic functions. *Foods*, 2022, vol. 11, no. 15, art. 2276. <https://doi.org/10.3390/foods11152276>
7. Fatma C. H., Benmechernene Z. Isolation and identification of *Leuconostoc mesenteroides* producing bacteriocin isolated from Algerian raw camel milk. *African Journal of Microbiology Research*, 2013, vol. 7, no. 23, pp. 2961–2969. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.5753>

8. Mastrigt O. van, Tejeda D. G., Kristensen M. N., Abee T., Smid E. J. Aroma formation during cheese ripening is best resembled by *Lactococcus lactis* retentostat cultures. *Microbial Cell Factories*, 2018, vol. 17, no. 1, art. 104. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0950-7>
9. Zhabanos N., Furik N., Biryuk E., Savelyeva N. Applied biotechnology: from fundamental research to industrial technologies. *Nauka i innovatsii = Science & Innovations*, 2024, no. 10 (260), pp. 12–18 (in Russian).
10. Lokachuk M. N., Frolova J. M. Species identification of lactobacilli for the sourdough. *Pishchevye sistemy = Food Systems*, 2021, vol. 4, no. 3S, pp. 184–187 (in Russian). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-184-187>
11. Orlova T. N., Funk I. A., Dorofeev R. V., Ott E. F., Shevchenko K. E. Isolation and identification of lactic acid bacteria for fermented milk products. *Polzunovskiy vestnik*, 2019, no. 2, pp. 46–50 (in Russian). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.02.009>
12. Gracheva I. V., Osin A. V., Kutyrev V. V. Principles of formation of collection funds of microorganism strains. *Problemy osobo opasnykh infektsii = Problems of Particularly Dangerous Infections*, 2021, no. 2, pp. 16–23 (in Russian). <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2021-2-16-23>
13. Volkova R. A., Skolotneva E. S., Elbert E. V., Mytsa E. D., Davydov D. S., Movsesyants A. A., Merkulov V. A., Bondarev V. P., Borisevich I. V. Genotyping problems of microorganisms. *Biopreparaty. Profilaktika, diagnostika, lechenie = Biological Products. Prevention, Diagnosis, Treatment*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 139–144 (in Russian).
14. Yoon J. H., Kim J. Y., Yoo J. H., Lee S. Y. Development of a selective medium for the enumeration of lactic acid bacteria and bifidobacteria in food products. *Food Science and Biotechnology*, 2023, vol. 32, no. 5, pp. 713–721. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01202-z>
15. Alegría Á., Delgado S., Flórez A. B., Mayo B. Identification, typing, and functional characterization of *Leuconostoc* spp. strains from traditional, starter-free cheeses. *Dairy Science and Technology*, 2013, vol. 93, no. 6, pp. 657–673. <https://doi.org/10.1007/s13594-013-0128-3>
16. Kaur J., Lee S., Sharma A., Park Y.-S. DNA profiling of *Leuconostoc mesenteroides* strains isolated from fermented food and farm produce in Korea by repetitive-element PCR. *Food Science and Biotechnology*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 1667–1673. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0189-9>
17. Slizen V. V., Tsyrukunova Z. F., Gudkova E. I., Glaz O. C. Genetic typing of salmonella Enterica by ERIC and RAPD PCR. *Meditsinskii zhurnal = Medical Journal*, 2014, no. 3 (49), pp. 93–97 (in Russian).
18. Lee H. J., Park S. Y., Kim J. Multiplex PCR-based detection and identification of *Leuconostoc* species. *FEMS Microbiology Letters*, 2000, vol. 193, no. 2, pp. 243–247. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb09431.x>
19. Van de Peer Y., De Wachter R. TREECON for Windows: a software package for the construction and drawing of evolutionary trees for the Microsoft Windows environment. *Computer Applications in the Biosciences: CABIOS*, 1994, vol. 10, no. 5, pp. 569–570. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/10.5.569>

Информация об авторах

Бирюк Елена Николаевна – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией микробиологических, молекулярно-генетических, биохимических исследований и коллекции промышленных микроорганизмов отдела биотехнологий, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (Партизанский пр., 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: biohimbel@yandex.by

Жабанос Наталья Константиновна – кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом биотехнологий, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (Партизанский пр., 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nzhabanos@gmail.com

Соглаева Алла Анатольевна, старший научный сотрудник лаборатории микробиологических, молекулярно-генетических, биохимических исследований и коллекции промышленных микроорганизмов отдела биотехнологий, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (пр-т Партизанский, 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soglaevaalla@gmail.com

Савельева Тамара Александровна – кандидат ветеринарных наук, доцент, ученый секретарь, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (Партизанский пр., 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tams-11@mail.ru

Корягина Дарья Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории микробиологических, молекулярно-генетических, биохимических исследований и коллекции промышленных микроорганизмов отдела биотехнологий, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (пр-т Партизанский, 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: koryagina.darya06@gmail.com

Information about the authors

Alena N. Biruk – Ph. D. (Agriculture), Head of the Laboratory of Microbiological, Molecular Genetic and Biochemical Research and the Collection of Industrial Microorganisms of the Department of Biotechnologies, Institute for the Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus (172, Partizanskiy Av., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: biohimbel@yandex.by

Natallia K. Zhabanos – Ph. D. (Engineering), Head of the Department of Biotechnologies, Institute for the Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus (172, Partizanskiy Av., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nzhabanos@gmail.com

Alla A. Soglaeva – Senior Researcher of the Laboratory of Microbiological, Molecular Genetic and Biochemical Research and the Collection of Industrial Microorganisms of the Department of Biotechnologies, Institute for the Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus (172, Partizanskiy Av., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soglaevaalla@gmail.com

Tamara A. Savelyeva – Ph. D. (Veterinary), Associate Professor, Academic Secretary, Institute for the Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus (172, Partizanskiy Av., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tams-11@mail.ru

Darya S. Karahina – Junior Researcher of the Laboratory of Microbiological, Molecular Genetic and Biochemical Research and the Collection of Industrial Microorganisms of the Department of Biotechnologies, Institute for the Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus (172, Partizanskiy Av., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: koryagina.darya06@gmail.com